669
P89

РУССКИЕ УЧЕНЫЕ-МЕТАЛЛОВЕДЫ

МАШГИЗ · 1951

РУССКИЕ УЧЕНЫЕ-МЕТАЛЛОВЕДЫ

П. П. АНОСОВ,
Н. В. КАЛАКУЦКИЙ,
А. А. РЖЕШОТАРСКИЙ
Н. И. БЕЛЯЕВ,
А. Л. БАБОШИН,
М. Г. ОКНОВ

*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

РУССКИЕ УЧЕНЫЕ-МЕТАЛЛОВЕДЫ

ЖИЗНЬ, ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

•

ОБЩАЯ РЕДАКЦИЯ
И ВСТУПИТЕЛЬНЫЕ ОЧЕРКИ
канд. техн. наук доц.
Д. М. НАХИМОВА
и канд. техн. наук доц.
А. Г. РАХШТАДТА

Библиотека
Павлодарский индустриальный институт

БИБЛИОТЕКА
Московск. Механическ.
института

МОСКВА
1951

С. БЕЙСЕМБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҒЫЛЫМИ КІТАПХАНА
СИРЕК КІТАПТАР ҚОРЫ

6113 669
Р89

В настоящей книге помещены избранные труды крупнейших русских ученых-металловедов П. П. Аносова, Н. В. Калакуцкого, А. А. Ржешотарского, А. Л. Бабошина, Н. И. Беляева и М. Г. Окнова.

Публикуемым трудам предшествуют вступительные очерки о жизни и деятельности этих ученых.

Очерки написаны канд. техн. наук доц. Д. М. Нахимовым и канд. техн. наук доц. А. Г. Рахштадтом. Ими же выбраны и отредактированы для опубликования труды П. П. Аносова, Н. В. Калакуцкого, А. А. Ржешотарского, Н. И. Беляева, А. Л. Бабошина и М. Г. Окнова.

Книга предназначена для профессорско-преподавательского состава, студентов втузов и инженерно-технических работников.

Рецензенты чл.-корр. АН СССР **Б. В. Старк**,
проф. **Н. И. Иванов**

Редактор проф. ***Г. И. Погодин-Алексеев***

Редакция литературы по истории машиностроительной техники
Зав. редакцией Г. И. КОНОНЕНКО

ОТ СОСТАВИТЕЛЕЙ

Наша страна — родина металловедения. Работы русских ученых, классиков металловедения до настоящего времени представляют не только исторический и научный интерес, но и имеют практическое значение. Однако для широких кругов инженеров и научных работников пользование этими трудами чрезвычайно затруднительно, а в некоторых случаях недоступно, так как они являются в большинстве случаев библиографической редкостью.

Издание настоящего сборника имеет целью хотя бы отчасти восполнить этот пробел и сделать более доступными для широких кругов советских специалистов важнейшие работы русских ученых, основоположников металловедения.

Конечно, одна книга не может описать всего того, что было сделано русскими учеными в этой области. Преследуя цель по возможности ограничить объем изданий и сделать его более доступным, редакция вынуждена была в данный сборник поместить только избранные труды русских ученых П. П. Аносова, Н. В. Калакуцкого, А. А. Ржешотарского, Н. И. Беляева, А. Л. Бабошина и М. Г. Окнова.

Книга о великом русском ученом Д. К. Чернове (жизнь, деятельность и выдержки из трудов) выпущена Машгизом в 1950 г.

В сборник не вошли труды выдающихся русских ученых А. А. Байкова, Н. С. Курнакова, С. С. Штейнберга и Н. А. Минкевича, так как за последние годы вышли или предполагаются в ближайшем времени к выпуску сборники сочинений этих ученых в отдельных изданиях.

При подборе трудов редакция старалась поместить в сборнике по возможности наиболее характерные для творчества каждого ученого работы. Статьи в большей части воспроизведены полностью, с некоторыми исключениями, которые оговорены в примечаниях к каждой работе. Примечания редакции в тексте статей даны в квадратных скобках.

Оригинальным статьям каждого ученого предшествуют краткие очерки с биографическими данными и характеристикой научной деятельности указанных ученых.

Редактирование трудов П. П. Аносова, Н. В. Калакуцкого, А. Л. Бабошина и М. Г. Окнова и составление очерков об их деятельности выполнено канд. техн. наук доц. Д. М. Нахимовым.

Редактирование трудов и составление очерков деятельности А. А. Ржешотарского и Н. И. Беляева выполнено канд. техн. наук доц. А. Г. Рахштадтом.

Составители выражают благодарность дирекции Московского механического института за помощь, оказанную при выполнении настоящей работы, а также редактору книги проф. Г. И. Погодину-Алексееву и рецензентам чл.-корр. АН СССР проф. Б. В. Старку и проф. Н. И. Иванову за ценные советы и указания.

Особую признательность составители выражают семьям Н. И. Беляева, А. Л. Бабошина и М. Г. Окнова за предоставление ценных биографических материалов и портретов ученых, а также старшему библиографу Государственной библиотеки им. Ленина А. Семеновой и библиографам Государственной публичной библиотеки им. Салтыкова-Щедрина О. Флоринской и Б. Маркову за ценную помощь по подбору библиографии.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научное обобщение знаний о свойствах металлов стало возможным только в связи с развитием физики, химии и металлургии. Гениальный русский ученый XVIII в. М. В. Ломоносов, многогранная деятельность которого оказала громадное влияние на развитие мировой культуры, создавший фундамент современной физики и химии, впервые дал научное определение металлов в своем труде „Первые основания металлургии или рудных дел“ (1763 г.)

„Металлом называется, — писал он, — светлое тело, которое ковать можно“. Он дал также описание физических и химических свойств металлов и методов их получения.

В XVIII в. Россия занимала ведущее место по производству чугуна, стали и меди. Из России в большом количестве вывозились железо и медь за границу. Как указывает В. И. Ленин, „Во времена оны крепостное право служило основой высшего процветания Урала и господства его не только в России, но отчасти и в Европе. В 18 веке железо было одной из главных статей отпуска России; железа вывозилось в 1782 г. ок. 3,8 млн. пуд., в 1800—1815 гг. — $2-1^1/_2$ млн. пуд., в 1815—1838 гг. — ок. $1^1/_3$ млн. пуд. Еще «в 20-х годах 19 века Россия получала чугуна в $1^1/_2$ раза более Франции, в $4^1/_2$ раза более Пруссии, в 3 раза более Бельгии». Но то же самое крепостное право, которое помогло Уралу подняться так высоко в эпоху зачаточного развития европейского капитализма, послужило причиной упадка Урала в эпоху расцвета капитализма“[1].

Царские чиновники видели причину отставания промышленности якобы в недостаточной квалификации русских инженеров и мастеров. Так, например, в период 1815—1820 гг. в Россию были приглашены на службу немецкие мастера, которым было предложено необыкновенно высокое содержание, значительное единовременное пособие и ряд других льгот. В Златоусте при существовавшем там заводе была построена фабрика „белого“ (холодного) оружия, на которой немцы должны были организовать весь цикл производства оружия, начиная с выплавки стали.

---

[1] Ленин В. И., Соч., изд. 4-е, т. 3, стр. 424.

Эта затея потребовала от казны громадных затрат, но она не достигла цели. Оказалось, что большинство приехавших немецких „мастеров“ не имело никакой квалификации и училось ремеслу уже после приезда в Златоуст. Но несмотря на это, они долгое время продолжали получать жалование, превышавшее содержание русских квалифицированных мастеров примерно в 8 раз.

Немецкие мастера оказались не в состоянии организовать в Златоусте производство литой стали, так как они его не знали. Эта задача была блестяще разрешена на том же Златоустовском заводе русским горным инженером, великим металлургом Павлом Петровичем Аносовым, создавшим свою знаменитую булатную сталь.

П. П. Аносов (1797—1851 гг.) в трудных условиях крепостного права не только решил задачу производства литой стали, но добился результатов, приковавших внимание всего мира к Златоусту. Он первый в мире применил микроскопический и макроскопический методы для изучения свойств металлов. Его труды послужили фундаментом металлографии и сталелитейного дела. Его замечательная деятельность была чрезвычайно разносторонней. Он оставил ряд трудов по металлургии, геологии и горному делу. Смелый новатор, талантливый инженер П. П. Аносов изобрел ряд машин для добычи золота, открыл новый метод получения золота путем переплавки золотосодержащих песков, организовал производство огнеупорных тиглей из местных материалов, разработал новые конструкции печей, создал новые методы плавки стали и ввел много усовершенствований в производство Златоустовских заводов. Аносов первый в мире сделал попытку отлить стальное орудие.

Он был не только великий ученый, но и блестящий администратор. Его деятельность привела к необыкновенному для того времени явлению на казенных заводах: Златоустовские заводы стали работать рентабельно. Однако после отъезда Аносова из Златоуста и его преждевременной смерти на Златоустовских заводах наступил упадок, и многие усовершенствования и процессы, введенные П. П. Аносовым, не получили немедленного развития и даже были оставлены. В Златоуст вернулись казенщина и консерватизм. Производство литой стали замерло до шестидесятых годов.

Отмена крепостного права создала условия для развития русской промышленности, в том числе металлургической. Опыт Крымской войны особенно ясно показал отставание технического оснащения русской армии. Появилась необходимость вооружения армии и флота дальнобойными орудиями из литой стали взамен бронзовых и чугунных пушек.

Производство литой стали в большом количестве и изготовление из нее прочных орудий было новым делом, представлявшим значительные трудности. Эта задача была решена коллективным творчеством русских инженеров П. М. Обухова, А. С. Лаврова, Н. В. Калакуцкого и Д. К. Чернова. Первые работы были начаты П. М. Обуховым, а также Н. В. Калакуцким и А. С. Лавровым на Златоустовском заводе и затем перенесены в Петербург на вновь организован-

ный завод, названный по имени его основателя Обуховским. На этом заводе, помимо блестящего решения поставленных технических задач, группа русских инженеров (Д. К. Чернов, Н. В. Калакуцкий, А. А. Ржешотарский и др.) сделала ряд научных открытий, послуживших началом развития металловедения.

Во главе этой группы инженеров следует поставить гениального русского ученого Дмитрия Константиновича Чернова[1] (1839—1921 гг.), труды которого имели исключительно большое значение для развития науки о металлах. Имеется преемственная связь между деятельностью П. П. Аносова и Д. К. Чернова. Ряд работ Д. К. Чернова является непосредственным продолжением работ П. П. Аносова. Так, Чернов занимался изготовлением и изучением булатной стали, производством орудий из литой стали, разработкой новых методов термической обработки, в частности закалки в горячей среде, изучением структуры стали и другими вопросами, над которыми также работал Аносов. В своих трудах Чернов много раз вспоминает имя своего великого предшественника и дает его работам восторженную оценку. Однако Чернов не ограничился решением указанных технических задач. Он сделал ряд замечательных открытий, создавших ему мировую славу „отца металлографии". Д. К. Чернов открыл критические точки в стали, открыл линии деформации в металлах, установил природу строения слитков, создал теорию разгара орудийных стволов и выполнил ряд других исследований, имевших большое теоретическое и практическое значение. Таким образом, основоположниками металловедения как науки являются русские ученые П. П. Аносов и Д. К. Чернов.

Имеется существенная разница в условиях деятельности П. П. Аносова и Д. К. Чернова Аносов работал в первой половине XIX в., в период крепостного строя и застоя промышленности. Блестящие достижения Аносова тонули в мертвом болоте крепостнического режима. Чернов работал в условиях, когда крепостное право было отменено, когда русская промышленность вышла из застоя и начала развиваться. Поэтому открытия Чернова были использованы в промышленности и получили всеобщее признание. Необходимо отметить, что Чернов работал не в одиночестве. Он имел талантливых сотрудников и учеников.

В деятельности русских ученых того времени уже было заложено творческое коллективное начало. Это обстоятельство подчеркнул сам Д. К. Чернов, который свою выдающуюся работу о критических точках доложил в 1868 г. на заседаниях Русского технического общества под удивительно скромным названием: „Критический обзор статей гг. Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д. К. Чернова исследования по этому же предмету". В своем докладе он отметил несколько раз заслуги А. С. Лаврова

---

[1] Деятельности Д. К. Чернова посвящен специальный сборник: „Д. К. Чернов", Машгиз, 1950. См. также: „Д. К. Чернов и наука о металлах", Металлургиздат, 1950.

и Н. В. Калакуцкого и сказал, что русская литература должна гордиться трудами этих авторов.

Творческое содружество группы замечательных инженеров на Обуховском заводе имело три важных следствия: во-первых, каждый из них сделал большой вклад в развитие новой науки — металловедения; во-вторых, указанная группа послужила ядром для развития русской школы металловедов, и в-третьих, качество продукции Обуховского завода, опыт которого быстро переняли другие русские заводы, поднялось на небывалую высоту, что подтверждается неоднократным присуждением премий этому заводу на промышленных выставках в России и за границей.

Работы русских ученых показали всему миру широкий размах творческого гения русского народа. Успех этих работ, помимо указанных обстоятельств, связан с методикой, примененной русскими инженерами при решении поставленных задач. Начиная с Аносова, во всех работах русских металловедов красной нитью проходит основная идея научного металловедения, заключающаяся в изучении взаимной связи между структурой, обработкой и свойствами металлов и сплавов. Для установления этой связи П. П. Аносов применил микроскоп, А. С. Лавров и Н. В. Калакуцкий изучали влияние условий отливки и ковки стали на ее структуру. Д. К. Чернов произвел наблюдения над влиянием температурного фактора на фазовую перекристаллизацию стали и т. д. В работах русских инженеров явления рассматривались во взаимной связи, свойства металлов — с точки зрения изменения и развития, начиная с плавки и ковки и кончая термической обработкой. Чернов показал, что в стали при нагревании происходит изменение — превращение всех свойств, т. е. переход от количественных изменений к качественным. До Аносова и Чернова обработка металлов считалась искусством. Она производилась по рецептам, которые создавались эмпирически, долгим путем, при случайных совпадениях различных обстоятельств. В отдельных случаях практики удавалось получить довольно высокие свойства металлических изделий. Однако достаточно было изменений некоторых факторов, чтобы данный рецепт делался непригодным, и требовалось снова произвести значительное количество опытов и затратить много времени и средств, чтобы получить удовлетворительный результат.

К числу славных сподвижников Чернова, как уже упоминалось, принадлежит Николай Вениаминович Калакуцкий (1831—1889 гг.), который работал сперва на Златоустовском заводе, а затем вместе с Черновым на Обуховском.

Н. В. Калакуцкому, кроме работ по исследованию свойств слитка, изучению ликвации и влияния ковки на свойства стали, принадлежит честь открытия метода определения внутренних напряжений в чугуне и стали. Его работа по этому вопросу, воспроизведенная в настоящем сборнике, обессмертила его имя и до сих пор не потеряла своего значения.

К числу ближайших сотрудников и учеников Д. К. Чернова принадлежит А. А. Ржешотарский (1847 — 1904 гг.), выдающийся

металлург и металлограф, опубликовавший в 1898 г. свой замечательный труд „Микроскопические исследования железа, стали и чугуна“, отрывки из которого воспроизведены в настоящем сборнике.

После работ Д. К. Чернова и его сотрудников, в связи с промышленным подъемом в России в 90-х годах, металловедение начало быстро развиваться. По примеру Обуховского завода металлографические лаборатории возникли на других заводах. Такая лаборатория была организована на Путиловском заводе. Основателем ее был выдающийся инженер и ученый Николай Иванович Беляев (1877—1920 гг.), который произвел ряд исследований, посвященных развитию работ П. П. Аносова и Д. К. Чернова о булатной стали, о строении слитка и т. д.

Деятельность Н. И. Беляева проходила главным образом на Путиловском заводе. После Великой Октябрьской социалистической революции Н. И. Беляев принял самое горячее участие в строительстве молодой советской промышленности. Он был одним из организаторов первого завода качественной стали „Электросталь“, введенного в действие при советской власти.

Почетное место в развитии металловедения принадлежит выдающемуся русскому и советскому ученому академику Н. С. Курнакову (1860—1941 гг.), а также академику А. А. Байкову (1870—1946 гг.) [1].

Н. С. Курнаков, основоположник физико-химического анализа, замечательный химик и металловед, опубликовал свыше 200 трудов, которые сохранили до настоящего момента свое значение.

А. А. Байков, работавший главным образом в области металлургии, выполнил также ряд металловедческих исследований. Он первый произвел исследование структуры стали при высокой температуре и показал, что выше точки *b* Чернова сталь имеет особую структуру (аустенит).

К числу выдающихся ученых, сделавших значительные вклады в развитие металловедения, следует причислить С. С. Штейнберга [2] (1872—1940 гг.), А. Л. Бабошина (1872—1938 гг.), Н. А. Минкевича (1883—1942 гг.) и М. Г. Окнова (1878—1942 гг.). Биографии этих ученых, а также Н. С. Курнакова и А. А. Байкова показывают, что все они, начав свою деятельность в дореволюционный период, достигли наибольшего творческого подъема после Великой Октябрьской социалистической революции, когда были созданы все условия для научной деятельности, когда перед наукой была поставлена задача служения народу и содействия развитию социалистического хозяйства и культурного прогресса.

„Советская наука, — писал академик С. И. Вавилов, — самая передовая наука в мире — развивается на прочной основе учения Ленина — Сталина“ [3]. Советская наука сохранила и развила все луч-

---

[1] В данный сборник не включены труды этих выдающихся ученых, так как они изданы в последние годы отдельно.

[2] Труды С. С. Штейнберга и Н. А. Минкевича не включены в настоящий сборник, так как они будут изданы отдельно.

[3] Газета „Правда“ № 219 (11691), 7/VIII 1950 г.

шие традиции русской науки. Она основана на творческом коллективном начале, она имеет небывалый размах, недоступный индивидуалистической науке капиталистического мира, где она используется для корыстных целей господствующего класса. Перед советской наукой лежит широкая дорога дальнейшего развития, ведущего к великой цели построения нового коммунистического общества.

Редакция литературы по истории машиностроительной техники

ПАВЕЛ ПЕТРОВИЧ АНОСОВ

Павел Петрович Аносов (1797 — 1851 гг.)

ВЕЛИКИЙ РУССКИЙ МЕТАЛЛУРГ П. П. АНОСОВ (1797—1851)

Прошло сто лет со дня смерти великого русского металлурга, основоположника металлографии Павла Петровича Аносова. Его имя навсегда останется в памяти народов нашей страны.

Деятельность П. П. Аносова относится к первой половине XIX в. и проходила в основном на Урале.

В этот период Урал был главным центром горной и металлургической промышленности в России. В XVIII и начале XIX в. Россия занимала ведущее место в мировом производстве чугуна и стали. Уральская промышленность была основана на крепостном праве. „Но — как указывает В. И. Ленин — то же самое крепостное право, которое помогло Уралу подняться так высоко в эпоху зачаточного развития европейского капитализма, послужило причиной упадка Урала в эпоху расцвета капитализма“ [1]. Отставание промышленности уже в первой четверти XIX в. отразилось на затруднениях по снабжению армии. Возникла необходимость улучшения снабжения армии холодным оружием.

Царские чиновники считали, что причиной этих затруднений является отсталость наших русских мастеров и что необходимо поэтому пригласить иностранных мастеров на работу в Россию. В 1813 г. „главнокомандующий“ Златоустовскими заводами Гергарт Эверсман командируется в Германию для приглашения на работу немецких мастеров и заключения контрактов с ними. Эверсман заключил договоры на необыкновенно выгодных для немцев условиях.

В 1814 г. в Златоуст прибыла первая партия мастеров в количестве 35 чел., а вместе с семьями — 114 чел. Однако оказалось, что большинство прибывших немцев никакой квалификации не имели и по свидетельству Фурмана, горного начальника Златоустовских заводов с 1815 по 1820 гг., „явились без всяких знаний и приобрели некоторый навык только здесь, что доказывается соб-

[1] Ленин В. И., Соч., изд. 4-е, т. 3, стр. 424.

ственным их признанием"[1]. Однако ни один немец не был уволен, и все они остались в Златоусте, получая необычайно высокое жалование и ряд других льгот. Между тем слухи об открытии обетованной земли широко распространились в Германии. В Златоуст охотно выезжают новые партии немцев, законтрактованные царскими чиновниками на таких же выгодных для немецких мастеров условиях. Уже в 1818 г. в Златоусте насчитывалось 450 чел. немецкого населения. Только на перевозку и содержание при переезде этих людей казна затратила свыше 180 000 руб. Но результат от этой затеи был самый печальный. Например, в 1817 г. из 74 „мастеров" только 29 человек имели некоторую квалификацию. Остальные 45 чел. сами нуждались в обучении и учились уже в Златоусте. Между тем, по свидетельству того же Эверсмана, в Златоусте в 1819 г. было 144 чел., а в 1820 г. — 200 чел. русских мастеров, вполне знающих оружейное дело и „не уступающих по искусству германцам". В начале 20-х годов окончились контракты с иностранными мастерами, но царское правительство дало указание сохранить всем немцам льготное содержание. Поэтому ни один немец не пожелал расстаться с привольной и изобильной жизнью и не уехал из Златоуста. В 1826 г. содержание 117 иностранных мастеров стоило казне 160 608 руб. в год, а содержание такого же числа русских мастеров — 21 864 руб. Характерно отметить, что подрастающие немецкие дети, поступающие на завод в качестве учеников, получали 300—400 руб. в год, а их русские учителя[2] — 186 руб. 29 коп. в год.

Царское правительство проводило политику поощрения и привилегий для иностранцев за счет эксплоатации русских крепостных. В 1824 г. в Златоуст приехал Александр I, который при встрече с немецкими мастерами заявил, что льготы им останутся и в будущем. Он добавил, что России стыдно было бы не пропитать двести семейств и в том случае, если бы иностранцы не приносили никакой пользы.

Для полноты картины следует отметить, что засилье иностранцев в Златоусте в начале XIX в. распространялось и на административный персонал.

В этот период металлургия вступила в новую фазу своего развития. Существовавшие способы получения сварочной стали не могли удовлетворить возросшим требованиям как по качеству, так и по количеству. Появилась необходимость к переходу на более совершенный процесс получения стали в жидком виде, т. е. литой стали.

Еще в начале XIX в. на различных русских заводах русские мастера-новаторы делали опыты и производили литую сталь. Так, литую сталь изготовляли на Баташевских заводах (1806 г.), на Пожевском

---

[1] Бурмакин А. С., Исторические данные по введению изготовления холодного оружия в Златоустовской фабрике немецкими мастерами, „Горный журнал", т-3, № 10—11, 1912, стр. 240.

[2] Немецкие ученики часто обучались у русских квалифицированных мастеров.

заводе, на Велегминском заводе и др. С. И. Бадаев на Воткинском заводе в период 1811—1815 гг. изготовлял литую сталь высокого качества[1]. Однако все эти попытки в трудных условиях крепостного права не имели достаточного развития и не получили должной поддержки. Вместо этого царское правительство затратило громадные средства на перевозку и содержание в Златоусте иностранных мастеров. Из числа последних некий Петр Каймер обязался изготовлять литую сталь. Однако его попытки получить ее окончились полной неудачей и были прекращены в 1816 г.

Разработка метода и организация изготовления высококачественной литой стали была выполнена в Златоусте талантливым русским исследователем горным инженером П. П. Аносовым, многосторонняя деятельность которого принесла Златоустовскому заводу мировую славу.

Павел Петрович Аносов родился в Петербурге в 1797 г[2]. В 1810 г. он поступил в Горный кадетский корпус (ныне Ленинградский горный институт), который окончил в 1817 г. первым с большой золотой медалью. 21 декабря 1817 г. он поступил на Златоустовский завод, где был назначен на должность „чиновника для разных поручений". 21 октября 1819 г. П. П. Аносов занимает должность смотрителя отделения украшенного оружия оружейной фабрики. С 31 октября 1821 г. он назначается помощником управителя, а с 21 ноября 1824 г. — управителем оружейной фабрики. 26 июня 1831 г. он занимает должность горного начальника Златоустовских заводов и директора оружейной фабрики. В 1840 г. он был произведен в генерал-майоры. 28 февраля 1847 г. он получил назначение в Томск на должность главного начальника Алтайских горных заводов. П. П. Аносов умер 13 мая 1851 г. в Омске. Таким образом, основная деятельность П. П. Аносова проходила в Златоусте, где он проработал почти 30 лет.

С самого начала своей работы на заводе П. П. Аносов встретил глухую стену иностранного засилья, с которым ему пришлось непрерывно бороться. Его глубоко возмущало привилегированное положение иностранцев. Но несмотря на все его представления горному департаменту о ненужности иностранных мастеров в Златоусте, бо́льшая часть льгот для них сохранилась вплоть до отмены крепостного права.

Деятельность Аносова в Златоусте представляет исключительное явление в истории казенных заводов. Несмотря на тяжелое бремя расходов по содержанию иностранных нахлебников (свыше 196000 руб.

---

[1] Данилевский В. В., „Русская техника", 1949, стр. 94.

[2] Точный год рождения П. П. Аносова не установлен. Наиболее подробные данные о биографии П. П. Аносова имеются в статье Н. Я. Нестеровского „Материалы к биографии П. П. Аносова", „Горный журнал", т. I и II, 1918, стр. 64—153. См. также „Русский биографический словарь", т. II, стр. 203—204; некролог в „СПБ ведомостях" № 169, 1851; Бурмакин А. С. „Горный журнал", т. III, № 10 и 11, 1912; сборник „Великий русский металлург П. П. Аносов", Челябинск, 1949.

Библиотека Павлодар. политехн. Библиотека Политехн. Механическ. 18227

в год), несмотря на неблагоприятные условия крепостного режима, Златоустовские заводы под управлением П. П. Аносова начали работать рентабельно. В течение двух лет (1838—1839 гг.) было получено против штатных цен свыше 180 000 руб. экономии. В лице П. П. Аносова сочетались блестящий административный талант и гениальность техника и ученого. В тяжелое время крепостного бесправия он выделялся в толпе горных чиновников своим сердечным и внимательным отношением к рабочим. Общая признательность и любовь выразилась особенно ярко при проводах П. П. Аносова в Сибирь, когда он уезжал навсегда из Златоуста. По воспоминаниям современников, провожать его собралось все население Златоуста. Площадь перед заводом была запружена народом. Рабочие выпрягли лошадей и сами везли его экипаж далеко за город. Почти все они плакали, плакал и сам П. П. Аносов.

Научно-техническая деятельность П. П. Аносова была чрезвычайно разносторонней. Он работал в области геологии, горного дела, металлургии стали и золота, термической обработке металлов и по другим вопросам. Первая работа П. П. Аносова „Систематическое описание горного и заводского производства Златоустовского завода" была выполнена в 1819 г. В области геологии первый его труд был опубликован в 1826 г. под названием „Геогностические наблюдения над Уральскими горами, лежащими в округе Златоустовских заводов" [1]. Продолжение этой работы было опубликовано в 1834 г. под заголовком „Геогностические наблюдения в округе Златоустовских заводов и в местах, прилежащих к оным" [2]. По поводу этих работ известный геолог проф. И. В. Мушкетов писал: „Первые геогностические статьи по геологии Златоустовского округа принадлежат горному инженеру г. Аносову. Он первый дает сколько-нибудь общий и детальный очерк строения этой части Урала... П. П. Аносов первый представил геологический разрез Урала от Златоуста до Миасс [3]. В статье „Об Уральском корунде" [4] Аносов сообщил о новом месторождении корунда, который с успехом заменил импортный наждак, применявшийся для полировки оружия. В 1834 г. П. П. Аносов открыл богатую золотосодержащую россыпь между Миасским и Кыштымскими заводами (Андреевский рудник), где были найдены три крупных золотых самородка весом от 2,5 до 6,5 фунт. П. П. Аносов вместе с горным инженером И. Р. Лисенко обнаружили золото в известняке Миасских промыслов. На тех же промыслах в период, когда Аносов был горным начальником, найден золотой самородок-гигант весом 2 пуда 7 фунт. 92 зол., который был передан в музей Горного института [5].

---

[1] „Горный журнал" № 5, 1826.

[2] „Горный журнал" № 1 и 2, 1834.

[3] Мушкетов, И. В., „Горный журнал", 1877, ч. III, кн. 8–9, стр. 231 и ч. IV, кн. 10, стр. 51.

[4] „Горный журнал" № 1, 1829.

[5] Озерский А. Д., Описание золотой самородки-исполина, „Горный журнал" № 8, 1843.

В области горного дела П. П. Аносов ввел ряд усовершенствований и изобретений. Он впервые разработал наиболее рациональные принципы промывки золотосодержащих песков. На основании этих принципов он сконструировал золотопромывательные машины, давшие по сравнению с ранее существовавшими устройствами большую производительность, большую экономию и значительное уменьшение сноса золота. Одна из этих машин, названная П. П. Аносовым „золотопромывательной мельницей“ [1], давала потерю золота в откидных песках в 5 раз меньше, чем при других способах, причем промывка 100 пуд. песка при помощи этой машины обходилась $14^3/_4$ коп. против $20^1/_2$ коп., затрачивавшихся ранее.

Аносов не ограничился усовершенствованием методов отмывки золота из песков. Он поставил себе также более широкую задачу. В течение нескольких лет он проводил систематическое исследование содержания золота в песках и убедился, что путем промывки всеми известными способами добывается в лучшем случае только $^1/_{131}$ часть общего содержания золота. Отсюда он сделал вывод, что необходимо коренное изменение способа выделения золота из песков. Он провел ряд изысканий, в результате которых появляется совершенно новый метод обработки золотоносных песков [2]. П. П. Аносов предложил производить восстановительную плавку песков с целью получения чугуна из окислов железа, содержащихся в песках. При этом происходило растворение золота в чугуне, который далее обрабатывался серной кислотой. Плавка производилась при первых опытах в тиглях, затем в доменной печи, а также в медеплавильных шахтных печах. По способу Аносова из 100 пуд. песка получалось $37^1/_2$ золотников золота, а при промывке обычным способом — 32 доли, т. е. в 95 раз меньше. Несмотря на большие перспективы, из-за косности и неповоротливости чиновников того времени способ добывания золота, предложенный Аносовым, не получил развития после его отъезда из Златоуста.

Наиболее ярко талант П. П. Аносова как инженера и ученого выявился в его трудах по производству и обработке стали и стальных изделий. В этой области Аносов значительно превзошел своих современников. Его труды положили начало научной металлографии и послужили основой развития сталелитейной промышленности в России. Чтобы решить задачу получения качественной литой стали, как указывает П. П. Аносов, „нужно было прокладывать новый путь“. Ему пришлось решать последовательно ряд вопросов:

1) сконструировать и построить печь для плавки;

2) произвести изыскание материалов и изготовить огнеупорные тигли;

---

[1] „Описание золотопромывательной машины, устроенной на Миасских золотых промыслах Корпуса горных инженеров генерал-майором Аносовым“, „Горный журнал“ № 9, 1846. См. также „О золотопромывательных машинах, устроенных на Миасских золотых промыслах“, „Горный журнал“, № 3, 1841.

[2] „Об изобретенном полковником Аносовым способе обрабатывать золотосодержащие пески плавкою“, „Горный журнал“ № 7, 1837.

3) установить влияние шихтовых материалов на свойства стали;
4) разработать методы плавки.

Каждая из этих задач представляла в те времена чрезвычайные трудности. Однако П. П. Аносов блестяще с ними справился.

В „Горном журнале“ в 1837 г. появляется его статья „О приготовлении литой стали“ [1]. В этой статье дается технология плавки стали и описание конструкции печей. Сообщается также подробная технология изготовления огнеупорных тиглей из местных материалов. Тигли, изготовленные Аносовым, обходились 44 коп. за штуку, а по огнеупорности они значительно превосходили импортные пассауские стоимостью 25 руб. Следует отметить, что эти тигли Аносов с успехом использовал не только для плавки стали, но и для плавки золота.

Примененные Аносовым конструкции печей и методы плавки стали отличались оригинальностью. Описание его способов плавки долгое время служило руководством для заводских работников и вошло в учебники металлургии.

П. П. Аносов создал методы плавки стали, основанные на взаимодействии между шлаком и металлом, а также впервые применил цементацию (насыщение углеродом) стали при плавке в газообразной среде. Сталь он получал также непосредственно из руды сплавлением ее с углем и графитом. Следовательно, П. П. Аносов является основоположником металлургии литой стали. Златоустовская литая сталь значительно превосходила английскую и быстро завоевала мировую славу.

П. П. Аносов занимался также улучшением производства кос, применяя для их изготовления литую сталь. Он разработал метод закалки кос при помощи сжатого воздуха [2]. Высокое качество стали и мягкая закалка давали косам после отбивки чрезвычайную стойкость. Косы Аносова выдерживали неоднократно самые жесткие испытания. Например, этими косами косили „березовую поросль и ни одна коса, бывшая на пробе, не сломилась, а ломались только деревянные косьевища. При сей усиленной пробе перерубаемы были деревья в $1^1/_2$ и 2 дюйма толщиной“ [3]. За усовершенствование выделки кос на Артинском заводе Московское общество сельского хозяйства в 1838 г. присудило П. П. Аносову золотую медаль.

Самая значительная работа П. П. Аносова, которая продолжалась с 1828 по 1837 г., т. е. свыше 9 лет, была опубликована в 1841 г. в „Горном журнале“ под названием „О булатах“ [4]. Эта работа посвящена разгадке тайны древнего Востока по производству знаменитых клинков из булатной, или, как часто говорят, дамасской стали. Труд Аносова затем был издан в том же году отдельно в двух

---

[1] „Горный журнал“ № 1, 1837, стр. 75—102.

[2] „Описание нового способа закалки стали сгущенным воздухом“, „Горный журнал“ № 8, 1827. Об опытах закалки стальных вещей в сгущенном воздухе, произведенных в 1828 и 1829 гг.“; „Горный журнал“ № 10, 1829.

[3] Аносов П. П., Два письма к правителю дел Московского общества сельского хозяйства, „Земледельческий журнал“ № 1, 1837, стр. 158.

[4] „Горный журнал“, ч. 1, кн. 2, 1841.

О БУЛАТАХЪ

СОЧИНЕНІЕ

Корпуса Горныхъ Инженеровъ Генералъ-Маіора Аносова

СОДЕРЖАЩЕЕ

Описаніе опытовъ, предпринятыхъ для полученія булатовъ; понятіе, пріобрѣтенное изъ сихъ опытовъ, о различіи булатовъ отъ стали, и открытіе самыхъ способовъ приготовленія ихъ.

въ двухъ книгахъ.

САНКТПЕТЕРБУРГЪ.

Въ типографіи И. Глазунова и К°.

1841.

Фиг. 1. Титульный лист отдельного издания книги Аносова „О булатах".

книгах. На титульном листе первой книги (фиг. 1) напечатано: „О булатах. Сочинение Корпуса горных инженеров генерал-майора Аносова, содержащее описание опытов, предпринятых для получения булатов; понятие, приобретенное из сих опытов, о различии булатов от стали, и открытие самых способов приготовления их, в двух книгах. Санкт-Петербург. 1841.“ Вторая книга имеет следующее заглавие: „Приложение к сочинению о булатах Корпуса горных инженеров генерал-майора Аносова, содержащее журнал опытам с 1828 по 1839 год с краткими замечаниями. Книга вторая. Златоуст. 1841 года“ [1] (фиг. 2).

„Под словом булат каждый россиянин привык понимать металл более твердый и острый, нежели обыкновенная сталь,— пишет Аносов в своей книге,— Наши поэты, и древние и новейшие, вооружают своих героев мечами булатными: в песне о полку Игореве, сочиненной еще в XII веке, между прочим видим, что воины Всеволода с булатными мечами поражали половцев; кому неизвестно также поэтическое сравнение золота с булатом Пушкина“ [2]. Булатная сталь отличается следующей особенностью: на ее поверхности имеется особый узор. Как указывает Аносов, этот узор на некоторых булатах виден „непосредственно после полировки, а на других не прежде, как поверхность ее подвергнется действию какой-либо слабой кислоты. Сок растений или уксус, приготовляемый из пива, может заменить кислоту“ [3]. Узоры на стали могут быть весьма различные. Но не всякая сталь с узорами может быть названа булатом. Чрезвычайно высокая ценность булатов вызвала многочисленные подделки. Например, в Западной Европе узор часто получали путем разрисовки и травления поверхности стали. Такие булаты Аносов называет „ложными“. „Но как бы тщательно они сделаны ни были, опытный глаз не затруднится распознать искусство, не зависящее от свойства стали“ [4].

„Другой род булатов имеет, хотя и искусственные узоры, но заключающиеся в самом металле, так что сколько бы раз ни повторять полировки и вытравки, они снова появляются“. Эти булаты Аносов называет „искусственными“ или „сварочными“. Они получаются через многократную сварку кусков разной стали. Достоинство этих булатов может быть разное и зависит от исходных материалов и искусства мастеров. Такие булаты изготовлялись на Востоке и в Европе. Однако, по мнению Аносова, европейские булаты не отличаются высоким качеством, так как европейские мастера обращали внимание на образование узоров, но не на улучшение свойств стали.

---

[1] Есть основание считать, что обе книги изданы в Петербурге. Надпись „Златоуст“ означает, что опыты производились в Златоусте. При сличении статьи в „Горном журнале“ с отдельным изданием обнаружилось полное совпадение текста, шрифта и расположения печатных знаков. Отдельное издание вышло в той же типографии Глазунова, в которой печатался „Горный журнал“ в 1841 г. (о чем имеется пометка на титульном листе первой книги). Следовательно, отдельное издание является оттиском из журнала.

[2] Стр. 38 настоящей книги.

[3] См. стр. 40 настоящей книги.

[4] Там же

ПРИЛОЖЕНІЕ

КЪ

СОЧИНЕНІЮ О БУЛАТАХЪ

Корпуса Горныхъ Инженеровъ Генералъ-Маіора Аносова

СОДЕРЖАЩЕЕ ЖУРНАЛЪ ОПЫТАМЪ СЪ 1828 ПО 1839 ГОДЪ СЪ КРАТКИМИ ЗАМѢЧАНІЯМИ.

КНИГА ВТОРАЯ

ЗЛАТОУСТЪ.

1841 года

Фиг. 2. Титульный лист приложения (журнала опытов) к книге Аносова о булатах.

„Настоящий булат отличается от сварочного неподражаемым для искусства расположением узоров, происходящих от состава металла". В своей работе Аносов устанавливает, что эти узоры получаются при кристаллизации литой стали, причем узор видоизменяется в зависимости от условий дальнейшей ковки. „В литом булате,— писал впоследствии гениальный русский ученый Д. К. Чернов,— узор по всей длине клинка имеет один и тот же характер, но никогда не повторяется". Наоборот, узор сварочного булата повторяется, как, например, на обоях или материях. Для иллюстрации на фиг. 3 показаны снимки узоров настоящих (из литой стали) булатов и сварочных из коллекции, хранящейся в ленинградском Государственном Эрмитаже[1].

Достоинства булатов, указывает Аносов, оценивают по узору, по цвету грунта или промежутка между узорами и по отливу поверхности при косвенном направлении лучей света. Чем крупнее узор, тем выше достоинство металла. Крупный узор состоит из полос, толщиной с нотный знак; средний — не толще обыкновенного письма, мелкий можно заметить невооруженным глазом. Грунт бывает серый, бурый или черный. „Чем он темнее, тем выше достоинство булата. Иные булаты не имеют отлива, другие отливают красноватым, а иные золотистым цветом". Наилучший — золотистый. Худшие булаты имеют продольные узоры. Лучшие — имеют более сложные рисунки с кривыми линиями, образующими узоры, напоминающие мелкую зыбь, шелковую сеть или виноградные гроздья; эти рисунки резко отличаются от более темного фона.

По виду узоров Аносов различает пять сортов булата: полосатый, струистый, волнистый, сетчатый и коленчатый. Последнее название соответствует узору в виде волнистых линий, изгибающихся поперек клинка и разделяющих его поверхность на части, т. е. на колена.

По имеющимся сведениям производство булатов в древности существовало в Индии. Железоделательное производство в Индии было на высоком уровне еще за 1500 лет до нашей эры. Имеются данные, что там изготовлялись[2] слитки стали в форме небольших хлебцев. Эта сталь была известна под названием „вутц". Слитки частью перерабатывались на изделия, а частью вывозились в непереработанном виде в другие страны. Об этом имеется ряд указаний в рукописях арабских писателей XIII в., а также в древних русских документах. Так, в статейном списке князя Звенигородского, бывшего послом в Персии у шаха Аббаса, сказано: „А говорил Шах: шеломы, и шапки, и зерцала делаются в нашем государстве (т. е. в Персии — *Д. Н.*), а булат хороший красный выходит в наше государство из Индийского государства"[3]. Индия долгое время снабжала восточные страны, а именно Персию, Сирию, Аравию, Египет и др., сырьем для изго-

---

[1] Эти снимки заимствованы из статьи Э. Ленца „Булаты", Государственный Эрмитаж, Сборник, вып. II, Петербург 1923, стр. 73.

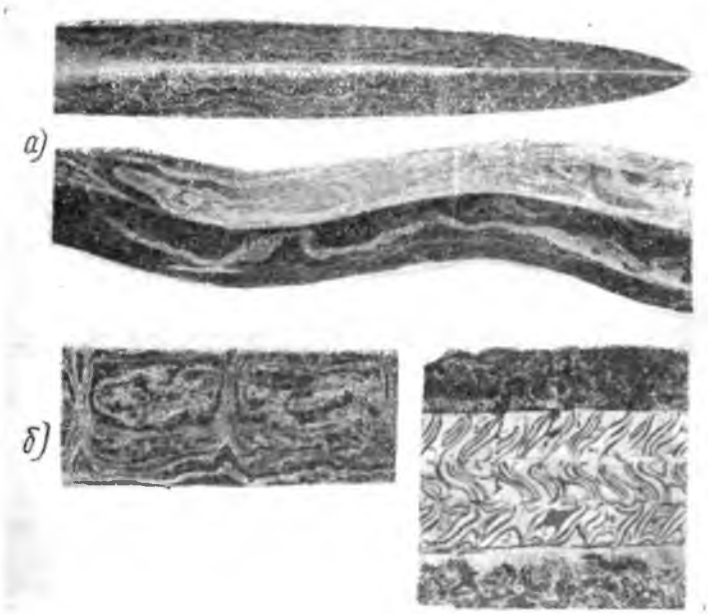
[2] Железнов В. Ф., Исторические сведения о булате в России, прилож. к кн. Н. Т. Беляева „О булатах", СПБ 1906.

[3] Там же

товления булатов. Постепенно в этих странах возникло и достигло высокого уровня производство оружия из булатной стали.

После прихода англичан, превративших Индию в свою колонию, производство литой индийской стали прекратилось, так как она (сталь) конкурировала с английской сталью.

В средние века получило известность производство оружия из булатной стали в Дамаске, откуда произошло название „дамасская сталь". С высоким качеством этой стали в Западной Европе познакомились в период крестовых походов. В романе Вальтер-Скотта



Фиг. 3. Булатное оружие из коллекции Ленинградского Государственного Эрмитажа:

а — настоящие булаты; *б* — сварочные булаты.

„Ричард Львиное Сердце" упоминается о соревновании между английским королем и арабским султаном Саладином, который оказался победителем, перерубив в воздухе саблей из дамасской стали платок из тончайшей шелковой материи. Производство оружия в Дамаске прекратилось в XIV в., после покорения Сирии Тамерланом (Темир-Лангом), который вывез всех мастеров в Самарканд.

До нашего времени дошли около 30 названий разных сортов древнего булата. Эти названия не дают какого-либо систематического деления. Некоторые из них указывают на происхождение булатов по географическому признаку. Таковы названия: хорасан (провинция в Персии), шам (турецкое название Сирии), кармани, гынды и т. д. Другие

указывают на внешние признаки, например табан (блестящий), кара-табан (черно-блестящий), нейрис (светящийся). Лучшие булаты, по мнению Аносова, — табан, кара-табан, кара-хорасан, худшие — шам.

Сведения о булатах имеются в ряде древнейших русских литературных памятников и документов. Но до конца XV в. вместо слова „булат" применялось название „харалуг". Например, в „Слове о полку Игореве" сказано: „Яр туре Всеволодіе... гремеши о шеломы мечи харалужными... Половцы... главы свои поклонише под тыи мечи харалужныя". Слово „булат" появляется в документах, относящихся к началу XVI в. Так, в духовной грамоте князей Высоцких упоминается в числе прочей „рухляди" „одна сабля булатная гирейская" (1504 г.). В описи 1613 г. „поминкам" (т. е. подаркам), поднесенным русскому царю персидским посольством, перечислены сабли булатные „кашанские, ширясские и казабашские".

Имеются документы, доказывающие, что в Москве существовало производство булатов. Так, в 1616 г. оружейный мастер Дмитрий Коновалов выковал зерцало из булата. Другой мастер Богдан Ипатьев делал ножи булатные. В документах этого периода часто встречаются выражения: „сабельные полосы, булат синей, московский выков", „сабля полоса русская с долами на булатное дело"[1] и т. д. Это показывает, что в первой половине XVII в. производство булата было достаточно развито. К концу XVII в. это искусство, очевидно, пришло в упадок. Однако царь Алексей Михайлович вновь делает попытку возродить производство булатов в Москве. Для этого царь посылает с нарочным трех мальчиков в Астрахань „для учения булатных сабельных полос и пансырного дела" при грамоте от 30 июня 1660 г[2]. В следующем 1661 г. царь поручает астраханскому воеводе раздобыть и прислать в Москву „черкас пансырного дела сварщиков самых добрых мастеров, да булатного сабельного дела сварщиков самых добрых мастеров". Во всяком случае в дальнейшем производство булатов не развилось и заглохло. Однако интерес к булатной стали в XVIII и XIX вв. в России и Европе не исчез.

В 1820 г. путешественник Скотт доставил в Лондон несколько образцов индийского булата вутц. Известный ученый Фарадей, сделав

---

[1] Железнов В. Ф., см. выше.

[2] Приводим текст этого любопытного документа:

„От царя и Великого князя Алексея Михайловича, всея Великия и Белыя России Самодержца в нашу отчизну в Астрахань, боярину и воеводам нашим князю Григорию Сунталеевичу Черкасскому да окольничему Василию Семеновичу Волконскому, да стольнику Ондрею Яковлевичу Дашкову, да дьякам нашим Павлу Симоновскому, да Петру Ковелину.

По нашему Великого Государя указу посланы в Астрахань с астраханцем с Иваном Исаковым, робята Полотцка города Анисимко Миколаев, Гришка Стасенков, Виленского города Крыштопко Григорьев, для учения булатных сабельных полос и пансырного дела, а в дорогу дано им нашего жалованья, по десяти рублев человеку; и как к вам ся наша Великого Государя грамота придет, а астраханец Иван Исаков тех робят Анисимка Миколаева с товарищи, трех человек в Астрахань привезет и вы б тех робят велели у того Ивана принять, а для учения сабельных булатных полос и пансырного дела велели тем их мастерам и ученикам, и которые из Астраханских робят по-

анализ и обнаружив в стали присутствие алюминия, предположил, что свойства булата приобретаются благодаря влиянию алюминия. Он сплавил смесь железа, алюминия и стали и получил металл с узорами, который он назвал искусственным вутцем. Однако он не проверил его свойств. Кроме того, Фарадей пробовал сплавлять сталь с платиной и серебром. Он также получил при этом узоры, которые, впрочем, не совпадали с рисунком истинного булата. Впоследствие выяснилось, что Фарадей ошибся. Аносов доказал, что введение алюминия, платины и серебра не дает заметного улучшения свойств стали.

Так же неудачно пытались воспроизвести булат Бреан во Франции и Кривелли в Италии.

Работа П. П. Аносова по булатной стали, порученная ему Горным ведомством по указанию министра финансов Канкрина, продолжалась свыше 9 лет. Прежде всего следует отметить, что все его опыты отличались исключительной последовательностью. Они все точно зафиксированы в журнале, который издан в качестве приложения к его статье. Всего было сделано 185 опытов.

Сначала эта работа ему казалась „маловажной", но после ознакомления с образцами древних булатов, имевшихся в частных и государственных собраниях[1], П. П. Аносов убедился, что высокие качества булатов не являются легендой и соответствуют действительности. Делая различные испытания, он установил, что характер узора связан со свойствами клинка, что также подтвердило сведения, дошедшие с древних времен. Это так заинтересовало Аносова, что он с тех пор „принял намерение опытами доискиваться тайны приготовления булатов".

Первый этап работы Аносова заключался в подготовке устройства для получения литой стали. Прокладывая новый путь, так как никаких указаний и сведений у него не было, он потратил свыше года для того, чтобы можно было организовать в местных условиях выплавку литой стали. В 1828 г. начинаются опыты плавки стали из различных шихтовых материалов. После нескольких неудач Аносов по-

---

хотят учиться, давать нашего жалованья, поденного корму, по сему нашему Великого Государя указу, а мастерам их велели б есте сказать наш Великого Государя милостивый указ, что б они тех робят выучили своему мастерству доброму, и открыли дела свои к учению явно, и не в чем бы они в делах своих не скрылись, а как они тех робят выучат, а им мастерам за то ученье будет наша Великого Государя милость; а как те ученики тому мастерству выучатся и вы б их прислали к Москве, с кем пригоже, да о том к нам Великому Государю отписали и велели отписку подать и тех учеников объявить в Приказе Казанского дворца, боярину нашему князю Алексею Никитичу Трубецкому, да дьякам нашим думному Лариону Лопухину, да Федору Грибоедову, да Ивану Патрикееву.

Писан на Москве лета 7168 (1660 г.) июня в 30 день".

„Акты Исторические", т. 4, № 147. Цитируется по Железнову В. Ф., Исторические сведения о булате в России, прилож. к кн. Н. Т. Беляева „О булатах", СПБ, 1906.

[1] С образцами древних булатов П. П. Аносов имел возможность ознакомиться у оренбургского военного губернатора В. А. Перовского, который обладал богатой коллекцией азиатского оружия.

лучает качественную литую сталь. Вначале (опыты № 10, 13, 14, 18) он проверил опыты Фарадея по введению платины в сталь. Эти опыты показали, что платинистая сталь имеет узоры, но „расположение их было очевидно различно от булатов". При сравнении платинистой стали с обычной углеродистой обнаружилось, что последняя „при большой твердости столь же удобно куется", т. е. имеет такую же пластичность. Следовательно, введение платины не достигает цели. Далее Аносов приходит к выводу о необходимости произвести исследование влияния на сталь различных элементов, чтобы установить связь между свойствами и составом стали. Таким образом, Аносов впервые в мире проводит систематическую работу по изучению влияния примесей на твердость и другие свойства стали. Он применяет различные флюсы, правильно предполагая, что при плавке происходит взаимодействие шлака с расплавленным металлом. Он устанавливает, что изменение состава шлака, содержащего различные количества глинозема, кремнезема и магнезии, влияет на структуру, т. е. на узоры в стали, которые по мнению Аносова есть результат „кристаллования". Он приходит к выводу, что чем больше содержится указанных примесей, тем явственней узоры. Далее производится большая серия опытов с введением в сталь марганца, хрома, титана, серебра и золота. Следующая серия опытов посвящается влиянию качества железа, вводимого в шихту. Так как железо различных сортов содержит разное количество примесей, то, как Аносов и ожидал, получилось, что более чистое железо, в особенности по содержанию серы, дает после сплавления более качественную сталь.

Обширную серию опытов Аносов производит по различным методам введения углерода в сталь. Он вводит углерод добавлением в шихту различных пород дерева, цветов, муки, голландской сажи, пшена, рога, чугуна, алмаза и графита. Кроме того, углерод вводился из газообразной среды в процессе плавления стали, для чего тигли нагревались с открытой крышкой.

Чрезвычайный интерес представляет методика исследования, примененная П. П. Аносовым при проведении всех указанных опытов. Его метод заключался в установлении взаимной связи между структурой и свойствами металлов. П. П. Аносов впервые применил, по нынешней терминологии, макроскопический и микроскопический методы исследования.

Так как узоры на поверхности стали отражают условия „кристаллования", то они, т. е. структура стали, должны характеризовать свойства стали, начиная с отливки. Он пишет, что „наружные признаки (т. е. узоры) есть следствие химического состава и тех физических условий, которые более или менеее благоприятствуют к принятию определенного вида, данного природой каждому роду тел". Он изучает структуру (узоры) на поверхности „сплавка", т. е. слитка. „Они еще явственней обнаруживаются на шлаке, покрывающем его, так что по одному шлаку довольно верно можно судить о качестве металла". Следовательно, начальная структура слитка и шлака сказывается на поведении металла при дальнейшей обработке. Аносов

№	Смѣшенія.	Вѣсъ фун.	Время плавки. час.	Время плавки. мин.	Замѣчанія.
					держиваютъ 3 и 4 пилы, въ полировкѣ чиста, грунтъ бурый. Узоры едва примѣтны въ микроскопъ.
69	Сталеватаго, но проварнаго желѣза.	40	4	26	Ковалась хорошо; въ изломѣ сѣраго цвѣта; въ закалкѣ тверда; пробная полоска выдержала 8-мь оборотовъ. Зубила стойки, но нѣсколько выкрашиваются. Въ полировкѣ чиста; грунтъ свѣтло-бурый. Узоры мѣстами примѣтны. Сталь нѣсколько тверже предъидущей
70	Навивнаго желѣза	40	5	—	Въ ковкѣ мягка; въ изломѣ бѣлѣе предъидущей; въ закалкѣ тверда. Пробная полоска выдержала 9 оборотовъ.

Фиг. 4. Страница из журнала опытов Аносова.

изучает эту структуру невооруженным глазом (макроскопический метод), а также первым в мире при помощи микроскопа (микроскопический метод). Он применяет микроскоп для исследования стали[1], а также шлака[2]. Следует отметить, что приоритет первого применения микроскопа для металлографического исследования часто неправильно приписывают англичанину Сорби, который сделал это в 1863 г., т. е. на 30 лет позже Аносова.

Далее Аносов устанавливает, что структура металла изменяется при отжиге и ковке. Он не ограничивается изучением поверхности, а занимается также исследованием излома стали. Изучая влияние отжига, проведенного в условиях доступа воздуха, он устанавливает „в изломе каждого бруска зернистую оболочку, потерявшую первоначальную твердость". Отсюда Аносов делает вывод, что произошло уменьшение содержания углерода в поверхностном слое стали, т. е. обезуглероживание. Отжиг в герметически закрытых ящиках этого недостатка не обнаружил.

Применяя свой метод, Аносов сделал из своих опытов ряд важных выводов. Остановимся на основных из них.

1. П. П. Аносов установил, что из всех элементов только углерод является существенным фактором, вызывающим повышение твердости готовых изделий, т. е. закаленной стали. Все остальные элементы играют в этом отношении второстепенную роль. Этот же вывод был сделан американцами Барнсом, Муром и Арчером в 1938 г., т. е. на 100 лет позже Аносова.

2. Для получения высокой пластичности в стали необходимо производить плавку по возможности из чистых материалов. Для получения наиболее качественной стали, т. е. булата, лучше всего производить сплавление железа с очень чистым графитом, ибо при этом гарантируется отсутствие в стали серы и других вредных примесей.

Кстати, Аносову пришлось сделать специальные геологические изыскания, чтобы найти на Урале графит достаточной чистоты.

3. П. П. Аносов установил, что введение в сталь серебра сообщает ей антикоррозионные свойства. Таким образом была изготовлена нержавеющая сталь. Как показал Аносов, некоторые другие примеси, наоборот, усиливают коррозию.

4. П. П. Аносов установил, что нижняя часть слитка имеет более высокие свойства, чем верхняя. Поэтому режущая кромка оружия должна делаться из нижней части слитка.

5. Замедление скорости охлаждения слитка способствует развитию кристаллов, поэтому узоры делаются более крупными. В том же направлении сказывается длительный отжиг.

6. Твердая сталь, назначенная для булатов, должна отжигаться при сравнительно низкой температуре. Это вполне правильно и соответствует нашим современным представлениям.

---

[1] См. текст статьи „О булатах", раздел 8 и опыты № 68, 74 и 75, стр. 49, 91 и 92 настоящей книги.

[2] См. раздел 12 „О наружных признаках булата", стр. 64 настоящей книги.

7. Существенное влияние на свойства булата имеет ковка. Последняя должна производиться при сравнительно низких температурах — не выше „мясокрасного“ цвета.

Далее П. П. Аносов дает подробное описание закалки и отпуска стали. Он пишет:

„Оружие всякого рода достаточно закаливать в сале, предварительно нагретом до точки кипения, ибо дознано из опытов, что в горячем сале закалка бывает тверже; в сем случае сало, имея более жидкости и скорей обращаясь около погруженной в него накаленной вещи, скорей ее охлаждает.

Нагрев откованную вещь докрасна, погружают ее в горячее сало и, дав ей время остыть, вынимают, обтирают и с одной стороны вычищают точильным камнем для удобнейшего наблюдения за цветом отпуска. Потом снова немного нагревают над углями и наблюдают за появлением цветов отпуска. Например, при закалке сабельного клинка, у ручки отпускают до зеленого цвета, у конца — до синего, а в средине до фиолетового, стараясь, чтобы у лезвия оставался желтый цвет“ [1].

Здесь можно отметить, что Аносов уже в 30-х годах XIX в. применил закалку в горячей среде, опередив таким образом на 100 лет американца Льюиса, которому часто неправильно приписывают приоритет открытия этого способа закалки.

Далее Аносов дает точные указания о способах шлифовки, полировки и травления клинков.

В результате правильной обработки булат должен, по Аносову, обладать следующими свойствами:

1) совершенной ковкостью и тягучестью; булатную сталь можно ковать даже в холодном состоянии;

2) высокой твердостью после закалки;

3) наибольшей остротой и „нежностью“ лезвия;

4) высокой упругостью и стойкостью после закалки.

Аносов пишет, что сведения, сообщенные путешественниками о достоинствах восточных булатов, не являются преувеличенными.

„Если коленчатым или сетчатым булатом с крупными узорами и золотистым отливом перерезывают легко на воздухе газовый платок, то тут ничего нет преувеличенного: моими булатами я мог делать то же самое. Но острота изделий из английской литой стали для проведения подобной пробы недостаточна. Самое большое, чего я мог достигать клинком из английской литой стали, состоит в нарезании шелковой материи. Если булатами перерубают кости, гвозди, не повреждая лезвия, то и в этом случае есть истина“ [2].

„Шпажный клинок, из хорошего булата приготовленный, правильно выточенный и соответственно закаленный, как оказалось по моим опытам, не может быть при гнутье ни сломан, ни согнут до такой степени, чтобы потерял упругость; при обыкновенном гнутье он выскакивает и сохраняет прежний вид. А при усиленном, например, наступив

---

[1] Стр. 72 настоящей книги.
[2] Стр. 76 настоящей книги.

на конец ногой и загибая его под прямым углом, он не сломается и будучи выправлен, не потеряет прежней упругости... Это есть без сомнения предел совершенства в упругости..."[1]

„Бритва из хорошего булата, без ошибок приготовленная, выбреет по крайней мере вдвое более бород, нежели лучшая английская..."

Высокое качество булатной стали Аносова подтверждается отзывами современников.

Вот что пишет в „Горном журнале" Илимов, исследовавший булатный клинок П. П. Аносова.

„Химический состав: C — 1,131%, Si — 0,500%, Al — 0,055%, Cu — 0,300%, P — 0,014%, Ag — следы. Сумма всех примесей — 1%.

Полоска булата сгибалась без малейшего повреждения, издавала чистый и высокий звон. Отполированный и закаленный конец крошил лучшие английские зубила, тогда как отпущенный — легко принимал впечатления и отсекался чисто и ровно"[2].

В книге Ф. Сиско „Современная металлургия", вышедшей в Нью-Йорке в 1945 г. (последнее издание), имеется снимок кинжала. Автор пишет, что на фотографии показан кинжал из дамасской стали, и поясняет, что он изготовлен путем сварки и проковки нескольких кусков стали. Однако, если повернуть снимок на 180°, то на кинжале можно ясно прочитать клеймо: „Златоустъ Оружейн. фабрика" (фиг. 5).

Сиско спутал дамасскую сталь со златоустовским булатом.

Работы П. П. Аносова имели значительное влияние на производство качественной стали в России и развитие научной мысли в этой области. Его труды стали широко известны. Они были переведены и изданы на иностранных языках[3].

Благодаря работам Аносова качество уральской инструментальной стали поднялось на чрезвычайную высоту и значительно превзошло качество английской стали.

Имеются сведения, что П. П. Аносов еще в одном отношении превзошел своих современников. Он сделал первую попытку отлить стальное орудие. Ему не удалось довести свое начинание до конца вследствие отъезда из Златоуста[4]. Эта работа была продолжена впоследствии горным инженером П. М. Обуховым, который в 1854 г. начал работать в Златоусте на должности управителя Оружейной фабрики и в 1859 г. приступил к изготовлению пушек из литой стали.

Современники высоко оценили деятельность П. П. Аносова. Совет Казанского университета на заседании 6 ноября 1843 г. „за отличное усердие к распространению естественных наук" присудил ему звание члена-корреспондента Казанского университета (диплом от 7 марта

---

[1] Стр. 76 настоящей книги.

[2] „Горный журнал" № 4, 1841.

[3] На французском языке — „Annuare du Journal des mines de Russie", 1843, на немецком — Erman, „Archiv für das wissenschaftlichekunde von Russland, B. 9, 3, 510.

[4] См. Нессельштраус Г. З., Сборник „Д. К. Чернов и наука о металлах", Металлургиздат, 1950.

Фиг. 5. Булатный кинжал, изготовленный на Златоустовской оружейной фабрике. Кинжал изображен на фоне, представляющем увеличенное изображение узора поверхности клинка.

1844 г.). Совет Харьковского университета, „уважая отличные заслуги по усовершенствованию горнозаводской техники и за ученые открытия по металлургии“, присудил ему 24 января 1846 г. звание почетного члена университета.

Взгляды П. П. Аносова на металлы как на тела кристаллические и установление связи между условиями кристаллизации и свойствами сплавов получили широкое распространение и были в дальнейшем развиты в работах гениального ученого Д. К. Чернова и целого ряда других русских и советских исследователей.

Дальнейшее развитие производства литой стали в Златоусте было осуществлено П. М. Обуховым, Н. В. Калакуцким и А. С. Лавровым.

Применение микроскопа для изучения структуры металлов и улучшение способов термической обработки стали, введенные Аносовым, дали значительный толчок к повышению качества стали и развитию научных методов контроля свойств металла.

Высокие качества булатов П. П. Аносова привлекли внимание ряда исследователей. Изучением булатной стали занимался Д. К. Чернов, который писал, что „самая лучшая сталь, какую когда-либо, где-либо делали, есть, без сомнения, булат“ [1]. Чернов повторил опыты Аносова и изготовил несколько клинков булатной стали. По мнению Д. К. Чернова узоры являются результатом дендритной ликвации. „В момент кристаллизации происходит нарушение однородности состава; оси кристаллов бросаются веществом, выделенным из общего состава и обладающим другими свойствами против окружающего их металла; вещество, не участвующее в бросании осей, обволакивает эти оси сейчас же, как только они образовались, и отлагается на них некоторым слоем“ [2].

Далее этим же вопросом занимались Н. И. Беляев [3], А. П. Виноградов [4] и др. Все эти работы посвящены главным образом происхождению узора в булатах. По этому поводу высказывались различные мнения. Большинство считает, что булатные узоры являются результатом дендритной ликвации. Однако проф. Виноградов полагает, что узоры являются результатом неоднородности стали вследствие недостаточно высокой температуры и неполного расплавления металла. Это мнение он подтверждает полученными им узорами при неполном расплавлении и последующей ковке стали. Это мнение мы считаем неправильным, так как вопрос вовсе не в узорах, которые являются вторичным признаком. Основное — это высокое качество стали. Сам Аносов считал узоры только признаком, т. е. удобным методом контроля. Кроме того, если в опытах Аносова температура могла быть

---

[1] Чернов Д. К., Критический обзор статей гг. Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д. К. Чернова исследования по этому предмету, „Записки Русского технического общества, 1868, стр. 399.

[2] Чернов Д. К., Сталелитейное дело. СПБ, 1898.

[3] Беляев Н. И., О булате „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, 1911.

[4] Виноградов А. П., Происхождение булатного узора, „Технико-экономический вестник“, № 8—9, 1924, стр. 661.

недостаточно высокой, то в опытах Чернова она уже была во всяком случае вполне достаточной.

Все остальные авторы считают, что узоры являются результатом ликвации и последующей ковки. Остался только спорный вопрос: почему получаются два резко различных цвета на узоре и грунте? По мнению А. Л. Бабошина[1] светлая окраска получается в тех местах, где сосредоточены скопления избыточного цементита, имеющегося в заэвтектоидной стали. Это мнение, вероятно, правильно, так как оно хорошо подтверждается тем, что узоры исчезают, если нагрев при ковке был слишком высоким. Тогда цементит растворяется в аустените, и при обратном охлаждении он выделяется на границе зерен в виде сетки. В этом случае сталь будет испорчена, что и наблюдал Аносов. По мнению Н. И. Беляева высокие качества булата связаны с перепутыванием волокон при ковке, этим и создаются узоры.

На основании всех этих исследований можно думать, что высокие свойства булатов связаны с чрезвычайной раздробленностью избыточного цементита благодаря низкой температуре ковки. Характерно, что отжиг и закалку Аносов производил при низкой температуре нагрева. Тогда сталь должна иметь структуру мелкозернистого цементита на фоне отпущенного троосто-мартенсита, чем объясняются высокие свойства булата. Однако все-таки мы до сих пор не имеем достаточно полного исследования этого вопроса с применением современных методов.

В 1841 г. П. П. Аносов писал:

„Оканчиваю сочинение надеждой, что скоро наши воины вооружатся булатными мечами, наши земледельцы будут обрабатывать землю булатными орудиями, наши ремесленники будут выделывать свои изделия булатными инструментами. Одним словом, я убежден, что с распространением способов приготовления и обработки булатов они вытеснят из употребления всякого рода сталь, употребляемую ныне на приготовление изделий, требующих особенной остроты и стойкости".

Мечта П. П. Аносова начала сбываться только в наши дни. Только после Великой Октябрьской социалистической революции высококачественная легированная сталь, хотя и не узорчатая, выплавленная на наших металлургических заводах, благодаря достижениям наших ученых и стахановцев, широко применяется в различных областях промышленности и сельском хозяйстве.

Уральская металлургия, основы которой заложил великий русский металлург П. П. Аносов, дает нашей стране качественный металл, который сыграл важнейшую роль на полях сражений Великой Отечественной войны 1941—1945 гг. и продолжает играть выдающуюся роль в развитии народного хозяйства Советского Союза.

---

[1] Бабошин А. Л. Металлография и термическая обработка железа стали и чугуна, 1940, стр. 259.

СПИСОК ТРУДОВ П. П. АНОСОВА

1. Аносов П. П., Систематическое описание горного и заводского производства Златоустовского завода, 1819 (рукопись).

2. Аносов П. П., Геогностические наблюдения над Уральскими горами, лежащими в округе Златоустовских заводов, „Горный журнал“ № 5, 1826, стр. 3—30.

3. Аносов П. П., Описание нового способа закалки стали в сгущенном воздухе, „Горный журнал“ № 8, 1827, стр. 85—92.

4. Аносов П. П., Об опытах закалки стальных вещей в сгущенном воздухе, произведенных в 1828 и 1829 гг., „Горный журнал“ № 10, 1829, стр. 126—131.

5. Аносов П. П., Об Уральском корунде, „Горный журнал“ № 1, 1829, стр. 131—140.

6. Аносов П. П., Геогностические наблюдения в округе Златоустовских заводов и в местах, прилежащих к оным, „Горный журнал“ № 1, 1834, стр. 1—24; № 2, стр. 149—189.

7. Аносов П. П., Два письма к правителю дел Московского общества сельского хозяйства, „Земледельческий журнал“ № 1, 1837, стр. 158.

8. Аносов П. П., Об изобретенном полковником Аносовым способе обрабатывать золотосодержащие пески плавкою, „Горный журнал“ № 7, 1837, стр. 28—39.

9. Аносов П. П., О приготовлении литой стали, „Горный журнал“ № 1, 1837, стр. 75—102.

10. Аносов П. П. О булатах, „Горный журнал“ ч. 1, кн. 2, 1841, стр. 157—317. Издано отдельно в двух книгах: „О булатах. Сочинение Корпуса горных инженеров генерал-майора Аносова, содержащее описание опытов, предпринятых для получения булатов; понятие, приобретенное из сих опытов, о различии булатов от стали, и открытие самых способов приготовления их. В двух книгах,“ СПБ. 1841; „Приложение к сочинению о булатах Корпуса горных

инженеров генерал-майора Аносова, содержащее журнал опытам с 1828 по 1839 год с краткими примечаниями. Книга вторая," Златоуст, 1941.

11. Аносов П. П., О золотопромывательных машинах, устроенных на Миасских золотых промыслах Златоустовского горного округа, „Горный журнал" № 3, 1841, стр. 357—363.

12. Аносов П. П., Описание золотопромывательной машины, устроенной на Миасских золотых промыслах Корпуса горных инженеров генерал-майором Аносовым, „Горный журнал" № 9, 1846, стр. 257—272.

О БУЛАТАХ [1]

П. П. АНОСОВ

В одной книге описаны с подробностью ход и результаты опытов, а в другой, в виде приложения к описанию, помещен краткий журнал опытов с замечаниями в хронологическом порядке, так что, читая первую книгу, можно в то же время видеть во второй и самые опыты, из которых выведены результаты. Оглавление показывает предметы, вошедшие в состав сочинения.

КНИГА ПЕРВАЯ

1) ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Под словом булат каждый россиянин привык понимать металл более твердый и острый, нежели обыкновенная сталь.

Наши поэты, и древние, и новейшие, нередко вооружают своих героев мечами булатными: в песне о полку Игореве, сочиненной еще в XII веке, между прочим видим, что воины Всеволода с булатными мечами поражали половцев; кому неизвестно также поэтическое сравнение золота с булатом Пушкина.

Все это свидетельствует, что булаты в России давно были известны, хотя искусство приготовления их никогда не существовало [2], и хотя самые признаки, по которым они различаются от стали, не были народными.

Родина булатов принадлежит востоку, и предки наши, бывшие в частых сношениях с азиатцами, от них приобретали булаты и самые познания о достоинстве их. Но прочие европейские государства знакомы с булатами едва ли не позже России; по крайней мере история железа, образцовое в свое время сочинение шведского металлурга Ринмана, достаточно может убедить, какое отдаленное понятие имела Европа о настоящих булатах лет за 55 пред сим: Ринман и его последователи полагают, что узоры, видимые на булатах, происходят от сваривания различной твердости стали и железа, и что различие узоров зависит от способов сваривания. Булат и до сих пор составляет, по моему мнению, неразгаданный металл: не только химический состав его, но и физические свойства достаточно еще не исследованы.

Поиски химиков не могли обнаружить в нем существенной разности от стали. Это зависело, впрочем, не от недостатка в тщательности разложений, но главнейшее от недостатка в самой науке. Химия, несмотря на быстрое совершенствование, не достигла еще науки точной, и многое осталось для нее тайной природы. Что неполнота науки может иногда приводить к ложным заключениям, то в отношении к булатам видно некоторым образом из опытов английского химика Фарадея, который, разлагая индийский булат, известный под именем вутца, нашел в нем присутствие алюминия и заключил, что сей металл составляет причину узоров в булате. Впоследствии будет упомянуто о влиянии алюминия на сталь.

Новейшие химики хотя оставили мнение Ринмана, допуская, что узор в азиатском булате есть следствие кристаллизации при медленном охлаждении расплавленного металла, но не могли определить зависимости свойств оного от вида и расположения самих кристаллов, несмотря на то, что не отвергают зависимости кристаллования от состава тел. Итак, если разность в кристаллизации есть вообще следствие состава тел при некоторых физических условиях, то почему же и в булате она не есть следствие той же причины? И если сталь при медленном охлаждении не получает узоров настоящего азиатского булата, то не ясно ли это доказывает, что состав булата различен от стали, а если химические разложения не обнаруживают этой разности, то остается только заключить, что они несовершенны.

Попытки металлургов и художников, старавшихся приготовить булат подобный древнему, не имели также положительных успехов. Европейских булатов высокого достоинства мне видеть не случалось, и все, что писано было об этом предмете, не заключает в себе удовлетворительных сведений, ибо ни в одном из трактатов о булате нет истинного основания — достижения совершенства в стали. Таким образом, с одной стороны недостаток химических познаний, с другой трудность приготовления хорошего булата оставляют европейцев в недоразумении относительно достоинства его.

Некоторые металлурги, упираясь на химические разложения, не хотят верить в особенное достоинство булатов. Один из первоклассных металлургов нашего времени Карстен, в сочинении о железе [1], заключает статью о булатах следующими словами: «Какую бы цену ни приписывали булату по узору, она ничего не доказывает в пользу качества металла; напротив того можно утверждать, что лучшая и наиболее однородная сталь есть именно та, которая наименее способна принять узорчатую поверхность». Но в Азии булаты с незапамятных времен не выходят, так сказать, из моды и сохраняют постоянную ценность, подобно благородным металлам. Азиатцы, хотя отставшие от нас в просвещении, не могли ошибаться в продолжение многих веков в истинном достоинстве ка-

[1] Manuel de la Metallurgie du fer, traduit par Coulman, Metz 1831.

ждой вещи, приобретаемой за дорогую цену. Они охотно платят за лучшие клинки по 100 и более червонцев.

Путешественник наш по Японии Головнин [3] пишет, что у японцев булатные сабли, как священные вещи, переходят из рода в род и сохраняются с таким тщанием, что воин более всего заботится о сбережении своего оружия. Итак, если булаты могли сохранить постоянную ценность по настоящее время и в Японии, и в Китае, и в Индии, и в Персии, и в Бухаре, и в Турции и в нашей Грузии, то невозможно согласиться с мнением Карстена.

Эти соображения лет за 12 пред сим заставили меня верить более мнению о булатах, переданному нам древними, нежели точности химических разложений. Собрав несколько образцов, я старался определить относительное их достоинство различными испытаниями, посредством которых я скоро мог заметить, что при некоторых видоизменениях узоров, булат, очевидно, тверже, но не хрупче стали, следовательно, лучше ее. С тех пор я принял намерение опытами доискиваться тайны приготовления булатов. Сначала труд этот казался мне маловажным, но чем более я знакомился с достоинством образцов, тем более убеждался, что первые успехи мои ничтожны, и что переход от едва приметного узора до такой крупности, какая замечается на драгоценных клинках, составляет океан, который надлежало переплывать многие годы, не приставая к берегу и подвергаясь различным случайностям.

Россия, богатая железными рудами различного свойства, не бедна и искусными руками. Ей недоставало только совершенства в общеупотребительном материале — в стали, а это есть булат.

2) ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О БУЛАТАХ

Булатами называется всякая сталь, имеющая узорчатую поверхность; на некоторых булатах узор виден непосредственно после полировки, а на других не прежде, как поверхность ее подвергнется действию какой-либо слабой кислоты. Сок растений или уксус, приготовляемый из пива, может заменить кислоту. Обнаруживание узоров называется вытравкой.

Узоры на стали могут быть весьма различны; но не всякая сталь с узорами должна быть названа булатом. На обыкновенной стали рисовкой и травлением наводят иногда узоры, подобные булатным; но как бы тщательно они сделаны ни были, опытный глаз не затруднится распознать искусство, независящее от свойства стали. Такие булаты называются ложными.

Другой род булатов имеет хотя искусственные узоры, но заключающиеся в самом металле, так что сколько бы раз ни повторять полировки и вытравки, они снова появляются. Эти булаты известны под именем искусственных или сварочных. Они получаются через многократную сварку как различного рода стали между собой, так и с железом. Достоинство этих булатов может

быть различно и зависит частью от качества первых материалов, частью от искусства мастеров. Сварочные булаты, отличающиеся внутренним достоинством, приготовляются преимущественно в Азии, например, в Индии, Турции и Грузии, и в особенности теми из мастеров, которые знакомы с обработкой настоящих булатов; но европейские сварочные булаты не приобрели особенной известности, ибо внимание европейских мастеров обращено более на образование узоров, нежели на улучшение качества металла; оттого сварочные булаты, например, солингенские и клингентальские, хотя имеют узоры, но лишены других признаков, определяющих достоинство булатов. Впрочем, как бы совершенны ни были сварочные булаты, они не могут равняться с хорошими настоящими, ибо, будучи сплавлены, теряют узоры.

Настоящий булат отличается от сварочного неподражаемым для искусства расположением узоров, происходящим от состава металла, и тем еще, что при переплавке не теряет узоров, но претерпевает большее или меньшее изменение в расположении их, смотря по тому, как предпринята была переплавка, и какое влияние имела она на изменение в составе металла. Сколько мне из собранных сведений и образцов известно, в Азии разделяют булаты на многие рода. Это разделение основано или на местности, где их приготовляли и приготовляют, или на различии способов приготовления, или на свойствах самого металла. Известнейшие из них: табан, кара-табан, хорасан, кара-хорасан (от провинции в Персии, называемой Хорасан), гынды, кум-гынды, нейрис и шам. (Слово шам, по уверению капитана английской службы Эбота, есть простонародное название Сирии, почему шам означает собственно сирийский булат [1]). Индейский вутц также принадлежит к булатам.

Достоинство булатов познают азиатцы по узору, по цвету грунта или промежутков между узорами, и по отливу поверхности при косвенном направлении лучей света. Азиатцы полагают: чем крупнее, явственнее узор, тем выше достоинство металла. Узор почитается крупным, когда достигает толщины нотных знаков, средним — когда не толще обыкновенного письма, и мелким,— когда можно заметить его невооруженным глазом.

Грунт в булатах бывает или серый, или бурый, или черный. Чем он темнее, тем выше достоинство булата. Иные булаты не имеют отлива, другие отливают красноватым, а иные золотистым цветом. Чем явственнее отлив и чем более он приближается к золотистому, тем выше достоинство металла. Достоинство булатов может быть познаваемо также по звону: чем он чище и продолжительнее, тем выше достоинство металла; но как признак сей находится в зависимости от формы и отделки изделий, то не признается верным. Лучшими булатами считается табан, кара-табан

[1] Примечание. По городу Дамаску в Сирии он называется иногда дамасковым.

и кара-хорасан, а худшим шам, который заключает в себе преимущественно продольные узоры. Грузинские мастера уверяют, что искусство приготовлять табан потеряно в самой Азии около 600 лет, и что прочие два рода весьма редки в настоящее время [1]. Слова грузинских мастеров подтверждаются историческими сведениями о дамасских клинках, сообщенными английским ученым Вилькинсоном. Он говорит (в статье о причинах образования узоров на булатах, помещенной в журнале Королевского английского общества 1837 года): город Дамаск прославился во всем свете мануфактурами сабельных клинков, но Тимир-Ланг [4], покорив Сирию в начале XIV века, увлек в Персию всех мастеров, и с того времени выделка оружия в Дамаске пришла в упадок, а потомки тех мастеров, рассеявшись по востоку, потеряли искусство.

Вышеописанные признаки, как мною дознано многими сравнительными опытами, вернее определяют достоинство металла, нежели все средства, употребляемые европейскими мастерами: последние дают токмо приблизительное понятие о достоинстве стали и притом большей частью в то время, когда она находится в работе, а не в виде готового изделия, о котором остается судить по пробе, соответственной употреблению. Таким образом, при покупке готового изделия все ручательство в достоинстве ограничивается клеймом фабриканта. Но опытный в выборе булатных изделий азиатец не ошибется в достоинстве без пробы и, увидев кого-либо усиливающегося распознать достоинство вещи, например, сабли, кинжала, ножа рубкой по железу или слесарской пилой, наверное улыбнется, ибо твердость может быть условна и зависеть от степени закалки. Если булат надлежащим образом вытравлен, то пробы излишни, без них видно: вязок или хрупок, тверд или мягок, упруг или слаб, остр или туп металл.

3) ОБ УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БУЛАТОВ

Первые опыты предприняты были в малом виде. Впрочем все принадлежности устроены на тех же началах, на которых впоследствии основано устройство для дела литой стали в большом

---

[1] Примечание. Образцами древних булатов я имел случай пользоваться от оренбургского военного губернатора, генерал-адъютанта Василия Алексеевича Перовского, обладающего богатым собранием азиатского оружия, который по любви к наукам и искусствам принимал особое участие в моих изысканиях и способствовал к приобретению сведений о булатах. Впоследствии я видел многие собрания в С.-Петербурге, доказывающие как высоко ценится в России работа древних азиатцев. Достопримечательнейшие и богатейшие из них находятся в Царскосельском арсенале, принадлежащем государю императору; весьма замечательны, по выбору образцов и по достоинству их, собрания цесаревича великого князя Александра Николаевича и великого князя Михаила Павловича. Из частных собраний замечательнейшие находятся у князя Петра Дмитриевича Салтыкова и начальника штаба Корпуса горных инженеров Константина Владимировича Чевкина.

виде, описанное в сочинении моем, помещенном в № 1 Горного журнала за 1837 год. Вся разность заключалась в размерах внутренности печи. Для тиглей, вмещающих от 5 до 10 фунтов железа в кусках, печь в виде цилиндра имела в вышину до 10 вершков, а в поперечнике до 9 вершков. Впоследствии, когда приобретен был некоторый успех, булаты приготовлялись в печах и тиглях, употребляемых для литой стали. Почему я считаю излишним повторять здесь в подробности об устройстве печей, о приготовлении тиглей и о предварительной прогревке их.

4) О ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ОПЫТАХ

В 1828 году, когда сделались известными результаты исследований Фарадея и когда обретена была платина на Урале в огромном количестве, министр финансов, граф Егор Францевич Канкрин, поручил горному начальству повторить опыты Фарадея. Исполнение этого поручения возложено было на меня.

Поводом к сплавлению литой стали с платиной послужило Фарадею следующее обстоятельство: доктор Скотт, находившийся в Бомбее, доставил в Английское королевское общество несколько образцов индийского булата или вутца, употребляемого индейцами предпочтительно пред сталью на ружейные плашки, на резцы для обточки железа, на ножницы, пилы и вообще на изделия, требующие особенной твердости. Фарадей при химическом разложении заметил в вутце присутствие алюминия и полагал, что узоры, обнаруживающиеся на нем от действий разведенной серной кислоты, происходят от сего металла. Чтобы подтвердить это предположение, он приготовил смесь, состоящую из железа и алюминия, и через сплавление ее с английской литой сталью получил металл, похожий на вутц, который он и назвал искусственным вутцом, не упоминая, впрочем, о его свойствах. Потом Фарадей, сплавляя сталь, кроме алюминия, с серебром, родием и платиной, заметил, что все сии сплавы были тверже обыкновенной литой стали, что они имели превосходные свойства, и в особенности сплавок с платиной.

Не имев до того времени случая видеть производство литой стали, ни переплавлять ее, легко представить, сколько предстояло мне затруднений, чтобы хотя в некоторой мере исполнить лестное поручение начальства. Надлежало устроить печь, приготовить огнеупорные тигли, избрать способ приготовления литой стали, ибо сплавление английской стали с платиной не могло принести существенной пользы.

Все руководства об этих предметах, бывшие известными мне в то время, оказывались или недостаточными по краткости, или несообразными с местностями. Оставалось прокладывать новый путь. Таким образом, протекло более года, пока я в состоянии был представить на благоусмотрение начальства первые образцы платинистой литой стали. Она получена следующим образом

(опыт 10-й). В тигель, предварительно прогретый, положено $4^1/_3$ фунта рафинированной стали, 1 фунт мягкого железа, 5 золотников платины и сверху $^1/_2$ фунта флюса, составленного из $^1/_4$ фунта кирпичной глины и $^1/_4$ фунта толченого стекла. Плавка продолжалась 1 час 20 мин. при ровном умеренном дутье. Полученная сталь вылита в форму и прокована при умеренном нагревании; по испытании она оказалась весьма твердой и годной на тонкие инструменты.

Из сравнений свойств чистой литой стали с платинистой, одинаковым образом полученных (опыты 15-й и 19-й), оказалось, что первая при большой твердости столь же удобно куется; что по вытравке слабой серной кислотой она обнаруживает узоры, различные в цвете и расположении от замечаемых на литой стали, с землистыми флюсами получаемой. Когда я увеличил количество платины до 2 золотников на фунт стали (опыт 15-й), то узоры сделались еще явственнее, но расположение их было очевидно различно от булатных

Сии опыты привели меня к заключению, что если в платинистой стали узоры увеличиваются от прибавления платины, то и в литой стали проявление их зависит от присоединения какого-либо металла, или по замечанию Фарадея, от алюминия, так как флюсом служила глина, смешанная со стеклом. Для определения влияния других земель на сталь, я изменял флюсы, и вместо глины употреблял кварцевый песок из пережженого горнового камня и известь. Я скоро мог убедиться, что с переменой флюсов и узоры изменяются, как в виде, так и в цвете. Дальнейшие исследования показали (от 20 до 35), что от присоединения алюминия узоры бывают желтоваты и малоблестящи. От силиция и магния они светлее и приближаются к цвету цинка, а от кальция к серебру. Чем слоеватее сталь в изломе и чем удобнее пленится при ковке, тем явственнее узоры, и, следственно, тем богаче сталь сими металлами. По сравнению с платинистой сталью, в которой количество платины было мне известно, я мог приблизительно определить и количество других металлов. В последнем случае оно могло простираться до 2 процентов во 100 частях, а при одном проценте сталь удобно может быть прокована, когда она притом не очень тверда.

Все эти опыты убедили меня, что присутствие металлических оснований земель имеет вредное влияние на сталь, в каком бы малом количестве они ни находились в ней, притом как узоры от сих металлов весьма различны от булатных, то и следовало искать другой причины для произведения их. С этой целью я желал определить влияние на сталь некоторых металлов, сопровождающих железные руды; ибо, вообще, предмет, заключающий в себе отношение железа к другим металлам, казался мне недостаточно исследованным Ринманом, Гассенфрацом, Карстеном и другими металлургами, по крайней мере в отношении к предположенной мною цели.

5) ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА СТАЛИ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ

Ряд опытов, произведенных мною с целью определить влияние на сталь марганца, хрома, титана, серебра, золота и платины, привел меня к следующим результатам:

1) Примесь марганца к стали (опыты 36-й и 41-й) в малом количестве, до $^1/_{200}$ не производит в ней видимой перемены, которую тем труднее заметить, что сталь, при одних и тех же условиях плавки, бывает несколько различна и в качестве, и в твердости. Но если в ней заключаться будет до $^1/_{100}$ марганца, тогда она становится тверже, хрупче или вообще грубой. Зубила для насечки пил, как одно из удобнейших средств для испытания стали, скоро начинают выкрашиваться; на поверхности полированной и вытравленной стали появляются в первом случае едва приметные, а во втором мелкие узоры, а грунт становится вместо серого бурым.

С увеличением количества марганца до $^1/_{50}$ сталь делается такой ломкой, что при ударах колется по длине, соответственно направлению слоев, ее составляющих. Эти слои имеют цвет не свойственный стали, а подобный цинку. Последнего рода сталь, по вытравке, обнаруживает узоры хотя мелкие, но явственные. Они, будучи сравниваемы с булатными, бывающими иногда столь же мелкими, оказываются от них весьма различными и по виду и по расположению. Все эти результаты достаточно, кажется, убеждают, что присутствие марганца в стали составляет более вредную, нежели полезную примесь. Правило это не опровергает, впрочем, мнения, принятого металлургами, что для получения хорошей стали необходимы марганец содержащие железные руды, которые получили с давнего времени название стальных руд. Но, по моему мнению, марганец полезен в железных рудах не присоединением к чугуну или стали, но другим путем, о котором я упомяну впоследствии.

2) С хромом и титаном предприняты были точно такие же опыты, как и с марганцем, прибавляя в первом случае к флюсу хромистое, а во втором титанистое железо. Результаты сих опытов оказались во многом сходными: то же увеличение хрупкости с умножением примеси сих металлов, те же явления относительно проявления узоров, а главная разность в том, что хром и особенно титан, при одинаковом количестве, меньше вредят стали, нежели марганец, и что сталь с хромом принимает высшую полировку.

Что принадлежит до узоров, то они, различаясь от марганца, различны и между собою, но узоры от хрома красивее нежели от марганца и по расположению своему более других приближаются к булатным, что, вероятно, и послужило поводом французскому химику Бертье почитать хромистую сталь за булат. Грунт от хрома темный, а от титана фиолетовый, по которому присутствие титана

легко узнавать можно (опыты 42—49). Вообще опыты показывают, что и марганец, и хром, и титан менее вредят стали, нежели кальций, силиций, магний и алюминий. Сии последние, находясь в стали в количестве, простирающемся до $^1/_{50}$ части, наверное составят нековкий металл; но если в нем не будет вовсе заключаться углерода, тогда он будет составлять особый сплавок железа более и менее ковкий. В одном из подобных сплавков железа с силицием Берцелиус [1] нашел до 19 процентов сего металла, и, несмотря на столь значительное содержание, железо удобно ковалось и по наружному виду не отличалось от обыкновенного.

3) Сплавки стали с серебром (опыты 49—50), которого они содержали от $^1/_{367}$ до $^1/_{90}$, отличались от обыкновенной в особенности удобной ковкостью при значительной твердости. Сталь эта в изломе белее обыкновенной, но, будучи выполирована и вытравлена, не имеет однообразных узоров, несмотря на увеличение серебра, а токмо местами обнаруживает белые неправильные полоски, доказывающие некоторым образом, что серебро неохотно вступает в химическое соединение со сталью. Фарадей замечает, что серебристая сталь менее подвержена ржавчине; мои наблюдения подтверждают также это замечание. При изделиях некоторого рода, как например, при деле частей, принадлежащих к часам, одно это свойство может быть столь важно, что вознаградит издержки за серебро. Но сплавки с прочими металлами, о которых было упомянуто выше, скорее ржавеют, нежели чистая сталь.

4) Отношение золота к стали (опыт 51-й) не показало особенных свойств, кроме того, что золотистая сталь оказалась мягче обыкновенной и в ковке и в закалке. Но замечательно, что от прибавления золота в количестве до $^1/_{200}$ не обнаружилось никаких видимых знаков на поверхности вытравленной стали, кроме ровного желтоватого отлива. Влияние золота на сталь при большем его количестве осталось не исследованным.

5) Хотя о влиянии платины были уже произведены опыты, но я счел не излишним повторить их при измененном флюсе, и при улучшении самой стали. В самом деле, новый опыт (52) показал, что платинистая сталь имела уже другие узоры, различные от полученной без примеси железной окалины; они были мелкие, и хотя не везде однообразные, но сохранившие цвет платины. Эта сталь принимала весьма хорошую полировку, была тверда и остра в бритвах, только некоторые из них получали трещины при калке.

---

[1] Bercelius, Lehrbuch, übersetz von Wöhler, B. III, 1834.

6) ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗА НА СТАЛЬ

Если прибавление посторонних металлов имеет видимое влияние на сталь. то свойства ее должны зависеть и от качества самого железа, в котором всегда остаются посторонние примеси в количестве более или менее значительном, как подтверждают и химические разложения железа. В сочинении о литой стали упомянуты некоторые правила. извлеченные мною из опытов (53—62) относительно выбора железа; почему здесь буду говорить токмо о дальнейших опытах, показавших возможность: 1) обращать железо в сталь без помощи флюсов и 2) точнее определить различие в качествах железа.

а) Расплавление железа без помощи флюсов

При опытах сплавления железа с флюсом заметил я, что сей последний, расплавляясь прежде металла, спускается на дно тигля, и, оставляя железо обнаженным, доставляет ему случай приобретать углерод — цементоваться. Насыщенное углеродом железо или сталь, не в состоянии будучи оставаться в твердом виде при постоянно продолжающейся высокой температуре, расплавляется и опускается по относительной тяжести на дно тигля, а шлак поднимается вверх по мере расплавления всего железа. Этот процесс объясняет всю теорию образования стали без прибавления тел, заключающих в себе углерод. Он же дал мне идею заменить флюс глиняной крышкой на тигле. Определив из опытов время, в которое остается шлак ниже металла, мне не трудно было назначить время, когда должно прекратить цементование железа и покрыть тигель крышкой (опыты 63—67). Таким образом в короткое время введен был способ приготовления литой стали из железа без флюса в большом виде, описанный мною подробно в сочинении о стали. Причины, побудившие меня оставить первоначально избранный способ и заменить его другим, заключаются в следующем: 1) удобнее было получать более мягкой стали, нежели твердой, ибо накрытие крышкой находилось в зависимости от навыка, а расплавление и поднятие флюса от причин сложных; 2) что она вообще мягче в ковке и более стойчее на зубилах, реже получает трещины при калке, чище в полировке, почему и признана лучше прежней; 3) что ей вообще менее свойственны узоры, нежели стали, приготовленной с флюсом и окалиной. Таким образом с уменьшением или уничтожением узоров, казалось мне, что сталь достигла совершенства, по крайней мере в том смысле, как утверждает Карстен. Одно только оставалось для меня странным, что некоторые слесарские пилы из прежней стали сохраняли долее остроту, что по общему понятию должно было приписать тому, что зуб прежних пил приметнее выкрашивался и возобновлял, так сказать, остроту пилы, а выкрашивался потому, что сталь была грубее. Но из результатов всех опытов будет видно, что здесь скрывалась другая причина.

б) Влияние на сталь качества железа

Опыты (68—73) показали, что сталеватое златоустовское железо и самое мягкое дают одинакового качества сталь, подтверждая тем, что углерод, находящийся в первом, не имеет влияния на изменение свойств ее; но в стали, приготовленной из навивного златоустовского железа, можно было заметить разность в свойствах. Она при одинаковой твердости удобнее куется, принимает лучшую полировку и по вытравке более темный грунт; но в стойкости, сравнительно со сталью из обыкновенного железа, значительной разности не представляет, а сравнительно с переплавленной рафинированной сталью, ей уступает. Первые явления сообразны с ожиданием, но последнее оставалось долго непонятным. Улучшение ковкости, полировки и грунта я приписывал уменьшению в навивном железе посторонних примесей и в особенности серы, присутствие которой замечается в некоторых железных рудах Златоустовского округа: навивное железо, по способу приготовления, подвергается большему действию возвышенной температуры и кислорода; оно, будучи собираемо из обращенной полукрицы, перед самой фурмой, удобнее выделяет и углерод и серу. С допущением в навивном железе меньшего количества серы, объясняется разность в грунте металла, а что стойкость не увеличивается, то причина этого явления могла объясниться токмо впоследствии.

7) ВЛИЯНИЕ ВОЗДУХА НА СТАЛЬ

Из первоначальных опытов (опыт 3-й) видно, что пока я не вымазал нагретой формы салом, выливаемая в нее сталь не ковалась. Это доказывает, что доступ воздуха изменяет свойства расплавленной стали и сближает ее с чугуном: сало, дымясь в нагретой форме, образует отчасти углекислоту, которая, наполняя форму, вытесняет воздух. Хотя это средство оказалось полезным, но нельзя утверждать, чтобы сталь при выливке не подвергалась совершенно влиянию воздуха; почему мною предпринимаемы были многие опыты к улучшению выливки стали, но ни один из них не мог быть введен в большом виде. Таким образом устройство шестка, герметически запираемого во время выливки, и снабжение тигля дырою на дне с железным гвоздем не имело успеха; ибо хотя возможно было сделать устройство для вынутия гвоздя, но тигель в дне часто повреждается и металл прежде времени вытекает. Другой опыт, едва не стоивший мне жизни, также не имел успеха. Он состоял в следующем: первоначально приготовили железную форму с воронкой, несколько большей в окружности, нежели окружность тигля. Форма и воронка набиты были глиной с песком, не получающей трещин при просушке; в ней отформована пустота для выливки стали. Форма эта просушивалась несколько дней в теплом месте и оказалась не получившей трещин; также просу-

шена была часть просеянной глины для насыпки на края тигля при выливке металла.

Когда сталь была готова, то вынутый из печи тигель поставили на теплую золу, на края его посыпали кругом сухой глины, а на нее поставили форму, обращенную воронкой вниз, которая имела впадину в глине, соразмерную тиглю. Потом и тигель и форма были захвачены особыми клещами и мгновенно опрокинуты, так что тигель был уже над формой. В это мгновение слышен был удар, и я с рабочими очутился под дождем расплавленного металла: весь металл вылетел из формы и мелкими каплями разбрызгался над нами. К счастию холодное время зимы не позволяло быть без теплой одежды и перчаток, я имел еще время сдернуть одну из них с руки, на которой капля стали успела оставить следы действия своего навсегда. Предстоявшая беда приписана была недостаточной сухости формы. Я повторил опыт с пожженной формой, и хотя успел вылить сталь, но при ковке она на поверхности получала трещины и плены, происшедшие, вероятно, от прикосновения стали к глине и песку. Сей опыт считаю я достойным замечания в особенности потому, что на стали сохранились узоры более явственные, нежели на вылитой обыкновенным способом; что они были подобны булатным, и что имели даже тот вид и расположение, какое бывает на стали, не вылитой в форму и приготовленной с помощью флюса и окалины[1]. Сталь при опыте получена была тоже с помощью флюса и окалины.

8) О ПЕРВЫХ ОПЫТАХ ПОЛУЧЕНИЯ БУЛАТОВ

Не оставляя намерения получить булат, подобный азиатскому, я продолжал опыты. Прежде всего я обратился к кристаллованию стали, приготовляемой без флюса и окалины (74—78); не выливая ее в форму, я дал время остынуть в печи вместе с тиглем; но встретив затруднение в проковке больших пудовых сплавок, я должен был уменьшить тигли. При сплавках весом в 20 фунтов, я встречал те же затруднения в проковке, особенно, когда сталь была средней твердости; одна только самая мягкая сталь могла проковаться в полосы. Результаты этих опытов заключаются в следующем:

а) Хотя сталь, медленно охлажденная в тигле, и имеет наклонность к кристаллованию и образованию узоров, но узоры ее столь мелки, что без помощи микроскопа [5] с трудом распознаваемы быть могут, и то не всегда. Но в стали, получаемой без крыши с помощью флюса и окалины, узоры явственнее, хотя она представляет те же затруднения в проковке.

б) Не бывший в ковке сплавок богаче узорами на дне, нежели

---

[1] Примечание. Из этих данных следует заключить, что уничтожение узора в стали зависит более от доступа воздуха, нежели от скорости охлаждения.

вверху. Но как всякая литая сталь, взятая от нижнего конца, бывает лучше верхнего, разумея положение ее в форме, то из этого следует, что узор может служить признаком доброты стали.

в) В прокованных сплавках узоры обнаруживались или токмо местами, или совсем исчезали. Из этого следует, что неровность узоров и самое уничтожение их зависит от ковки, а впоследствии увидим, что преимущественно от излишнего нагрева стали при ковке. Подобные следствия бывают и с настоящими булатами, требующими весьма осторожной обработки; между тем узоры, происходящие от посторонних металлов, не уничтожаются ни от выливки стали в форму, ни от ковки. Итак, узоры в стали, медленно охлажденной, различны от узоров, происходящих от металлов, но сходны с узорами в булатах, одна только разность в величине их чрезвычайна. Все вышеупомянутые результаты привели меня к заключению, что булат есть не смесь стали с каким-либо металлом, но смешение железа с углеродом, подобное стали, и что причины образования крупных узоров надлежит ближе всего искать в способе соединения железа с углеродом. Но сведения наши о приготовлении булатов в Азии столь ограничены, что в них нельзя найти руководства. Вот существенные из них: а) по свидетельству шведского путешественника Шведенборга, японцы приготовляют сталь из железа, лежавшего долгое время в воде, а Тунберг подтверждает, что японские сабли превосходны и что ими можно перерубать весьма легко гвозди без повреждения лезвия; б) Тавернье в „Путешествии по Персии“ упоминает, что булатная сталь получается из Голконда в виде малых хлебов, рассеченных пополам. Этот вид показывает, что голкондский булат есть сплавок, подобный полученному мною (опыт 78-й). Магомет Али описал приготовление персидской булатной стали следующим образом: железо употребляют доставляемое из гор, но неизвестно каким способом оно приготовляется; это железо сплавляют в печи. Она имеет по 4 фута в длину и ширину от 6 до 7 футов в вышину, стены не толще 8 и 9 дюймов. В 16 дюймах от почвы делают из обтесанных камней горн, у дна которого находится отверстие для отливки расплавленного металла; уголь употребляется самый твердый и тяжелый, отличный из получаемого из дуба. Дутье в печь производится ручным мехом. Печь действует без остановок и, по мере накопления металла, он отливается в формы. Эти сведения показывают что способы получения булатов не одинаковы в самой Азии, ибо, очевидно, одни из них составляют медленно охлажденные сплавки, а другие металл, подобный литой стали. К числу первых принадлежит и способ приготовления вутца, описанный Вилькинсоном [1].

---

[1] Приобретением этой лестной статьи я обязан начальнику штаба Корпуса горных инженеров.

9) О ВЛИЯНИИ НА ЖЕЛЕЗО РАЗЛИЧНЫХ ТЕЛ, СОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОД

а) Растений

Хотя определение влияния различного рода растений на железо было предпринимаемо многими металлургами, в особенности Ринманом и Реомюром, но результаты их опытов не могли иметь прямого отношения к литой стали; ибо они относились собственно до цементования железа; это побудило меня обратить внимание на растения вообще. Клен, как твердейшее из всех произрастающих здесь дерев, предпочтительно пред прочими подвергнут был испытаниям. Потом от самого твердого я обратился к самым мягким растениям, каковы, например, цветы, дабы тем удобнее заметить разность влияния растений на сталь, судя по различной твердости.

Опыты (от 79 до 93) производились с прибавлением $^1/_{100}$ до $^1/_{20}$ кленового дерева. При $^1/_{100}$ части сталь бывает весьма мягка, без признаков узоров; при $^1/_{50}$ твердость ее увеличивается, но узоры то бывают слабы, то обнаруживаются явственно, и в последнем случае сходны с булатом; при $^1/_{25}$ она с трудом куется, а узоры проявляются также непостоянно. При $^1/_{20}$ части клена, когда расплавление и соединение с углеродом достигнуты совершенно, сталь перестает быть ковкой, но узоры как бы произвольно изменяются в величине. В продолжении опытов с кленом замечено только, что при некоторых из них образовалась часть шлака и в особенности при тех, которые давали сталь с узорами, более явственными. Из этого следовало заключить, что переход земель и щелочей, заключающихся в дереве, в шлак, а не присоединение к железу, способствует к образованию собственно булатных узоров, которые на иных образцах были столь явственны, что составляли булат, подобный хорасану, хотя невысокого качества. Прибавление к навивному железу (опыты 94—100) березового дерева имело следствия, подобные клену. Цветы (содержащие кроме углерода и азот) давали сталь также с узорами (94) и притом более светлыми, нежели сухое дерево; мука ржаная, сажа голландская хотя производят узоры, но не столь светлые как цветы. Бакоутовое дерево имело влияние, подобное муке. Из этих опытов видно, что успех в получении булатов не зависит ни от степени твердости растений, ни от количества их, но более от образа соединения углерода с железом и от наименьшей примеси посторонних тел. Итак, понятие Бреана о причинах появления узоров в стали, основанное на одном излишестве углерода и кристаллизации стали, не может быть признано достаточным. Это подтверждается и тем еще, что явственные узоры могут быть на булате и в таком случае, когда он столь мягок, что по закалке не приобретает приметно большей твердости и хрупкости, а остается мягким, подобно железу.

б) Животных тел

Опыты прибавления животных тел к железу (101—104), как например, рога, слоновой кости, показали, что хотя с помощью их можно получить сталь с узорами, но они никак не могут равняться с узорами настоящих булатов. При сих опытах замечено однако же, что сырой рог лучше пожженного для проявления узоров.

в) Углерода чугуна

Далее я полагал полезным испытать сплавление чугуна с железом без доступа воздуха, смешивая их в такой пропорции, чтобы составить сталь; ибо известно, что чугун содержит в себе углерода от $^{3}/_{100}$ до $^{5}/_{100}$, а мягкая сталь до $^{1}/_{100}$.

Опыты (105—107) показали, что 16 частей железа и 4 чугуна дают сталь, которая куется удобно, но холодная ломка и приготовленные из нее зубила не стойки, но что при плавке более продолжительной связь в частях несколько увеличивается. Как опыты сии не показали значительного улучшения собственно в стали, то и не были продолжаемы без выливки.

г) Влияние ископаемых тел, углерод содержащих

Не видев возможности достигнуть удовлетворительного успеха ни помощью углерода растений, ни помощью углерода животных, мне оставалось ожидать оного в царстве ископаемых. Алмаз и графит казались мне ближайшими телами к достижению цели. Алмаз как чистейший углерод, графит как соединение того же углерода с основаниями земель. Но драгоценность первого лишала возможности предпринять подобные опыты, особенно при неуверенности в успехе; я остановился на графите. Для первых опытов я мог иметь графит посредственного качества: в нем видны были местами прослойки и зерна серного колчедана. Выбрав до 2 фунтов повидимому чистого графита, я предварительно истолок его, в предположении употребить подобно флюсу.

Первые опыты (от 108-го до 111-го) производимы были в малых тиглях, вмещавших до 5 фунтов железа без крыши. На железо насыпалось до $^{1}/_{2}$ фунта графита. Плавка шла медленнее прежнего, на довольно сильном духу, ибо продолжалась 2 и более часа. При разбитии медленно охлажденных в печи тиглей, корольки или сплавки казались как бы несовершенно расплавленными, ибо куски железа в некоторых местах сохраняли первоначальную форму; но это происходило от просыпавшегося в тигель графита, который, пристав к стенам тигля, не мог впоследствии подниматься наверх. Уже первый опыт увенчался большим успехом, нежели все предшествовавшие. По проковке сплавка в полосу на нижнем конце ее обнаруживались узоры настоящего булата, а по мере приближения к верху, они становились реже и неправильнее. Из нижнего конца этой полосы приготовлен первый булатный клинок, называемый хорасаном, которого узоры к концу становились хуже.

Результаты повторенных несколько раз опытов с тем же графитом оказывались сходными. Вся разность заключалась в незначительном изменении грунта и формы узоров, большей частью средней величины. Но этот успех был непродолжителен: с переменой графита или металл не плавился, или не ковался, или. наконец, терялись в нем узоры (опыты 112—129). Одним словом отыскание потерянного продолжалось два года. Из многих сделанных в это время опытов, я мог извлечь только ту пользу, что они открыли другие пути к получению булатов. Таким образом, смешивая железную руду с графитом (от 130 до 138), можно получить непосредственно из руд ковкий булат. Эти опыты заключают в себе открытие в металлургии железа, открытие, важное по многим отношениям: во-первых, потому что до сих пор из руд в тигле никто еще не получал ковкого металла, в полном смысле этого слова; во-вторых, потому что сим способом можно получить превосходный булат, если первые материалы будут высокого качества; в-третьих, потому что оно ведет к предположению, что древний и потерянный более 600 лет способ приготовления булата, известного под названием табан, едва ли не состоял в сплавлении графита с железной рудой, и, наконец, оно ведет к новым открытиям, которые могут послужить и к сбережению горючего материала в доменных печах, и к улучшению качества самого чугуна в тех заводах, где графит находится близко; ибо если он может восстановлять железо, то он без сомнения заменит и часть угля, потребного для этой цели, а соединяясь с железом улучшит чугун и приблизит его к состоянию более ковкому, или увеличит в нем вязкость, что в особенности может принести пользу при отливке орудий. Но так как в Златоустовском округе и вообще на Урале не открыто еще благонадежных месторождений графита, то я остановил дальнейшие опыты над сплавливанием железных руд с графитом особенно потому, что прежде избранный мною способ сопряжен с меньшими расходами. По приискании графита, годного для приготовления булатов, я снова достиг потерянного успеха.

Первый графит, годный на булаты, оказался в обломках от пассауских тиглей (опыты от 139 до 140); для сплавлений его с железом необходимо прибавлять на 1 фунт до $^1/_4$ фунта кварца, пережженного горнового камня. Плавка производилась в больших тиглях; в один раз полагалось по 12 фунтов железа и до $1^1/_4$ фунта графита. Плавка под крышей продолжалась от 4 до 5 часов, следовательно, долее обыкновенной стали. При сих опытах булат получаем был преимущественно продольный или шам, а иногда и хорасан невысокий.

В это время обращали на себя общее внимание опыты директора парижского монетного двора Бреана. Начальник штаба Корпуса горных инженеров, Константин Владимирович Чевкин, во время обзора заводов, удостоив особенного внимания образцы булатов, приготовленных мною в продолжение опытов, поручил повторить и опыты Бреана. Повторение их заключалось в сплавлении навив-

ного железа с $^1/_{100}$ и $^2/_{100}$ голландской сажи, с $^1/_{100}$ сажи и $^1/_{100}$ графита, в сплавлении мягкого чугуна с сырым, по равной части (142—145). Плавка производилась под крышей; корольки или сплавки, получаемые при опытах, ковались хорошо, кроме последнего смешения. Узоры на нижних концах полос были подобны опытам с растительными телами, но далеки от настоящего булата Эти опыты убедили меня, что Бреан не близок еще к цели, особенно потому, что и самые понятия его о булатах, как я имел случай заметить выше, не вполне объясняют явления, встреченные мною при опытах.

За сими опытами следовали другие, клонившиеся к сплавлению графита без обожженного кварца, так как в этом флюсе я подозревал влияние силиция на булат. Избежать кварца я считал возможным и потому, что железные руды могут служить флюсом для расплавления графита и для получения самого булата. Но опыты (146—148) показали, что прибавление обожженной железной руды, или окисла железа лишает булат узоров; между тем как тот же графит с кварцем (149) обращал железо в булат. Знав влияние на сталь закиси железа из прежних опытов, мне не трудно было заметить, что влияние окисла различно от влияния закиси, и это обратило меня к новым опытам (150—151). Я сплавил 10 фунтов навивного железа в тигле без крыши до совершенной жидкости, следовательно соединил его с таким количеством углерода, какое находится в чугуне. Сплавок этот, как и предполагать было должно, не сковался и узоров не обнаружил; он составлял очищенный чугун. Для проявления узоров он переплавлен с прибавлением $^1/_2$ фунта окалины без доступа воздуха; по сплавке королек покрыт был ноздреватым зеленым шлаком и имел некоторую степень ковкости; но только нижняя часть его могла проковаться, и то не чисто. По вытравке, на пластинке оказались крупные узоры кара-хорасана. Другой опыт (152—153) повторен был с обыкновенным железом; он сопровождался подобным же результатом. Полученный в небольшой пластинке булат, хотя также был кара-хорасан, но имел грунт серый и грубый. Эти опыты показали: 1) что булат может быть получен без графита из всякого железа, прибавляя при переплавке его окалину и оставляя в тигле до охлаждения; 2) что навивное железо лучше обыкновенного, ибо грунт булата выше и 3) что проковка этих булатов тем затруднительнее, чем более заключается углерода в стали.

Сравнивая сей способ с персидским, описанным Магометом Али, в обоих находится много общего: то же сплавление железа в прикосновении с углем, та е выливка после плавки, недостает только окончательного процесса для проявления узоров, который, вероятно, от него был сокрыт и остается до сего времени неизвестным для европейцев. Но я полагаю, что полученную таким образом нековкую сталь или чистый чугун персияне или переплавляют с прибавлением закиси железа и тогда уже оставляют в горну для кристаллования, или вылитую сталь подвергают

предварительно для удобнейшей проковки другой операции, о которой будет упомянуто ниже, в статье о превращении стали в булат. Сплавление стали с окалиной и появление в ней узоров, служащих признаком улучшения металла, подали повод к прибавлению окалины к самой стали при окончании процесса цементования. Но опыт (154) не оправдал ожидания; ибо вылитая в форму сталь не обнаружила ни узоров, ни разности в свойствах. В этом случае, как и прежде, замечено было, что узоры уничтожаются от несовершенства способа выливки стали. Но как булаты, получаемые с помощью графита, сохраняют ковкость даже при крупных узорах, не требуя никакой другой работы, то я предпочел прежний способ новому и для усовершенствования булатов обратился к приисканию графитов по возможности лучшего качества.

10) ВЛИЯНИЕ НА БУЛАТ РАЗЛИЧНОГО КАЧЕСТВА ГРАФИТОВ

Многие сорта графитов были подвергнуты испытанию: из них некоторые оказывались негодными, другие равнялись в качестве с графитом пассауских тиглей, иные превосходили сии последние; но лучшими оказались: графит из озера Еланчика близ Миасского завода и графит кумберландский в Англии. К сожалению, здешний графит попадается в виде мелких галек по берегам озера, между хрящем, поднимаемым льдом со дна озера. Он столь редок, что в начале лета можно было собирать до 2 фунтов. Разведки, неоднократно повторенные в окрестностях озера, не привели к открытию месторождения графита. Впрочем, осушение озера может привести если не к открытию коренного месторождения, то по крайней мере к отысканию разрушенного пласта, в котором графит, вероятно, находится в большем количестве, чем в берегах озера[1].

А) С графитом, выписанным в первое время

Этот графит был двух родов: первый самородный темного цвета, мягкий к осязанию, но с признаками серного колчедана; он по испытанию оказался негодным; второй состоял из кусков от тиглей, но хорошего качества, почему и был употреблен для последующих опытов. В один раз сплавлялось железо от 10 до 12 фунтов и графита от 1 до $1^1/_4$ фунта с различным изменением в составе флюса, во времени плавки, в степени жара (от 155 до 167). При сих опытах я мог сделать следующие замечания:

1) Железо и графит от тиглей с прибавлением одной окалины весьма трудно расплавляются. Окалина для восстановления своего в железо требует графита около $^1/_7$ части по весу (156).

[1] Примечание. Засуха, бывшая в 1840 году, оправдала это предположение. Вода в озере Еланчике понизилась и обнаружилось значительное месторождение графита, которое вскоре снова покрылось водой. Во время засухи добыто до 2 пудов.

2) Вместо пережженного кварца может быть с пользой употреблен доломит (158).

3) Если часть расплавленного металла выбежит из тигля, то оставшаяся по большей части лишается ковкости, хотя в ней и сохранились узоры; от места и величины скважины зависит степень повреждения булата, который при подобных случаях иногда теряет и узоры (165).

4) Поврежденный булат одной переплавкой поправить невозможно (166).

5) Чем сильнее жар и чем продолжительнее плавка, тем лучше качество металла, но тем труднее для тигля.

6) Заметна разность между графитом и остатками после плавки. При одних и тех же обстоятельствах от прибавления старого графита металл труднее куется и несовершенно чисто отсекается, а узоры походят более на кара-хорасан, нежели на табан (167).

7) Старое железо, бывшее в земле, труднее плавится, нежели обыкновенное (183).

8) Железо, перекованное в мелкие гвозди, не улучшило булата, и если старые гвозди предпочитаются грузинскими мастерами при выделке сварочных булатов обыкновенному железу, то это не по мелкости частей, а по другим причинам, как полагать должно (163).

Б) С другим графитом

Графит сей был сходен с прежним, но светлее. Повторенные с сим графитом опыты (168—173) показали, что он лучше прежнего, ибо получился табан с средними узорами и темным грунтом. Для большего улучшения булатов я продлил плавку до 5 часов и, действительно, булаты еще улучшились: бритвы оказались отличными, а клинки имели ровный узор, темный грунт и светло-красный отлив.

В) С графитом, бывшим в плавке

Прежде замечена была разность в свойствах старого графита; почему я счел полезным повторить опыты, употребляя один старый графит (174—179). Они показали:

1) Бывший в плавке графит не требует флюса для расплавления железа (176). Потеря его при плавке столь же значительна, как и первого, а иногда и более; при сем образуется шлаку до ½ фунта, а прибавляя окалину, количество его увеличивается до 1 фунта; вес сплавков представляет различие, подобное прежним опытам.

2) Качество металла улучшается по мере прибавления окалины и выделения шлака, причем в особенности заметно улучшение грунта и отлива, который иногда достигает золотистого цвета. Из сравнения свойств булатов видно, что отлив металла может действительно служить признаком достоинства их.

Г) С графитом миасским и английским

Наружные признаки миасского и английского графитов довольно сходны; но первый несколько темнее последнего; оба дают блестящую, чистую и тонкую черту. Превосходство сих графитов оказалось преимущественно в улучшении отлива, который бывает золотистого цвета, хотя бы булат был мягок и имел слабые узоры (180—182). Впрочем и при употреблении сих графитов замечено, что остатки от первой плавки дают лучший булат, чем поступающий в плавку в первый раз.

Д) С алмазом

Желая хотя в некоторой мере познакомиться с влиянием алмаза, как чистейшего углерода, на булат, я сделал два сравнительные опыта (185—186) по возможности при одинаковых обстоятельствах. Я сплавил по 5 фунтов железа и по ½ фунта графита, прибавив к одному из них алмаз в $^1/_4$ карата. По окончании опыта остаток графита и шлак из тигля, в котором находился алмаз, были тщательно разобраны при помощи микроскопа; но в них алмаза не найдено, так что не осталось повода сомневаться в действительном его соединении с железом. Булаты, полученные при этих опытах, не представили разности в пользу алмаза; напротив того, булат с алмазом был несколько хуже. Я далек от того, чтобы из одного опыта выводить положительное заключение о влиянии алмаза на сталь, но имея в виду факты о различии влияния углерода на железо вообще, полагаю, что прибавление алмаза к булату не принесет особенной пользы, а только увеличит его ценность.

Во время опытов с графитом сделаны мною еще следующие замечания:

1) На 12 фунтов железа потеря в графите простиралась до 80 золотников; полагая в этом числе до 15 золотников (опыт 155) для восстановления окалины, на один фунт железа причитается до $6^1/_4$ золотника графита. Хотя из этого опыта нельзя еще сделать заключения о количестве углерода, остающегося в соединении с железом, но сравнение различных булатов, сходных по узорам, показывает, что чем они крупнее, тем тверже булат и, следовательно, тем более он заключает в себе углерода.

Что часть углерода может угорать во время плавки, то также замечено было во время опытов по соображению употребленного графита с твердостью полученных булатов, и с вероятностью можно допустить, что расплавленный металл иным каким-либо путем действует на угар графита, особенно когда плав ка продолжительнее. Потеря собственно в булате замечается на крышке, которой покрывается тигель: на нижней плоскости ее находятся весьма мелкие шарики стали: они могут образоваться или из паров расплавленного металла, охлаждающихся в верхней части

тигля, подверженной меньшей степени температуры, или они суть брызги кипящего на дне тигля металла; последнее, кажется, вероятнее.

2) Из 12 фунтов железа и 36 золотников окалины получалось от $12^1/_4$ до $12^3/_4$ фунта булата (167—177). Столь значительная разница не может быть приписана различному угару в булате, ибо условия плавки были почти одинаковы. Количество получавшегося шлака, соображенное с употребляемым флюсом, представляет также замечательное явление. Шлака получается более нежели вдвое против положенного флюса. Можно допустить что он разъедает отчасти стены тигля при излишней жидкости и при продолжительной плавке; но подобное действие в значительной мере повредило бы самый тигель, между тем как иногда вовсе не замечается изменения в стенах тигля под шлаком и над ним. Появление шлака, когда не употреблялось флюса, а одно токмо дерево, подтверждает, что он выделяется большей частью из железа. При одном из опытов (176), когда в тигель не было положено ничего кроме железа и графита, бывшего уже в плавке, и, следовательно, не содержавшего посторонних примесей, получено шлаку до ½ фунта. Приписать появление его внешней причине невозможно, ибо крыша была цела и плотно припаяна к тиглю; стены его, начиная от крыши до шлака, сохраняли вид обожженной глины, притом они везде имели соответственные размеры Итак, остается заключить, что если не весь шлак, то большая часть оного выделилась из металла, и если выделившийся шлак был жидок, то он мог растворить и часть глины, прикасающейся к нему. Сверх того, опыты подтверждают: а) если в составе для получения булата не находилось флюса и если получится булат без шлака, то он будет весьма низкого качества и б) если с прибавлением флюса по сплавке получится шлаку менее, чем было положено флюса, то и в таком случае булат будет низкого сорта

11) О ПРЕВРАЩЕНИИ ЛИТОЙ СТАЛИ В БУЛАТ

Из опытов видно, что твердые булаты, как например, карахорасан, содержат более углерода, нежели литая сталь, что подтверждается и химическими разложениями, а между тем они не лишаются ковкости, следовательно, кристаллование стали не уменьшает, а увеличивает ковкость металла. И если литая сталь не приготовляется с подобным количеством углерода, то это потому, что она лишилась бы необходимого свойства ковкости. Впрочем известно, что литую сталь, твердую и неудобную в ковке и отделке, улучшают различными способами отжигания. В самом деле, сталь с помощью отжигания, особенно без доступа воздуха, приобретает и более ковкости и более мягкости в обработке, не изменяя видимым образом твердости по закалке. С другой стороны известно, что продолжительное отжигание, без доступа воздуха, обнаруживает в стали узоры, следовательно действует

на нее подобно кристаллованию при медленном охлаждении. Из этого следует, что литая сталь может быть обращена в булат. С сею целью я положил сталь в чугунный ящик, поставленный в калильную печь, покрыл ее железным листом и лист засыпал просеянным мелким песком и глиной. По прошествии трех суток, вынув сталь и выполировав ее, я нашел все образцы с узорами на твердых они были крупнее, а на мягких мельче. Образцы оказались мягче прежнего в ковке, столь же тверды по закалке и стойчее прежнего на зубилах.

Как отжигание стали в закрытом ящике при первом опыте очевидным образом оправдало мое предположение, то я счел предмет этот достойным подробнейшего исследования и притом в большем размере. На сей конец я устроил особую отжигательную печь (чертеж А).

1) Устройство. Печь состоит из топила *a*) с колосниками *b*), пролетов *c*), из топила под основанием свода, на которое становится чугунный ящик *д*) на кирпичи, поставленные на ребро *e*) и составляющие обратные пролеты под ящиком *f*), стены *g*) по сторонам ящика сведены сводом *h*), по которому пламя обращается опять в пролеты *i*), выведенные с одной стороны до высоты свода, а потом в дымовую трубу *k*). Вся печь выложена из обыкновенного кирпича, так как жар в ней доходит только до светлокрасного каления, а пролеты, как наиболее подверженные действию жара, из белых глиняных кирпичей.

2) Процесс отжигания. В ящике помещается до 40 пудов прокованной литой стали; она покрывается двумя железными листами, вырезанными по мере. На них насыпается на один вершок песку вровень с краями ящика. После того окна в своде *m*) и с бока *n*) закладываются кирпичами на глине и в последнее вставляется железная трубка *n*) с крышей для наблюдения за степенью жара. В топило забрасывают по 3 и по 4 полена березовых дров и, по мере сгорания их, прибавляют снова. В третий день ящик прокаливается докрасна; тогда вынув один кирпич из переднего окна, поправляют песок, дабы он при осадке листов не осыпался. Выровняв надлежащим образом и заложив кирпич на глине, продолжают накаливать ящик от 3 до 9 суток, смотря по твердости заложенной стали, забрасывая дров по 4 и по 5 полен. На отжигание 40 пудов стали употребляется до 5 сажен квартирных березовых дров.

3) Влияние на сталь состава, употребляемого для покрытия, и результаты, выведенные из опытов: при производстве опыта в большом виде мне казалось излишним употреблять мелкопросеянный песок, почему и употреблен был обыкновенный речной; но по окончании процесса отжигания я был немало удивлен, когда не нашел в стали узоров, а напротив заметил в изломе каждого бруска зернистую оболочку, потерявшую первоначальную твердость [6]. Этот опыт ясно показал, что кварцеватый песок не может составлять крыши довольно непроницаемой для

углерода, заключающегося в стали. Почему я повторил опыт с другой сталью, закрыв ее двумя железными листами, замазав их плотно глиной и покрыв наравне с краями ящика просеянным песком. Хотя по окончании обжигания я получил стальные полосы с узорами, но они не были столь ясны, как при опыте в малом виде. Продолжая повторять опыты с меньшим или большим успехом, я вовлечен был в другую ошибку через прибавление к песку золы, которая, казалось мне, могла совершенно герметически запереть ящик; но я встретил новое неожиданное явление: полученные бруски стали при закалке получили трещины, между тем как в неотожженной стали этого порока не было. Хотя трудно объяснить истинную причину сего явления, не подвергнув сталь химическому разложению, но ближайшей можно полагать, что сталь повредилась от присоединения к ней потассия [7], заключающегося в золе. Неоднократно повторенные опыты с различным изменением состава для крыши показали наконец, что обмазка железных листов или чугунных досок белой глиной, засыпка ее глинистым песком и частое промешивание оного во время хода печи, предохраняет сталь от повреждения и служит удовлетворительным средством к обнаруживанию узоров в стали, или к превращению ее в булат.

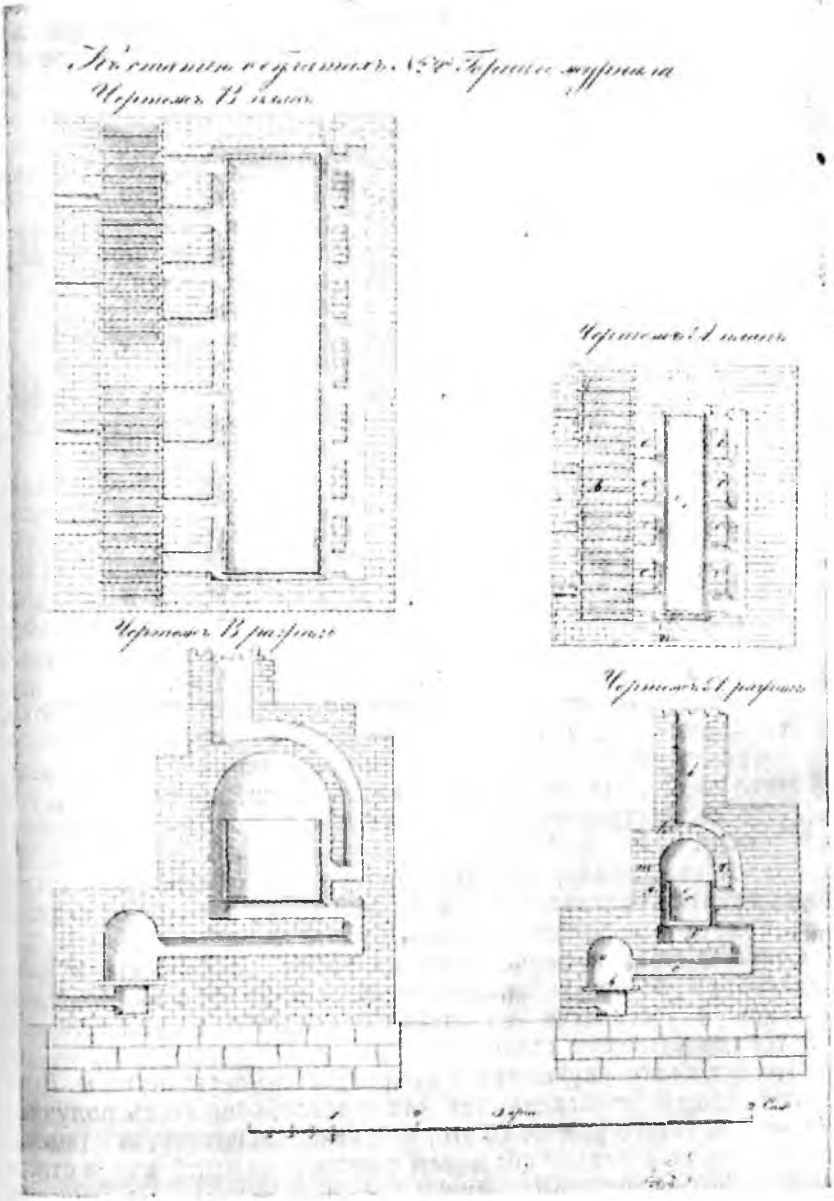
Вышеописанные опыты показывают, что сталь, во время отжигания, может подвергнуться троякому изменению в свойствах: или сделаться мягче, особенно с поверхности, или сделаться грубее или, наконец, приобрести узоры без заметного изменения в твердости. Изменение первого рода обнаруживается слоем окалины на поверхности стальных полосок, которая появляется и в таком случае, если в ящике образуется трещина. Сверх того сталь в изломе приобретает зернистое сложение токмо с поверхности, от которого происходит особый кант белого цвета по краям бруска.

Признаки изменения второго рода или повреждения стали заключаются в малом изменении сыпи в изломе брусков и в удобном разламывании их без закалки. Наконец, признаки соответственного отжигания суть: чистая поверхность брусков, без малейших следов окалины, вязкость металла и ровное крупнозернистое сложение в изломе, которое, впрочем, бывает неодинаково по всей длине бруска, так что конец оного, составляющий верх отлитой болванки, не имеет почти никогда крупнозернистого сложения, а вместе с тем и явственных узоров.

Из опытов при отжигании стали выведены мною следующие правила:

1) Для проявления узоров достаточно трехсуточного прокаливания, исключая времени, потребного для прогрева печи.

2) Чем продолжительнее отжигание, тем сталь становится мягче, хотя бы приняты были все меры к закрытию ящика. Это объясняет причину, почему для отжигания твердой стали употребляется более времени, чем для мягкой.



Печи для отжига.

3) Чем лучше сталь, тем скорее она приобретает крупнозернистое сложение или тем удобнее кристаллуется.

Выше упомянуто было, что совершенство отжигания зависит от непроницаемости чугунного ящика. Для сего он до употребления должен быть подвергнут испытанию: налитая в него вода отнюдь не должна просачиваться. Сверх того, дабы он не скоро повредился, стены его не должны быть тонки. Для помещения 40 пудов стали вес его должен простираться до 20 пудов. Толстые стены в ящике необходимы и потому, что он при отжигании будучи подвержен непрерывному действию воздуха угарает. Образование железного окисла бывает столь значительно, что от трех отжиганий находящиеся под ящиком пролеты наполняются оным, так что прекращается течение воздуха и печь остывает. Для предупреждения сего пролеты должны быть вычищаемы после каждого отжигания.

На сей конец кирпичи против них должны быть так заложены, чтобы их удобно было вынимать из печи и снова закладывать на глине.

4) Сравнение свойств отожженной и не отожженной литой стали. Существенная разница в свойствах отожженной и не отожженной стали, как замечено было выше, заключается в том, что первая удобнее куется, мягче в опиловке, менее повреждается в закалке и стойчее после оной. Все эти свойства замечены из сравнения кусков от одной и той же стали отожженных и не отожженных; и как на отожженной стали появляются узоры, то из этого следует, что они могут служить признаками улучшения ее. Но так как узоры бывают весьма различны на стали одного и того же сорта, то это доказывает, что достоинство каждого сорта может быть весьма различно, хотя бы сталь была получена из одного железа. Из этого видно, что процесс отжигания стали, кроме улучшения свойства ее, доставляет новое средство к точнейшему сортированию стали.

Отожженная сталь, как имеющая узоры, подобные булатным, должна нести и одинаковое с ним название. Для отличия от настоящего булата я называю ее литым булатом.

Отливка стали в формы хотя нарушает наклонность к кристаллованию, но она необходима для облегчения проковки больших сплавков и составляет единственное средство к удешевлению булатов до ценности стали.

Что подобного улучшения в стали не было достигнуто в Англии с помощью отжигания, так как и английская сталь получает при этом процессе узоры, то это, мне кажется, потому, что тамошние мастера не довольно обращали внимание на изменения в стали при различных условиях отжигания, а приписывали улучшение ее более влиянию посторонних тел, при отжигании обыкновенно примешиваемых. Впрочем описанное отжигание стали не есть последнее средство к улучшению ее, как видно будет из последующей статьи.

5) **Отжигание железа**. Если отжигание, производимое по описанному мною способу, полезно для литой стали, то должно было ожидать, что оно будет полезно и для самого железа. В этом предположении я наполнил ящик обыкновенным полосовым железом и подвергнул его отжиганию, подобно стали. Опыт показал, что железо всех изменений по излому, как например, жильное, мелкозернистое и сталеватое, после отжигания получает однородную крупнозернистую сыпь, или приобретает излом, наиболее уважаемый в железе.

Отожженное железо, быв употреблено на приготовление литой стали, очевидно ее улучшало: ибо увеличило в ней связь в частях при одинаковой твердости. Но как на дело стали употребляется исключительно негодное железо в виде мелких обсечков, то я счел полезным подвергнуть их также отжиганию и плавке. Результаты этих опытов оправдали ожидание, ибо сталь, получаемая из отожженных обсечков, оказалась лучше прежней. Не ограничиваясь этим успехом, я желал соединить процесс отжигания с процессом цементования и пересыпал обсечки в ящике промытым угольным мусором. Хотя сим средством, по недостаточной степени жара, я не достиг процементования железа, или обращения его в сталь, но железо скорее приобретало зернистое сложение, нежели без мусора, а получаемая из него сталь достигла желаемого совершенства. Это послужило поводом к постоянному употреблению угольного мусора при отжигании железных обсечков. Таким образом отжигание железа поставило златоустовскую литую сталь на ту степень совершенства, на которой до сего времени находилась токмо английская литая сталь.

Для сохранения расходов я устроил отжигательную печь в большом виде, в которой чугунный ящик вмещает до 200 пудов обсечков. Для пояснения ее устройства и размеров прилагается здесь чертеж *Б*. В сей печи отжигание продолжается 18 суток; в это время употребляется: дров 7-ми четвертовых до 5 сажен, негодного к употреблению угольного мусора для пересыпки обсечков по 1 решетке на каждые 5 пудов обсечков.

Хотя бы сталь была приготовлена из отожженного железа, вторичное отжигание крепкой стали считаю я тем не менее полезным. Оно должно быть предпринимаемо с целью обнаружить узоры, или обратить ее в булат. Токмо при этом условии всякая сталь может быть в своем роде совершенна, равно как и изделие из нее приготовленное, ибо с потерей узоров никто не может поручиться, что металл сохранил первоначальные свойства; а легко может встретиться, что одна какая-либо часть изделия подвергнута излишнему жару и тем лишена связи в частях.

Хотя вторичное отжигание сопряжено с новыми издержками, но они покрываются уменьшением брака в стали при проковке, если бы железные обсечки не были предварительно отжигаемы. Оно производится без прибавления мусора и продолжается токмо

трое суток в ящике первой печи. Для испытания успеха отжигания достаточно выполировать и вытравить конец одного бруска, чтобы быть уверенным, что и все прочие обнаружили свойственные им узоры [1].

Нет сомнения, что литой булат по малой ценности войдет во всеобщее употребление не только на многие инструменты, но и вообще на изделия, требующие остроты и стойкости, приготовляемые ныне или из уклада, или из уклада подвергаемого рафинированию, или из цементной стали или, наконец, из дорогой английской литой стали.

12) О НАРУЖНЫХ ПРИЗНАКАХ БУЛАТОВ

Признаки, по которым можно верно распознавать достоинство булатов, составляют, так сказать, ориктогностическую часть их. Наружные признаки суть следствия химического состава и тех физических условий, которые более или менее благоприятствуют к принятию определенного вида, данного природой каждому роду тел.

В описании опытов замечены были основания, из которых заимствовались признаки, служащие к различию булатов. Они суть: узор, грунт и отлив металла при косвенном направлении света.

Об узоре. В общих понятиях о булатах упомянуто о величине узоров; но что принадлежит до вида и расположения их в металле, то по чрезвычайному разнообразию в сих отношениях узоров, различие по ним степени достоинства металла требует немалой опытности. Средства к скорейшему ознакомлению с булатами заключаются, по моему мнению, во-первых, в приобретении образцов или, по крайней мере, верных рисунков с узоров, бывающих на булатах; во-вторых, в знании основных правил, извлеченных из опытности и из самых процессов приготовления булатов.

В булатных сплавках узоры видны на поверхности самого металла; они еще явственнее обнаруживаются на шлаке, покрывающем его, так что по одному шлаку довольно верно можно судить о качестве металла. *Внимательное наблюдение шлаков в микроскоп* (курсив ред. Д. Н.) показывает, что поверхность, лежащая на металле, принимает все неровности самого металла. Они бывают весьма различны: то состоят из неправильных возвышений и углублений; то из возвышений продолговатых, более или менее параллельных между собою; то из прядей, более или менее явственных; то из прямых параллельных линий, более или менее длинных и толстых; то из прямых параллельных линий, пересекаемых другими

[1] Примечание. Здесь говорено собственно о вторичном отжигании крепкой стали потому, что мягкая, заключая мало углерода, образует мелкие узоры, которые при проковке весьма трудно сохранить и притом она не так скоро повреждается, как крепкая. Почему вторичное отжигание для мягкой литой стали менее необходимо.

под углами более или менее острыми и составляющими косоугольные сети; то прямые линии пересекают одни других под прямыми углами и составляют отдельные квадраты, в которых расположены пресеченные прямые линии, имеющие вид точек. Число их зависит от числа родов помещающихся в квадратах линий, и бывает весьма значительно. При первом шлаке не обнаруживается узоров в прокованном металле; при втором они бывают неправильными полосами по длине металла; при третьем полосы сохраняют параллельность; при четвертом полосы бывают двояки: одни идут по длине, более или менее загибаясь, а другие поперек под различными углами и с различной кривизной; между ними проявляются иногда точки; при пятом продольные линии получают большую кривизну, а поперечные образуют ломаные линии, сходящиеся под разными углами, составляя сети подобные узоры; при шестом кривизна линий как продольных, так и поперечных, увеличивается, а местами между ними появляется множество точек, уподобляющихся своей массой виноградным гроздям. Иногда эти грозди замечаются в металле токмо местами, а иногда расположены рядами, разделяя его на колены, сходные в расположении узоров между собою, так что металл кажется составленным из многих кусков, спаянных поперек полосы. Первые два рода шлаков сопровождаются булатами, негодными ни на какое употребление, почему и не причисляются к булатам, но при последующих они бывают тем совершеннее, чем более правильности в узорах шлаков. Качество прокованного булата возвышается в следующем порядке:

1) Если узор состоит преимущественно из прямых почти параллельных линий, то это есть худший булат.

2) Если прямые линии становятся короче и места их начинают занимать кривые, то и металл возвышается в достоинстве.

3) Когда проявляются ломаные линии и точки, и когда кривые линии умножаются, в таком случае булат становится еще лучше.

4) Когда ломаные линии становятся короче или переходят в точки и появляются во множестве, так что образуют на булате местами поперечные сети подобные узоры, разделенные прядями, извивающимися по различным направлениям, которые служат как бы связью одной сети с другой, то в таком случае булат еще более приближается к совершенству.

5) Наконец, когда состоящие из точек поперечные сети столько увеличиваются, что составляют грозди, подобные виноградным, или простираются почти во всю ширину полосы или вещи, разделяя ее на колена, почти равные между собою и сходные в узорах, в таком случае булат должен быть назван совершенным по узору.

О грунте. О грунте металла в виде сплавка можно также судить по шлаку. Один и тот же флюс дает шлак различных цветов; чем стекловатее и бесцветнее шлак, тем белее и грунт металла

и наоборот, но металл бывает лучше, чем темнее шлак. Черные шлаки бывают, однако, различны, одни стекловаты, а другие тусклы, и тогда узоры на них перестают быть явственными. Из этого видно, чем темнее грунт, тем выше достоинство металла; почему в отношении к грунту булаты могут быть разделены на серые, бурые и черные. Что принадлежит до разности, замеченной в черных шлаках, то она будет объяснена ниже.

Об отливе. Сей признак обнаруживается на поверхности сплавка, когда он будет вынут из тигля по достаточном остужении, а не в то время, когда металл может окисляться. На сплавках худого качества нет отлива, и вообще поверхность их негладка; но чем совершеннее металл, тем поверхности блестящее и тем отлив сильнее; он переходит из синеватого в золотистый, так что верхняя часть сплавка кажется позолоченной. Этот отлив не может быть приписан окислению металла с поверхности, ибо не имеет радужных цветов, а везде ровен, доказывая более свойства самого металла, нежели случайность. Это свойство обнаруживается независимо от степени твердости металла. Отлив может быть замечен и по шлаку, отливающемуся иногда лазоревым цветом. Таким образом булаты в отношении к отливу могут быть разделены на неотливающие и отливающие красноватым и золотистым цветами. Чем явственнее отлив и чем он более приближается к золотистому, тем совершеннее булат; а если булат низкого достоинства, то никакой способ вытравки не может придать ему этого свойства.

Все вышеупомянутые признаки, взятые в пределе совершенства, определяют предел совершенства в булате. Совершенный булат обладает следующими свойствами:

1) Совершенной ковкостью и тягучестью; в этом случае я разумею не то, что он куется столь же легко, как и мягкое железо, но удобно и чисто; скажу более: он может быть кован в холодном состоянии; 2) наибольшей твердостью по закалке; 3) наибольшей остротой и нежностью лезвия; 4) наибольшей упругостью и стойкостью при соответственных степенях закалки. Под словом стойкость я разумею свойство, зависящее от собственной твердости металла и той, которая приобретается закалкой. Прочие булаты обладают сими качествами в различной степени совершенства, смотря по тому, в какой мере каждый из трех признаков становится менее явственным.

Я не придаю азиатских названий каждому сорту булатов, ибо они не всегда определяют степень их достоинства, но полагаю за лучшее принять на русском языке названия, основанные на различии узоров.

Таким образом, булаты могут быть разделены на пять сортов, а именно: на полосатый, струистый, волнистый, сетчатый и коленчатый. Все они могут быть: а) с крупными, средними и мелкими узорами, б) серого, бурого и черного цветов и в) без отлива, с отливом красноватым и золотистым.

13) ЗАМЕЧАНИЯ О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ БУЛАТОВ

Химические разложения некоторых видов булата, произведенные Фарадеем и другими, показывают, что в них заключается более углерода, нежели в обыкновенной стали. Впрочем из этого не следует еще, чтобы все булаты заключали более углерода, нежели сталь; из опытов видно было, что узоры могут быть и на булатах весьма мягких; также видно было, что проявление узоров зависит не от присоединения каких-либо посторонних металлов, но преимущественно от выделения их. Из того следует, что совершенство булата зависит от чистоты железа и углерода, а твердость его от количества последнего. Железо, вступая в соединение со всеми началами, образует составы, можно сказать, беспредельно различные в свойствах; но из всех их без сомнения один углерод образует соединение, наиболее пригодное для удовлетворения нужд наших; а потому на примеси посторонних тел в железе остается смотреть как на пороки.

14) КРАТКОЕ ПОНЯТИЕ ОБ ОТНОШЕНИИ НАРУЖНЫХ ПРИЗНАКОВ К ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ БУЛАТОВ

Пока не сделано точного химического разложения главнейшим видам булатов, невозможно разделять их по количеству составных частей, да и едва ли скоро разложения будут так совершенны, чтобы определять в точности количество чистого железа и количество углерода. На первый раз я полагаю достаточным ограничиться наблюдениями, выведенными из опытов о булатах.

а) Крупность и явственность, или возвышенность над грунтом узоров определяет количество угля; а различное расположение их — различные степени совершенства в соединении угля с железом. Количество угля в самых крупных и явственных узорах может быть, кажется, одинаково с чугуном (до $^{5}/_{100}$) и при самых слабых и мелких со сталью (до $^{1}/_{100}$). В последнем случае чем крупнее узоры, тем менее они отличаются от грунта.

б) Грунт булатов и цвет самих узоров означают степень чистоты железа и углерода: чем он темнее и блестящее и чем узоры белее, тем чище металл; но при каком количестве и каких именно примесей цвет грунта сливается с цветом узоров и металл перестает быть булатом — это должны определить последующие изыскания.

в) Отлив. Опыты с различными графитами убедили меня, что и в самых булатах углерод находится в различном состоянии, и что в этом отношении прямой указатель есть отлив. По моим замечаниям, соединение собственно углерода с железом можно допустить токмо в булатах, имеющих золотистый отлив, как например, в табане и хорасане древних; а в тех, которые отливают красноватым цветом, заключается в углероде посторонняя примесь, как например в кара-табане; наконец, в тех, которые не имеют отлива, углерод приближается к состоянию обыкновенного угля. Такие булаты, при значительном количестве угля, бывают хрупки, как например многие кара-хорасаны.

15) О ПРИГОТОВЛЕНИИ БУЛАТОВ

Из описания всех опытов, предпринятых мною к отысканию тайны приготовления булатов, видно, что к достижению этой цели мною открыты четыре пути: сплавление железных руд с графитом, или восстановление и соединение железа с углеродом; сплавление железа при доступе углей, или соединение его предварительно с углеродом и восстановление его посредством закиси железа; или с помощью продолжительного отжигания без доступа воздуха; и наконец, сплавление железа непосредственно с графитом или соединение его прямо с углеродом.

Первый способ требует чистейших железных руд, не содержащих, кроме закиси железа, никаких посторонних примесей, в особенности серы. Но подобные руды встречаются чрезвычайно редко, притом и потеря в графите весьма значительна, а успех в насыщении железа углеродом не всегда в зависимости от искусства. Сверх того руды, по малой относительной тяжести, занимают более объема, нежели железо, и заключая в себе металла около половины своего веса, уменьшают количество продукта при одной вместимости с железом до $^1/_4$ и даже до $^1/_8$ при одних и тех же прочих расходах. Из этого видно, сколь сей способ дорого стоит.

Таким образом трудность отыскать в совершенстве первые материалы, случайность соединения железа с углеродом в надлежащей пропорции и дороговизна соделывает сей способ недоступным для введения в большом виде. Но он знакомит и со способом древних и с причиной драгоценности совершенных азиатских булатов, ибо древние скорее могли попасть на способ простой, нежели сложный. Употребление тиглей столь же древне, как и известность золота; ничего не могло быть ближе для древних алхимиков, как испытание плавкой всех тел, похожих по наружному виду на металлы, и в этом случае для них ближе было испытывать графит, нежели для нас, привыкнувших думать, что он не плавится и может быть полезен токмо в тиглях и карандашах.

Второй способ не мог быть введен в употребление по затруднительной ковке при значительном содержании углерода, что происходит, по моему мнению, от недостаточной чистоты кричного железа и от затруднения очистить оное совершенно помощью железной закиси. Железо может быть улучшено способом, употребляемым в Японии и вообще в Азии — продолжительным сохранением в воде или земле, а очищение угля едва ли будет столь совершенно, как в графите.

Третий способ введен уже в употребление; но как литая сталь для сохранения ковкости не может заключать много углерода, то она и составит особый разряд литых булатов, годных на выделку дешевых изделий; ибо пуд литого булата обходится около 10 рублей.

Четвертый способ, как почитаемы мною удобнейшим и соответственнейшим при наименьших расходах к получению настоящих булатов, составит предмет сей главы.

Приготовление булатов составляют следующие главнейшие работы: плавка, проковка, отковка изделий, закалка их, точка, полировка и вытравка.

Плавка

Различные смешения для получения булатов, степень жара, время плавки упомянуты в журнале опытов, почему здесь буду говорить только о тех обстоятельствах, которые не могли войти ни в журнал опытов, ни в самое описание их.

В обыкновенный тигель, уменьшенный в вышину, закладывается для булата токмо 12 фунтов железа, ибо увеличение сплавков сопряжено с затруднением в проковке. Вообще при закладке железа наблюдается правило: чем тверже должен быть металл, тем менее следует употреблять железа. Таким образом, количество его уменьшается до 10 и до 8 фунтов. На железо полагается состав, приготовленный из графита, железной окалины и флюса. Лучшие флюсы суть: горновой камень, получаемый при разломке доменного горна, и доломит. И тот и другой флюс с равной пользой могут быть употребляемы, но только не вместе взятые. В последнем случае выделение шлака из металла становится затруднительнее, вероятно потому, что тогда флюс сам по себе составляет правильное смешение для образования шлака. При употреблении кварца должно остерегаться излишнего прибавления окалины, а доломит сам по себе составляет легкоплавкий флюс, почему он не должен превысить $^1/_2$ фунта, в противном случае повредится тигель. Но если количество его будет соответствовать примеси в графите, то помощью доломита получается булат лучшего качества, нежели помощью кварца. Заложив материал в тигель, покрывают его глиняной крышей и пускают в печь дутье через шесток, как описано в сочинении о стали, в такой мере, чтобы жар был сильный, но чтобы из печи не вылетали мелкие угли. В это время ртутный духомер показывает от $^3/_4$ до 1 дюйма при сопле в один вершок в диаметре. По прошествии 3 $^1/_2$ часов металл обыкновенно бывает расплавлен и покрыт тонким слоем шлака, а над ним лежит часть графита, поднятого шлаком. Потеря в графите простирается в это время до $^1/_4$ фунта. Металл имеет слабые продольные узоры, светлый грунт, а если графит хорошего качества, то и отлив. Продолжая плавку 4 часа потеря в графите бывает до 36 золотников, металл получает узоры струистые. После 4 ½ часов потеря в графите простирается до 48 золотников, а узоры в металле волнистые, средней величины. В это время тигель начинает наклоняться в сторону, в таком случае продолжение плавки становится опасным и должно ее остановить. Но если наклонение тигля незначительно, то плавка продолжается еще $^1/_2$ часа. Тогда потеря в графите простирается до $^3/_4$ фунта,

и в металле появляются узоры сетчатого булата средней величины и шлаку накопляется до $^1/_2$ фунта. Когда замечено будет, что тигель хорошо простоял 5 часов, а колосники в печи не заплыли еще шлаком, так что дутье проходит в печь свободно, то продолжают плавку еще $^1/_2$ часа; в сем случае потеря в графите простирается иногда до 1 и более фунта, но весьма редко случается, чтобы его вовсе не оставалось, если положено было $1^1/_4$ фунт, а количество шлака простирается от $^3/_4$ до 1 и более фунта. Металл имеет более или менее крупные узоры, сетчатые, а иногда и с коленами. Но если графит не особенно хорошего качества, то полученный металл редко бывает возможно проковать. При употреблении графита от пассауских тиглей не должно употреблять более одного фунта, дабы металл имел ковкость, но узоры в таком случае будут средней величины, а если уменьшить количество графита до $^3/_4$ фунта, то получится сетчатый булат с мелкими узорами. Из хода плавки видно, что совершенство булатов, кроме состава, зависит от огнеупорности тиглей и стен самой печи. Итак, для получения совершенного булата, необходимы следующие условия:

1) Лучший уголь, дающий наименее шлаку, как например, чистый сосновый.

2) Плавильная печь, устроенная из самых огнеупорных кирпичей.

3) Огнеупорные тигли, не дающие ни малейших трещин ни в прогревке, ни во время самой плавки.

4) Лучшее железо, обладающее в высшей степени ковкостью и тягучестью.

5) Чистый самородный графит или лучший от тиглей.

6) Пожженный кварц или доломит.

7) Сильнейший жар во время плавки.

8) Наибольшее время плавки.

9) Медленное охлаждение тигля.

10) Наименьшее нагревание при ковке.

По окончании плавки, когда угли прогорят до основания, тогда останавливают дутье. Тигель оставляют в печи до тех пор, пока он остынет, или, по крайней мере, почернеет. Тогда, отбив крышу, высыпают остатки графита, разбивают шлак и вынимают сплавок, имеющий вид хлеба. Медленное охлаждение тигля необходимо более для предупреждения в нем трещин, когда металл еще не остыл, но что принадлежит до кристаллования булата, то он, находясь в тигле, не может вдруг охладиться, а выделяя теплоту через тигель, постепенно густеет и, наконец, получает твердость. При остывании булат получает поверхность или ровную, или на ней, около средины, заметно бывает хотя одно место с некоторым понижением, в котором кристаллы булата более видимы и между собою перепутаны. Это составляет так называемую усадку. Она бывает значительнее при булатах, не имеющих отлива, и в особенности твердых; но если в твердом сплавке, не имеющем блестящей поверхности, вовсе нет углубле-

ния, то она заключается внутри самого сплавка. Это доказывает, что такой булат скорее остывает снаружи, нежели внутри, и что он при застывании занимает больший объем, нежели в жидком состоянии. Все такие сплавки не могут быть прокованы, да и булат принадлежит к самому низкому сорту, хотя бы имел и крупные узоры. Главная причина этого явления заключается, по моему мнению, в количестве посторонних примесей, входящих в состав кристаллов, которые от них лишаются ковкости, а вместе с тем соделывают и самый металл нековким.

Проковка

Она производится под хвостовым молотком, весом до $2^1/_2$ пудов. Сплавок нагревают, при слабом дутье в горну, до светло-красного цвета, относят под молот и кладут на наковальню широким основанием. Проковку начинают на тихом ходу молота, поворачивая сплавок кругом в одну сторону. Эту работу производят два человека: один другому помогает, поворачивая клещами сплавок.

При первоначальной проковке повторяют нагревы от 3 до 9 раз. Если сплавок не получил трещин, то его рассекают на три части зубилами. При сих работах замечено: чем медленнее проковывается булат и чем чище отсекается, тем он лучше.

Разрубленные части идут опять в ковку под молот, где их сначала проковывают в правильные бруски, а потом в полосы: чем медленнее стынет металл под молотом, тем выше его достоинство. Лучшие булаты, несмотря на твердость, проковываются из бруска в полосу с двух нагревов. Я пробовал ковать некоторые без нагрева и они тянулись, не получая трещин, и во время ковки нагревались докрасна. Если часть полосы нагреть добела, то при твердом булате она лишается ковкости и рассыпается, а при мягком теряет узоры. Таким образом твердый булат переходит от перегревки прямо в чугун, а мягкий в сталь, которая при дальнейших перегревах также получает седины. Из этого видно, что при проковке булатов ни один нагрев не должен быть оставляем без внимания и точного доведения до той степени жара, при которой узор не теряется; также видно, почему никакая сталь не должна перегреваться при ковке.

Европейские кузнецы, кажется, вообще менее знакомы с переменой свойств стали при ковке, нежели азиатские, ибо не имеют в виду ясных признаков ее изменения, но когда начнут обрабатывать булат, то скоро поймут недостатки своих прежних знаний в этом деле, и тогда всякий будет знать, что потеря узоров во время ковки есть порча металла, составляющая вину кузнеца.

Ковка изделий

Булат, прокованный в полосы, имеет небольшие неровности и поверхностные плены, происходящие от неровностей при застывании сплавка. Чтобы не подвергаться сомнению насчет чистоты

откованных изделий, то лучше полосы предварительно обтачивать и оставлять на них знаки, по которым бы можно было узнавать нижнюю и верхнюю кромку сплавка: ибо нижняя кромка всегда заключает более правильности в узорах нежели верхняя, и потому должна поступать на лезвие изделия. Приемы при ковке наблюдаются те же самые, какие и при всякой другой стали, только нагревать должно сколь возможно менее и не более мясно-красного цвета; а окончательная ковка, или наклепка, не требует и этой степени жара, а довольно, если металл будет нагреваться до вишнево-красного цвета

Калка

Всякий булат, или вообще всякая сталь, нагретая и мгновенно охлажденная, приобретает наибольшую твердость, но вместе с тем и хрупкость, подобную стеклу. Эта хрупкость лишает возможности употреблять сталь при наибольшей ее твердости; ибо немного есть изделий, при употреблении которых давление на сталь так мало, что не превосходит остающейся после закалки связи в частях: это суть исключительно слесарские пилы. Оттого они имеют наибольшую твердость против всякого изделия, из того же материала приготовленного. Итак, не удивительно, если пила будет крепче топора, а сей последний крепче незакаленного булата. Для уменьшения хрупкости и для сохранения по возможности твердости, приобретенной закалкой, искусство нашло средство в нагревании закаленной стали, но гораздо слабейшим нежели употребляется при закалке. По мере нагревания связь в частях увеличивается, а твердость уменьшается. Предназначение изделия определяет меру нагревания, а появляющиеся на металле цвета служат признаками для определения самой меры. Нагревание закаленной стали называется отпуском и главнейшие степени его по цветам суть: желтый, фиолетовый, синий и зеленый. Желтый цвет означает самую малую, а зеленый самую большую степень отпуска, при которой упругость металла начинает теряться.

Изделия, требующие наибольшей стойкости, отпускаются до соломенно желтого цвета; а изделия, требующие наибольшей упругости, до синего цвета. Но если металл невысокого достоинства, то в первом случае стараются поправить его недостатки фиолетовым, а в последнем зеленым цветами. Впрочем бывают случаи, где оба сии цвета соответствуют роду изделий, например, первый при отпуске зубил, а последний при отпуске кос, долженствующих удобно отбиваться в холодном состоянии.

Булаты не очень твердые закаливаются, смотря по роду и предназначению изделий, или в сале, или в воде, а самые твердые из них преимущественно в сале. Оружие всякого рода достаточно закаливать в сале, предварительно нагретом почти до точки кипения, ибо дознано из опытов, что в горячем сале закалка бывает тверже; в сем случае сало, имея более жидкости, и скорее

обращаясь около погруженной в него накаленной вещи, скорее ее охлаждает Нагрев откованную вещь докрасна, погружают ее в горячее сало и, дав ей время остыть, вынимают, обтирают и с одной стороны вычищают точильным камнем для удобнейшего наблюдения за цветом отпуска. Потом снова немного нагревают над углями и наблюдают за появлением цветов; например, при закалке сабельного клинка у ручки отпускают до зеленого цвета, у конца до синего, а в середине до фиолетового, стараясь, чтобы на месте удара у лезвия оставался желтый цвет. Клинок, таким образом отпущенный, выправляется острым молотком и еще горячий погружается в холодную воду. Подобным образом закаливается всякое булатное оружие. Но если хотят вместо наибольшей стойкости придать оружию наибольшую упругость, то в таком случае отпуск делается ровный, как в середине, так и в конце клинка синего цвета. Для увеличения твердости лезвия, полезно саблю по лезвию обтирать пилой; ибо вообще тонкая вещь тверже закаливается, чем толстая. Некоторые булатные инструменты и бритвы закаливаются в воде подобно стальным [1].

Точка и полировка

Хотя обе сии работы производятся совершенно сходно со стальными изделиями, но я почитаю не излишним упомянуть здесь о некоторых предосторожностях при точке и полировке изделий, требующих особенной остроты и стойкости, тем более потому, что они вообще малоизвестны: обтачивание на песчаных камнях или точилах имеет влияние на степень закалки изделий, особенно тонких. Если обтачивают на сухих точилах клинки, то принуждены бывают поправлять упругость, первоначально данную, вторичным нагреванием после точки до синего цвета и погружением их в воду, что называется у нас неправильно зеленением, вместо синения (das Blauen).

Причина введения этой работы заключается в том, что во время точки клинки нагреваются местами так сильно, что приобретают зеленый цвет, показывающий такую степень отпуска, при которой сталь теряет упругость, ибо сие свойство обнаруживается в высшей степени токмо при синем цвете. Но как многие вещи при употреблении требуют большей прочности лезвия, нежели упругости, то и должны иметь меньшую степень отпуска, а именно до соломенного цвета. При обточке сих последних еще более следует обращать внимание на сохранение данного им первоначального отпуска, нежели при клинках. Это достигается обточкой на мокрых точилах, на которые беспрерывно течет вода. Но если приток воды будет недостаточен, а вещь сильно придавится к точилу, то предосторожность соделывается бесполезной

[1] А другие, как например косы, достаточно закаливать в быстрой струе воздуха.

и вещь, например бритва, несмотря на остроту металла, потеряет стойкость, или скоро будет тупиться. Это составляет одну из главнейших причин, почему бритвы из одного материала выходят не одного достоинства. Полировка имеет также подобное влияние на достоинство тонких изделий. Если к полировочному кругу приложена будет вещь на некоторое время одним местом, то она получит излишний отпуск, трудно замечаемый; ибо наждак, помощью которого производится полировка, в то же время уничтожает появляющийся синий цвет. Для избежания отпуска полировщик должен беспрестанно двигать по кругу полируемую вещь и отнюдь не допускать, чтобы она согревалась. При наведении высокого полира еще чаще встречаются отпуски в тонких частях, а именно, по самому лезвию. В бритвах это составляет невозвратную потерю. Почему на вещах, требующих остроты и стойкости лучше не наводить вовсе высокого полира, нежели наводить с малой осторожностью. При булатных изделиях он и не нужен, ибо по вытравке не улучшает ни грунта, ни узоров, а достаточно, если вещь выполирована мелким отмученным в воде наждаком с маслом.

Вытравка

Из описания наружных признаков булатов видно, что вытравка составляет необходимую их принадлежность: без нее или весьма трудно, или совершенно невозможно определять с точностью достоинство булатов. Все кислоты, обнаруживающие действие на железо, обнаруживают оное и на булат; но чтобы его вытравить или обнаружить узоры, необходимо избрать такую, которая бы скорее действовала на грунт, нежели на узор. Хотя с первого взгляда кажется, что здесь главное основание состоит не в выборе собственно кислоты, но в уменьшении ее действия до такой степени, чтобы она разъедала токмо грунт, а не узоры, которые более противятся растворению по связи между атомами. Но не все кислоты могут быть употреблены для вытравки с равным успехом, ибо действие их на булат неодинаково. Главное различие заключается в том, что одни из них более обнаруживают действия на железо, а другие и на железо и на углерод. Первые, растворяя железо, оставляют углерод в том состоянии, в каком он в металле заключается, а последние изменяют его. Таким образом, азотная кислота, растворяя железо, изменяет и углерод, лишая грунт блеска и отлива, свойственных булату; напротив того, серная кислота, растворяя железо, долее оставляет в грунте блеск и отлив без повреждения, особенно когда она находится не в виде разведенной кислоты, а в соединении с сернокислой солью, как например, с железным купоросом. Персидский железный купорос, содержащий, кажется, часть сернокислой глины, почитается лучшим средством для вытравки клинков. Для составления протравы он предварительно кипятится с водой в свинцовом сосуде. На один штоф воды употребляют до $^1/_4$ фунта купороса.

Вытравляемый клинок должен быть совершенно чист и свободен от масла или других жирных частей; клинок предварительно очищают мелкой золой с водой или щелоком, обмывают в чистой воде и потом или опускают в теплый раствор, или им часто поливают, держа клинок над сосудом с раствором. Когда узоры и грунт обнаружатся, то вынимают клинок, обмывают несколько раз щелоком и холодной водой и потом с возможной скоростью обтирают клинок досуха, стараясь как можно слабее прикасаться сухой льняной ветошью к клинку. Весь процесс вытравки продолжается не более 10 минут, а иногда и менее, ежели раствор купороса крепок.

Узоры на булате появляются весьма скоро, но вытравку продолжают еще несколько времени, дабы они резче отличались от грунта, который, теряя следы полировки, приобретает свойственный металлу цвет и отлив. Но если продолжать вытравку долее надлежащего, то грунт начинает терять блеск, а узоры цвет; весь металл потемнеет и, наконец, не видно будет самих узоров. Чистка золой хотя откроет снова узоры, но грунт будет сильно протравлен и получит матовую поверхность. Почему, если металл при первом действии кислоты не обнаружит ни узоров, ни темного грунта, ни отлива, то невозможно придать ему сих свойств повторительной или продолжительной вытравкой. Во время вытирания клинка должно в особенности остерегаться, чтобы вытертое досуха место не было тронуто сырой ветошью, ибо на этом месте появится радужная набежалость, вредящая красоте клинка. Вообще травление есть искусство, требующее навыка.

Не всякий железный купорос равно годен для вытравки; кроме выветривания самое качество его имеет влияние на успех вытравки. Опыты над вытравкой булатов растительными кислотами показали, что некоторые из них обнаруживают узоры столь же хорошо, как и купорос, а самый способ вытравки гораздо проще. Стоит только намачивать вещь лимонным соком или обыкновенным пивным уксусом, так чтобы он не подсыхал, и, когда узоры обнаружатся, вымыть холодной водой и обтереть досуха ветошью. Вытравляемые клинки смазываются чистым деревянным маслом и снова вытираются досуха, после чего они менее подвергаются ржавчине, хотя бы лежали в сыром месте. Вообще вытравка способствует к предохранению булатов от ржавчины.

16) О ЦЕННОСТИ БУЛАТОВ И УПОТРЕБЛЕНИИ ИХ

Описанный мною способ приготовления булатов, будучи сравнен со способом дела литой стали в большом виде, показывает меру расходов, не входя в разбор всех мелочей. Таким образом, приняв за основание, что литая сталь обходится со всеми расходами как цеховыми, так и накладными или общими, в 10 рублей пуд, булат будет стоить 40 рублей, ибо его приготовляется в тех же печах вчетверо менее. Сверх того на графит, возможно луч-

шего качества, потребуется до 2 рублей на пуд, полагая каждый фунт графита по 50 копеек. Вся ценность булата будет простираться с проковкой до 50 рублей, или до той цены, по которой продается английская литая сталь.

Может быть, спросят меня: что же лучше — булат или английская сталь? На этот вопрос я повторю прежде выведенные правила: 1) что булат лучше всякой стали, из которой он приготовлен; 2) что английская сталь может быть, по предложенному мною способу, также обращена в булат и 3) что этот булат будет весьма посредственен. Он обнаружит мелкие узоры и то не прежде, как при вытравке. Таким образом, все булаты, обнаруживающие узоры в полосах при точке и полировке без предварительной вытравки, должны быть предпочтены английской литой стали. Сверх того, те булаты, которые, при мелких узорах, будут иметь грунт и отлив выше английской стали, будут выше и по внутреннему достоинству. Эти краткие технические правила, основанные на результатах исследований о булатах и стали, не требуют, кажется, дальнейших пояснений.

Здесь скажу только, что известия, сообщенные нам путешественниками о достоинстве некоторых азиатских булатов, отнюдь не столь преувеличены, как многим из новейших металлургов до сего времени казалось [1]: ибо после того, что мною сказано о различии булатов от стали, каждому будет понятно и различие в достоинстве их. Итак, если коленчатым или сетчатым булатом с крупными узорами и золотистым отливом перерезывают легко на воздухе газовый платок, то тут ничего нет преувеличенного: моими булатами я мог делать то же самое. Но острота изделий из английской литой стали для произведения подобной пробы недостаточна. Самое большое, чего я мог достигать клинком из английской литой стали, состоит в нарезании шелковой материи. Если булатами перерубают кости, гвозди, не повреждая лезвия, то и в этом случае есть истина; но необходимо, чтобы сабля была из хорошего булата, чтобы она была закалена и отпущена соответственно пробе. Хороший булатный клинок, одинаково закаленный со стальным, всегда его надрежет или надрубит, и сам не повредится, а посредственные, как некоторые хорасаны, хотя и надрубят, но при сильном ударе скоро могут изломаться. Шпажный клинок, из хорошего булата приготовленный, правильно выточенный и соответственно закаленный, как оказалось по моим опытам, не может быть при гнутье ни сломан, ни согнут до такой степени, чтобы потерял упругость; при обыкновенном гнутье он выскакивает и сохраняет прежний вид [2]. Это есть без сомнения предел

---

[1] Manuel complet du travaux des métaux traduit de l'anglais par Vergnaud, 1835.

[2] А при усиленном, например, наступив на конец ногой и загибая его под прямым углом, он не сломается и будучи выправлен, не потеряет прежней упругости; при этой связи в частях, булатный клинок может быть тверже всякого клинка, приготовленного из стали.

совершенства в упругости, которого в стали не встречается. Бритва из хорошего булата, без ошибок приготовленная, выбреет по крайней мере вдвое более бород, нежели лучшая английская, предполагая, что и та, и другая, будучи острыми, не будут поправляемы на ремне во время бритья. Вообще можно сказать, что изделия, требующие остроты и стойкости, должны быть приготовляемы предпочтительно стали из твердого булата, т. е. из такого, которого узоры видны без предварительной вытравки, а изделия, требующие преимущественно упругости, из мягких. Само собою разумеется, что и те и другие должны быть по возможности совершенны и не заключать одних продольных узоров.

Оканчиваю сочинение надеждой, что скоро наши воины вооружатся булатными мечами, наши земледельцы будут обрабатывать землю булатными орудиями, наши ремесленники выделывать свои изделия булатными инструментами; одним словом, я убежден, что с распространением способов приготовления и обработки булатов, они вытеснят из употребления всякого рода сталь, употребляемую ныне на приготовление изделий, требующих особенной остроты и стойкости.

ОГЛАВЛЕНИЕ О БУЛАТАХ

1) Исторические сведения . . . . . .
2) Общие понятия о булатах . . . . . .
3) Устройство для приготовления булатов . . . . . .
4) О первоначальных опытах и о влиянии на железо алюминия, силиция, магния и кальция . . . . . .
5) Влияние на сталь некоторых металлов, как-то: марганца, хрома, титана, серебра, золота и платины
6) Влияние на сталь качества железа . . . . . .
7) Влияние на сталь воздуха . . . . . .
8) О первых опытах получения булатов . . . . .
9) О влиянии на железо различных тел, углерод содержащих . . . . . .
   а) тел растительных . . . . . .
   б) животных . . . . . .
   в) чугуна . . . . . .
   г) ископаемых . . . . . .
10) О влиянии на качество булата различного рода графитов . . . . . .
   А) Графита от тиглей темного . . . . . .
   Б) Графита от тиглей светлого . . . . . .
   В) Графита от тиглей, бывшего в плавке . . .
   Г) Графита самородного Миасского и Кумберландского в Англии . . . . . .
   Д) Графита с прибавлением алмаза . . . . . .
11) О превращении литой стали в булат и о способе, введенном в большом виде для улучшения оной
   а) Устройство печи . . . . . .
   б) Процесс отжигания . . . . . .
   в) Влияние на сталь состава крыши . . . . . .
   г) Сравнение литой стали обыкновенной с отожженной . . . . . .
12) О признаках булатов . . . . . .
   а) Об узоре . . . . . .
   б) О грунте . . . . . .
   в) Об отливе . . . . . .
13) Краткие замечания о химическом составе булатов
14) Краткое понятие об отношении наружных признаков к химическому составу булатов . . . . .
15) О способе приготовления булатов . . . . . .
   а) О плавке . . . . . .
   б) О проковке . . . . . .
   в) О ковке булатных изделий . . . . . .
   г) О закалке их . . . . . .
   д) О точке и полировке . . . . . .
   е) О вытравке . . . . . .
16) О ценности булатов и употреблении их . . . . .

КНИГА ВТОРАЯ

ЖУРНАЛ
ОПЫТАМ, ПО ПРИГОТОВЛЕНИЮ ЛИТОЙ СТАЛИ И БУЛАТОВ. С КРАТКИМИ ЗАМЕЧАНИЯМИ

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
	1828 года Марта				
1	Рафинированной стали	5	1	—	Тигель повредился, а металл не расплавился, что приписано жидкости шлака; почему к стеклу прибавлено кирпичной глины.
	Флюсу: бутылочного стекла	1/2			
2	Рафинированной стали	5	1	10	Сплавилась хорошо, но, по выливке в форму, не сковалась. По обточке оказалось много пузырей. Приписано доступу воздуха.
	Флюсу: глины 1/4, стекла 3/4	1/2			
3	Рафинированной стали	5	1	15	Сплавилась, форма смазана салом; по обточке оказалась плотнее прежней, но не сковалась. Приписано приобретению излишнего углерода или излишней твердости.
	Флюсу: глины 1/4, стекла 3/4	1/2			
4	То же	5	1	—	Повредился тигель, приписано жидкости шлака.
	Флюсу	1/2			
5	Рафинированной стали	5	1	5	Сплавилась, но не сковалась; приписано излишней твердости.
	Флюсу: глины 1/4, стекла 3/4	1/2			
6	Рафинированной стали	4	1	15	Сплавилась и хотя не чисто, но проковалась. Прежнее предположение отчасти подтвердилось.
	Железа	1			
	Флюсу: глины 1/4, стекла 1/4	1/2			

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
7	Рафинированной стали	$3^1/_2$	1	20	Ковалась, но также пленовата.
	Старой сплавки .	1			
	Железа	$^1/_2$			
	Флюс прежний . .	$^1/_2$			
8	Рафинированной стали	$3^1/_2$	1	20	Ковалась, но отчасти не проварна. По вытравке слабой серной кислотой, на ней оказались узоры.
	Старой сплавки .	1			
	Железа	$^3/_4$			
	Флюс прежний . .	$^1/_2$			
9	Старых сплавков .	$7^1/_2$	1	45	Тигель получил трещину, но вылитая сталь ковалась легко.
	Железа	$1^1/_2$			
	Флюса	1			
10	Рафинированной стали	$4^1/_2$	1	20	Дутье ровное; ковалась, но при малом нагреве и медленно. По испытанию оказалась твердой и годной на тонкие инструменты. По вытравке слабой серной кислотой, на ней оказались узоры.
	Железа	1			
	Платины	$^5/_{96}$			
	Флюсу	$^1/_2$			
11	Старых кусков . .	$8^1/_2$	1	35	Сначала ковалась, а под конец получила трещины.
	Рафинированной стали	$^1/_2$			
	Железа	1			
	Флюсу	$^3/_4$			
12	Рафинированной стали	$4^1/_2$	1	45	Часть вытекла, остальная не сплавилась.
	Железа	$^3/_4$			
	Флюса	$^1/_2$			
	Платины	$^5/_{96}$			
13	Рафинированной *стали*	$2^1/_2$	1	27	Ковалась медленно, но довольно чисто, и свойствами подобна № 10.
	Остатков с платиной	4			
	Железа	$^3/_4$			
	Флюса	$^3/_4$			
14	Рафинированной стали	$7^1/_2$	1	10	Не сковалась.
	Старых остатков с платиной 1 фунт, в которых платины 1 золотник				
	Добавлено платины	$1^1/_2$ зол.			
	Железа	1			
	Флюса	$^3/_4$			

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
15	Рафинированной стали	$4^1/_2$	1	20	Ковалась хорошо, но тверда, при закалке поверхность темнее; весьма хороша по остроте и стойкости. Узоры явственнее прежних, но различны от булатных.
	Железа	$^3/_8$			
	Платины	$^{10}/_{96}$			
	Флюса	$^1/_2$			
16	Цементной стали .	5	1	10	Не сковалась.
	Флюса	$^1/_2$			
17	Цементной стали .	5	1	35	Трудно ковалась; в изломе слоевата. По вытравке оказались мелкие, но чистые узоры, довольно тусклые.
	Рафинированной .	5			
	Флюса	1			
18	Платинистых остатков, в которых платины до $^1/_2$ зол. .	5	1	40	Не очень крепка и плавилась хорошо. Откованный из этой стали клинок имел хорошие качества и выдержал установленные пробы. По вытравке на нем оказались местами мелкие желтоватые узоры, а местами облачные светлые. Первые приписать должно алюминию, а последние малому количеству платины.
	Рафинированной стали	4			
	Железа	1			
	Флюса	1			
					Примечание. Клинок этот подарен знаменитому путешественнику барону Гумбольдту, бывшему в это время в Златоусте.
19	Рафинированной стали	8	1	40	Ковалась хорошо, но по закалке не очень крепка. Зубила при насечке пил садятся.
	Железа	2			
	Флюса	1			
	Примечание. Вместо кирпичной глины употреблена белая; флюс составлен из 2 частей по весу глины и 1 стекла.				
20	Рафинированной стали	8	1	35	Не расплавилась и тигель повредился.
	Железа	2			
	Флюса	1			

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
21	Рафинированной стали . . . . . . Флюса	10 3/4	1	45	Сплавилась хорошо, а по вылитии в форму трудно ковалась и частью пленилась. По вытравке узоры несколько различны от предыдущей, что приписано присутствию магния, ибо в белой глине заключается часть тальковой земли. Зубила не стойче прежних.
22	Рафинированной стали . . . . . . Флюса	10 1	1	40	Часть стали вытекла, а часть не расплавилась.
23	Рафинированной стали . . . . . . Железа . . . . . Флюса	8 2 1	1	45	Сковалась и свойствами подобна прежней.
24	Железа . . . . . Флюса	10 3/4	1	20	Повредился тигель.
	Примечание. Для улучшения ковкости стали счел полезным прибавлять железной закиси или окалины; флюс составлен из 2 частей белой глины, 1 части стекла и 1 части окалины.				
25	Рафинированной стали . . . . . . Флюса	10 1	1	55	Ковалась удобно и в свойствах улучшилась. Узоры слабые. Зубила довольно стойки.
26	Железа . . . . . Флюса	10 1	1	50	Сталь подобна предыдущей. Сей опыт доказывает, что углерод приобретается железом во время плавки.
	Примечание. Вместо белой глины для испытания взят толченый обожженный горновой камень.				
27	Рафинированной стали . . . . . . Флюса	10 1	1	45	При выливке цвет казался белее прежних, весьма мягка в ковке, но зубила садятся. Узоры слабы и различны от предыдущих по виду и цвету, т. е. белее.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
28	Железа	10	1	40	Подобна предыдущей, но несколько тверже.
	Флюса	3/4			
	Примечание. Вместо кварца употреблена известь.				
29	Железа	10	1	15	Трудно ковалась и частью пленилась; в закалке не очень тверда. По вытравке оказались обличные узоры, по цвету близкие к серебру.
	Флюса	1			
					Примечание. Висмар справедливо замечает, что всякая сталь, получаемая с землистыми флюсами, имеет узоры. Но из опытов сих видно, что от прибавления окалины они уменьшаются, а сталь улучшается.
30	Примечание. Для уменьшения узоров взят доменный шлак, вместо кварца, а прочее попрежнему.				
	Железа	10	1	50	Ковалась хорошо. Узоры едва приметны. Зубила стойки, и вообще сталь оказалась хороших качеств.
	Флюса	1			
31	Примечание. Флюс составлен из 2 частей доменного шлака и 1 части окалины.				
	Железа	10	1	45	Подобна предыдущей, но тигель несколько повредился от действия шлака; почему сей флюс оставлен.
	Флюса	1			
					Примечание. В сем году опыты относились более до приготовления больших тиглей и устройства печей.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
	1829 года				
32	Железа	20	3	20	Сталь удобно куется, имеет узоры, но при ковке тонких изделий получает трещины, почему флюс должен быть изменен.
	Флюса	2			
	Примечание. Флюс составлен из 3 частей кирпичной глины, $1^1/_2$ частей стекла и $^1/_2$ окалины.				
33	Примечание. Флюс составлен из 3 частей глины, $1^1/_2$ части стекла и 1 фунта окалины.				
	Железа	20	3	40	Весьма удобна в ковке, стойка, не очень тверда.
	Флюса	$2^1/_2$			
34	Рафинированной стали	20	3	45	Куется хорошо, стойка на зубилах, тверже предыдущей.
	Флюса	$2^1/_2$			
35	Рафинированной стали	40	4	—	Сталь оказалась годной на зубила и могла заменять английскую.
	Флюса	5			
					Примечания: 1) Сей опыт повторяем был несколько раз и постоянно имел успех, если сталь была вылита во время. 2) Опыты сплавления стали и железа с флюсом показали: 1) что при одном и том же флюсе количество углерода в стали зависит от количества флюса: чем его более, тем сталь будет мягче, но тем долее плавится; 2) чем жиже флюс, тем скорее она расплавляется, но тем удобнее повреждается тигель; 3) что железо цементуется в то время, когда флюс, расплавясь, опустится на дно, и поднимается вверх по мере расплавления стали; 4) что плавка должна быть останавливаема, когда металл жидок, но когда под шлаком еще заметны кусочки металла.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
	1830 года				
	Определения влияния некоторых металлов на сталь				
	1) Марганца				
36	Железа . . . . . Флюса . . . . . . Марганца	20 3 20/96			Несколько крепка, на ноже по вытравке обнаружились узоры, а грунт темнее, нежели на обыкновенной стали.
37	Железа . . . . . Марганца . . . . Флюса	20 30/96 3	3	25	Лучше прежней, но зубила несколько выкрашиваются. На ноже узоры явственнее прежних.
38	Стали рафинированной . . . . . . Марганца . . . . Флюса	20 20/96 3	1	30	Ковалась хорошо, зубила весьма стойки.
39	Стали рафинированной . . . . . . Марганца . . . . Флюса	40 20/96 5	3	55	Несовершенно сплавилась.
40	Стали рафинированной . . . . . . Марганца . . . . Флюса	40 80/96 4½	4	15	Зубила несколько выкрашивались, но сталь весьма хороша и по ковкости и по остроте. На ноже грунт темнее прежнего, а узоры еще явственнее.
41	Рафинированной стали . . . . . . Марганца . . . . Флюса	20 1 3			Ковалась хорошо, при разломке бруска оказались слои, притом и самая сталь раскололась надвое. По расколу цвет металла белый, подобный цинку, на ноже оказались мелкие явственные зоры. Зубила крашиваются.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
					Примечание. Из сих опытов следует заключить, что и марганец, подобно алюминию, имеет вредное влияние на сталь, хотя не в такой мере, как последний. Если некоторые металлурги почитают необходимым для получения хорошей стали присутствие марганца в железных рудах, то, он, вероятно, приносит пользу другим путем, а не присоединением к чугуну или стали.
	2) Хрома				
42	Железа	24			Весьма хороша в ковке, но зубила несколько выкрашиваются. На ноже узоры красивые, но слабые.
	Хромистого железа (Поляковского рудника)	$^{48}/_{96}$			
	Флюса	$3^{1}/_{2}$			
43	Железа	24			Сплавилась и ковалась хорошо. Зубила довольно стойки, но если выламываются, то сильно, и даже колятся от ударов пополам. В расколе цвет синеватый; на ноже узоры мелкие, цветом подобные платине, но расположены иначе. Эта сталь принимает хорошую полировку.
	Хромистого железа	1			
	Флюса	3			
					Примечание. Сих опытов, казалось мне, достаточно для ознакомления с влиянием хрома на сталь.
	3) Тит				
44	Железа	24			Ковалась хорошо. Зубила несколько выкрашиваются. Узоры на ноже местами красивы, а местами продолговаты.
	Титанистого железа (ильменского) .	$^{48}/_{96}$			
	Флюса	3			
45	Железа	24			Ковалась хорошо. Зубила оказались стойки, следовательно лучше прежней.
	Титанистого железа	$^{24}/_{96}$			
	Флюса	3			

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
46	Железа	24			Ковалась хорошо. Зубила довольно стойки, на ноже узор ровный, мелкий. Грунт по цвету приближается к фиолетовому. Нож острее других.
	Титанистого железа	3			
	Флюса	1			
47	Железа	24			Зубила стойки, но сильно выкрашиваются; узоры на ноже близки к самым мелким булатным.
	Титанистого железа	2			
	Шлаку	3			
					Примечания: 1) Сии опыты доказывают, что титан менее вредит стали, нежели марганец и хром, хотя и не может составлять причины образования узоров в булатах. 2) Впоследствие времени, по хранящимся у меня образцам, я мог заметить, что сталь с металлами от земель и полуметаллами более подвержена ржавчине, нежели чистая. В отношении сего свойства они следуют, кажется, сему порядку: кальций, силиций, магний, алюминий, марганец, хром и последний титан.
48	Железа	24			Ковалась хорошо; зубила несколько выкрашиваются. На ноже оказались мелкие разнородные узоры, по которым можно было судить о присутствии разных металлов.
	Титана	24/96			
	Хрома	21/96			
	Марганца	24/96			
	4) Серебра				
49	Железа	24	3	75	Ковалась хорошо; зубила стойки; на вытравленном кинжале местами продольные белые полоски; грунт серый.
	Очищенного серебра	9/96			
	Шлаку	3			

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
50	Железа . . . . . Серебра . . . . Шлаку	12 $^{9}/_{96}$ $1^{1}/_{2}$	3	75	Ковалась медленно, но чисто. Зубила стойкие, тверже прежних. На приготовленном из нее кинжале полоски светлее и явственнее, но также неправильно расположены и показывают, что серебро как бы неохотно вступает в химическое соединение со сталью. Грунт стали белее обыкновенной. Примечание. Ковкость при значительной степени твердости показывает, что прибавление серебра более полезно, нежели полуметаллов. Сверх того замечено впоследствии, что она менее подвержена ржавчине.
	5) Золота				
51	Железа . . . . . Золота . . . . . Флюса	4 $^{2}/_{96}$ $^{1}/_{2}$	1	15	Ковалась весьма удобно, зубила садились. Откованные, закаленные и выполированные два клинка имели упругость недостаточную. По вытравке на них узоров никаких не оказалось; присутствие же золота заметить можно было только по желтоватому цвету грунта.
	6) Платины				
52	Железа . . . . . Платины . . . . . Флюса	24 $^{12}/_{96}$ 3	3	30	Медленно ковалась; тверда, но зубила стойки, бритвы остры. Но при закалке некоторые из них получили трещины. Эта сталь принимает хорошую полировку и по вытравке имеет мелкие не везде однообразные узоры, различные от той платинистой стали, которая получалась без прибавления окалины.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин	
	1831 года				
53	Златоустовского железа	40	4	10	Мягка в ковке, тверда по закалке. Зубила стойки, ими насекали до 4 пил.
	Флюса { кирпичн. глины 3 окалины 1/2 . . .	4			
54	Рафинированной стали	40	4	20	Сходна с предыдущей и в ковке и в закалке, зубила несколько стойче предыдущих, до 5 пил.
	Флюса	4			
55	Саткинского железа	40	4	25	Мягка в ковке и не очень тверда по закалке. Зубила скоро садились на первой и второй пиле.
	Флюса	4			
56	Саткинского железа	40	4	15	Зубила оказались стойкими подобно златоустовскому железу, ими насекали от 3 до 4 пил.
	Флюса	4			
57	Тагильского мягкого железа	40	4	25	По отковке полосы чище златоустовских; зубила не уступали английским; ими насекали до 6 пил, узоры мало приметны.
	Флюса	4			
58	Тагильского железа со сталеватой сыпью	40	4	15	Сталь в ковке чиста, тверда; зубила хотя и были годны, но часто выкрашивались. Узоры приметны.
	Флюса	4			
59	Навивного златоустовского железа, нарочно для опыта приготовленного . .	40	5	45	Ковалась хорошо, полосы чисты; по закалке не очень тверда; зубила стойки, но уступают тагильским.
	Флюса	4			Примечание. Из сих опытов видно: чем мягче железо, тем оно труднее плавится, но качество стали не улучшается в той же мере.
60	Старых железных обсечков, собранных из земли близ кузниц	40	4	35	И в ковке и в закалке оказалась весьма хорошей. Зубила не уступали английским, в изломе более обыкновенной. Оказалась годной на другие инструменты, как-то на резцы.
	Флюса	4			

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
61	Старых заржавленных пил из рафинированной стали Флюса	40 4	4	20	Ковалась довольно хорошо. Но зубила выкрашиваются.
62	Старых железных обсечков из земли . Флюса	40 4	2	45	Не вся расплавилась, но вылитая в форму оказалась весьма мягкой в ковке и годной на зубила. Узоров нет, а сталь представляет ровную матовую поверхность. Примечание. Вместо флюса употреблена глиняная крыша.
63	Железных обсечков . . . . . . Без крыши . . . С крышей	40 — —	 2 1	 45 —	Сталь осела в тигле примерно на 3 дюйма. Проба стали производилась не снимая крыши в отверстие, сделанное сбоку. По выливке не сковалась.
64	Железных обсечков . . . . . . Без крыши . . . С крышей	40 — —	 2 1	 15 20	Сталь осела в тигле, без крыши, на 2 дюйма; ковалась хорошо, зубила несколько выкрашиваются.
65	Железных обсечков . . . . . . Без крыши . . . С крышей	40 — —	 2 2	 10 —	Сталь опустилась на 1½ дюйма примерно, ковалась весьма удобно. Зубила довольно стойки. Узоров не оказалось.
66	Обсечков рафинированной стали . . Без крыши . . . С крышей	40 — —	 2 2	 5 10	Куется весьма хорошо. Зубила лучше предыдущих; узоров не приметно.
		—	4	15	
67	Тагильского железа . . . . . . Без крыши . . . С крышей	40 — —	 2 2	 10 15	Ковалась весмьа хорошо. Зубила не уступают английским. Узоров не видно.
		—	4	25	

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
68	Златоустовского мягкого железа . .	40	4	30	В ковке хороша; в закалке тверда; откованная полоска шириной в 4 линии, толщиной 1 линию, длиной 8 вершк., будучи одним концом завинчена в тисы и загибаема в обе стороны, сломалась на 9 обороте. Зубила выдерживают 3 и 4 пилы; в полировке чиста, грунт бурый. Узоры едва приметны в микроскоп.
69	Сталеватого, но проварного железа .	40	4	26	Ковалась хорошо; в изломе серого цвета; в закалке тверда; пробная полоска выдержала 8 оборотов. Зубила стойки, но несколько выкрашиваются. В полировке чиста; грунт светлобурый. Узоры местами приметны. Сталь несколько тверже предыдущей.
7	Навивного железа	40	5		В ковке мягка; в изломе более предыдущей; в закалке тверда. Пробная полоска выдержала 9 оборотов. Зубила стойки, но отчасти садятся на 3 и 4 пиле. В полировке весьма чиста; грунт темный, но не бурый, узоры едва приметны.
71	Навивного железа	40	5	15	Подобна предыдущей, но по закалке не столь тверда. Зубила скоро садятся; выдерживает до 15 оборотов. Грунт темный.
72	Обсечков от рафинированной стали	40	4	—	В ковке хороша, тверда; полоска выдержала 10 оборотов; зубила стойки, но часто выкрашиваются; грунт бурый. Узоры едва приметны.

№	Смешения	Вес фун.	В емя плавки		Замечания
			час.	мин.	
73	Обсечков от рафинированной стали	40	4	0	Ковалась удобно, не очень тверда, выдержала 24 оборота. Зубила стойки до 6 пил, в полировке чиста. Грунт бурый, узоров нет. Примечание. Сей способ плавки постепенно введен в большом виде вместо прежнего.
	Опыты кристаллования стали				
74	Тагильского железа	40	1	30	В форму не вылита, а охлаждена в тигле; сплавок прокован под молотом: сначала ковался хорошо, но вскоре получил трещины. На выполированном и вытравленном куске видны были местами в микроскоп узоры, подобные по расположению булатным. Примечание. Как большой сплавок без выливки проковать трудно, то приготовлены для опыта тигли меньшей величины.
75	Тагильского железа	20	—		Ковалась токмо до четырехгранного вида, а после начала пленится и раскололась по диагональному направлению; мелкие узоры местами видны в микроскоп.
	Без крыши . . .		1	45	
	С крышей	—	1	30	
76	Тагильского железа	20		—	Проковалась, но узоры с трудом местами видны. Зубила скоро садятся.
	Без крыши . . .		1	40	
	С крышей	—	1	45	
77	Тагильского железа	20	4	—	Ковалась хорошо; на нижнем конце узоры приметнее, нежели на верхнем.

№	Смешения	Вес фун	Время плавки		Замечания
			час.	мин	
78	Тагильского железа	20	4	25	Не все расплавилось; сплавок на дне тигля, мягко пилился, имел мелкие, но ровные узоры, которыми был богаче на дне, нежели сверху. По проковке сего сплавка узоров, вовсе не оказалось, а сталь была мягка, так что зубила скоро садились. Из сравнения явлений при прежних опытах с настоящим оказывается: 1) что неровность в узорах и самое уничтожение их зависит преимущественно от ковки. 2) Что сталь, медленно охлажденная в тигле, имеет наклонность к кристаллованию и образованию узоров, но что узоры ее весьма мелки в сравнении с булатными. 3) Что чем более масса, тем затруднительнее проковать ее при одной и той же степени твердости, но величина узоров находится в независимости от величины сплавков. Примечание. Другие занятия по службе остановили на время дальнейшие исследования.
	1833 года				
	1) Влияние углерода растений				
79	Навивного железа Клену	5 $^{5}/_{96}$	1	35	Сплавок ковался хорошо; на нижнем конце полосы видны чрезвычайно мелкие узоры.
80	Навивного железа Клену	5 $^{5}/_{96}$	1	30	Тигель остывал медленнее, ибо более оставлено в горну угля; узоры сходны с предыдущей. Из этого видно, что медленность охлаждения не увеличивает узоров.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
81	Навивного железа Клену	5 12	1	20	Ковалась хорошо; узоры явственные, похожие на хорасан.
82	Навивного железа Клену	5 12	1	20	Не все сплавилось, но сталь ковалась; грунт темнее; узоры продольные, на шам похожие.
83	Навивного железа Клену	5 12/96	1	30	Сплавилась совершенно, узоры похожие на хорасан.
84	Навивного железа Клену	5 20/96	1	30	Не вся сплавилась; узоров мало.
85	Навивного железа Клену	5 22/96	1	30	Сплавилась, но не сковалась.
86	Навивного железа Клену	10 40/96	2	10	Не расплавилась, кроме весьма малой части, которая проковалась. Узоры весьма мелки и не светлы.
87	Навивного железа Клену	10 57/96	3		Ковалась медленно, но чисто. Узоров не оказалось; причина оставалась неизвестной. Примечание. Для выяснения, не могут ли увеличиваться узоры при увеличении сплавляемой массы, повторены опыты с 20 и 30 фунтами.
88	Навивного железа Клену	20 40/96	3	40	Ковалась хорошо, узоры мелкие, похожие на хорасан.
89	Навивного железа Клену	20 40/96	3	40	Не вся сплавилась, но сплавленная ковалась, узоры похожие на шам.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
90	Навивного железа Клену . . . . . . Примечание. При сем опыте употреблен отрубок от сырого дерева.	20 48/96	3	40	Ковалась хорошо, узоры сходны с хорасаном. На сплавке и по краям тигля находился шлак, гиацинтового цвета. От нижнего конца вытянуто два кованца, а из них приготовлены два булатные клинка, кои представлены в департамент горных и соляных дел. Узоры на обоих были довольно сходны и явственны. Они походили на хорасан. Грунт светлосерый и чистый.
91	Навивного железа Клену	2 90/96	3	35	Не сковалась.
92	Навивного железа Клену	20 80/96	3	35	Ковалась хорошо; узоры на нижнем конце хорасана. Грунт темнее предыдущего. Примечание. Из всех сих опытов следовало заключить: 1) что хотя углерод клена более способен к образованию узоров, чем сосновый уголь, употребляемый при плавке, но что полученные булаты до сего не имели всех качеств булатов настоящих; 2) что они уступали в твердости даже обыкновенной литой стали, но имели более вязкости и ковкости.
93	Навивного железа Различных цветов	20 80/96	3	40	Ковалась хорошо, узоры подобны хорасану, но блестящее прежних. На бритвах оказались узоры явственнее, подобные шаму; по пробе они были хуже английских.
94	Навивного железа Сажи голландской	20 40/96	3	25	Узоры продольные и несветлые.
95	Навивного железа Муки ржаной . .	20 80/96	3	25	Ковалась медленно. Грунт темен, узоры редки и не светлы, но сходны с хорасаном.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
96	Навивного железа Бакаутового дерева	20 40/96	3	40	Трудно ковалась, весьма крепка, но узоры мелкие, тусклые и некрасивые; хотя не совершенно, но вся сплавилась. Узоры тусклые, походят на хорасан.
97	Навивного железа Бакаутового дерева	20 48/96	3	40	
98	Навивного железа Березового дерева сырого	20 48/96	3	45	Ковалась хорошо, узоры подобны мелкому хорасану.
99	Навивного железа Сорочинского пшена	10 48/96	3		Ковалась хорошо, грунт темен. Узоры подобны хорасану, но не довольно светлы.
100	Навивного железа Рогу	10 60/96			Ковалась медленно; грунт темен. Узоры подобны хорасану
101	Навивного железа Рогу	10 72/96			Ковалась очень трудно; грунт весьма темный, узоры не очень мелки, но редки.
102	Навивного железа Рогу жженого . . Окалины	10 72/96 1/4			Трудно ковалась, так что под конец ковки местами распленилась. Узоров не оказалось.
103	Навивного железа Слоновой кости .	10 48/96			Ковалась хорошо, впрочем не замечено разности от рога.
104	Железа . . . . . Чугуна . . . . . Флюсу с окалин .	16 4 4	3	35	Вылита в форму; ковалась удобно, но холодная ломка. Зубила выкрашиваются.
105	Железа . . . . . Чугуна . . . . . Флюса с окалин .	20 5 4	3		Скоро расплавилась и не сковалась.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
106	Железа	16	4	30	Плавилась долго, ковалась удобно; зубила довольно стойки.
	Чугуна переплавленного	4			Примечания: 1) Все эти опыты показывали только наклонность к образованию булатов; остается обратиться к ископаемым телам, содержащим углерод, как например, графит. 2) Для первых опытов я мог иметь графит невысокого качества; в нем можно было видеть прослойки серного колчедана. Я выбрал до 2 фунт. графита, повидимому не содержавшего серного колчедана.
	Флюса с окалин .	4			
107	Навивного железа	5	2		Плавка производилась без крыши. По охлаждении тигля металл казался несовершенно расплавленным, ибо на сплавке видны были формы кусков железа, между коими заключался графит. Но сплавок удобно проковался. При ковке заметен был запах серы; в нижнем конце обнаружились узоры настоящего хорасана. От нижнего конца вытянут кованец для клинка; при ковке употреблено старание к сохранению узора. Таким образом получен был первый клинок настоящего булата, которого узоры к концу становились хуже.
	Графита	1/2			
108	Навивного железа	5	2	25	Получен подобный сплавок, но узоры в нижней половине были лучше первого опыта. Приготовлен другой булатный клинок. Узоры оказались на нем ровнее.
	Графиту	1/2			

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
109	Навивного железа Графиту	5 1/2	2	45	Сплавилась совершенно. Ковалась медленнее; сделанный из нижней половины полосы клинок оказался с подобными же узорами, а грунт несколько темнее.
110	Навивного железа Графиту	5 1/2	2	25	Тигель повредился и расплавленный металл выбежал; на выбежавшем слитке местами сохранился узор, а местами потерялся. Но ковать его было невозможно. Примечание. Вновь отобрано графита до 8 фунтов.
111	Навивного железа Графиту	5 1/2	2	30	Сплавился хорошо, но не сковался.
112	Навивного железа Графиту	5 1/2	2	25	Сплавился хорошо, но опять не сковался. Я полагал, что графит был хуже прежнего, и снова выбрал до 1 фунта.
113	Навивного железа Графиту	5 1/2	2	30	Сплавился, ковался хорошо, но не сковался. Для отделения серного колчедана, я просеял толченый графит, потом я счел полезным толченый графит, не просевая, пожечь. Пожигание продолжалось 1 1/2 часа.
114	Навивного железа Графита просеянного	5 1/2	2	25	Не сплавилось.
115	Навивного железа Графита пожженого	5 1/2	2	25	Сплавилось хорошо, ковалась медленно. Но узоров почти было не видно.
116	Навивного железа Графита	5 1/2	2	30	Пожженый графит просеян. В этом случае железо не расплавилось, несмотря на то, что плавилось долго.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
117	Навивного железа Графиту . . . . . Песку	5 $1^1/_2$ $^6/_{96}$	2	30	При внимательном рассмотрении толченого графита в нем оказались зерна кварца, который мог способствовать плавке. Поэтому к просеянному пожженному графиту прибавлено кварцевого песку. Сплавок ковался хорошо, сталь мягка, но узоров почти нет.
118	Навивного железа Графита . . . . Кварцевого песку	6 $^1/_2$ $^{12}/_{96}$	3	—	Сплавилось совершенно; ковалось весьма хорошо, грунт темный, но узоров не оказалось. Примечание. Выписан другой графит. Я между тем полагал продолжать опыт с прежним и употреблять менее графита, так как прежде большая часть его оставалась в тигле и служила крышей, по худому качеству могла вредить стали.
119	Навивного железа Графита	5 $^5/_{96}$			Сплавилось без остатка графита, ковалось хорошо, узоры весьма слабы.
120	Навивного железа Графита	5 $^{12}/_{96}$	2	—	Не совсем расплавилось.
121	Навивного железа Графита	5 $^1/_2$	1	10	Без крыши. Узоры хотя и оказались, но неровные и слабые. Примечание. Опыты с полученным вновь графитом.
	1834 года				
122	Навивного железа Графита	5 $^1/_2$	2	15	Ковалось хорошо, узоры слабы.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
123	Навивного железа Графита . . . . . Кварцевого песку	5 12/96 3/96			Не сковалось; приписано худому качеству вновь полученного графита. Примечание. Так как графит находится в даче Миасского завода на озере Еланчике в виде мелких галек, то сделаны поиски в озере и предприняты самые разведки для отыскания месторождения. По берегам озера собрано до 2 фунтов, но разведки не имели успеха.
124	Навивного железа Графита миасского	5 12/96	2	30	Плавка под крышей; сплавилось совершенно; ковалось хорошо, узоры продольные и слабые.
125	Навивного железа Графита	5 24/96	2	25	Ковалось медленнее прежней, но чисто. Узоры на нижнем конце не крупные хорасана. Откован клинок. Узор ровен.
126	Навивного железа Графита	6 3/4			Не сковалась, почему переплавлено под крышей.
127	Сплавок	—	—	—	При разбитии тигля с ним около сплавка оказалось несколько шлаку. Ковалось медленно. Откованный из нижнего конца клинок, по расположению узоров и по грунту, оказался близким к кара-хорасану, но узоры гораздо мельче. Нож из сего булата оказался лучше литой стали и по остроте и по прочности лезвия.

№	Смешения	Вес фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
128	Навивного железа Миасского графита	5 1/2	2	15	Ковалось хорошо, узоры хорасана. На клинке сохранились такие же узоры. Грунт темный с синеватым отливом. В закалке крепче литой стали. Из сих опытов следует, что совершенство булата, при одинаковых прочих обстоятельствах, зависит от совершенства графита или от чистоты углерода. Примечание. Выписка различного графита и повторение вышеописанных опытов продолжалось около двух лет. В это время я не вел журнала; ибо опыты не сопровождались особенными успехами. Замечены были только те из них, которые заключали изменение в способе.
	1835 года				
129	Руды железной обожженой . . . . Графита негодного для сплавления с железом	1/2 1/2	1	40	Часть шлака вытекла, но металл получен; оказался ковким продольным булатом.
130	Руды . . . . . . Графита	1/2 1/2	1	25	Шлак выбежал, часть металла получена.
131	Обе сплавки переплавлены под крышей	—	1	15	Получен ковкий металл; сделанный из него нож оказался с продольными узорами.
132	Магнитной железной руды из дач Кусинского завода (не пожженой) . . . . Графита миасского	1/2 1/2	1	20	Получен королек в 32 золотн.; откованный нож по вытравке оказался весьма хорошим хорасаном. Примечание. Как ни заманчив этот способ, но как он убыточен, то и оставлен, тем более, что требует высокого качества руд и графита.

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
133	Руды железной .	12	3	—	Не расплавилось.
	Графита от карандашных горшков .	8			
134	Железа	20	4	0	Не расплавилось.
	Руды	5			
	Графита	5			
135	Руды железной .	12			Плавка в большом тигле под крышей. Получен королек в виде хлеба; не сковался.
	Графита	8			
	Известкового флюса	1			
136	Окалины железной	10			Получено булата около 2 фунтов; узоры явственны, а грунт серый, грубый. Не сковался.
	Графита	5			
	Флюса	1			
137	Руды железной .	10			Получен сплавок весом $3^1/_2$ фунта. Узоры на нем чрезвычайно мелки. При первом ударе молота изломался. По охлаждении в изломе имел свойства белого чугуна. Из этого следует, что из руд с прибавлением древесного угля не получается ковкой стали.
	Графита	$5^1/_2$			
	Мусору	$2^1/_2$			
	Флюса	1			
					Примечание. Дутье при опытах, то же что и при деле стали; ртутный духомер показывает $^3/_4$ дюйма при сопле в 1 вершок.
	1836 года				
138	Тагильского железа	15			Вначале разгоняем был под молотом во все стороны и после разрублен на три части; каждая проковалась. На клинках оказались узоры шама.
	Графита от тиглей	$^1/_2$			
	Кварца	24			

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
139	Тагильского железа . . . . . . Графита . . . . . Кварца	12 1/4 24			Ковалась и рассекалась хорошо. Откованные клинки составляли изрядный хорасан с узорами средней величины. Примечание. При повторении сих опытов замечено, что графитные пассауские тигли заключают не одинаковый графит. Опыты остановил до отыскания лучшего графита, а до получения оного я заменил его простыми карандашами с деревом.
	1837 года				
140	Тагильского железа . . . . . . Карандашей . . .	10 30/96	3	—	Не все расплавилось. Ковалась чисто, имела узоры хорасана, хотя слабые. Грунт темный. Часть карандашей до 10 золот. осталась в прежнем виде, обуглившись. Примечание. По поручению начальника штаба повторены опыты Бреана, директора монетного двора в Париже.
141	Навивного железа Сажи голландской	5 5/96	1	45	Тигель покрыт крышей; сплавилась совершенно, ковалась хорошо. На нижнем конце узоры едва приметны, мягка по закалке.
142	Навивного железа Сажи	5 10/96	1	45	Ковалась хорошо, но медленнее. На нижнем конце узоры явственные, продольные, но не довольно светлые. Грунт темнее.
143	Навивного железа Сажи . . . . . . Графита	5 5/96 5/96	2	5	Сплавок чист, ковался хорошо. На нижнем конце узоры явственны, хотя и мелки, продольные, светлее предыдущих. Грунт светлый, не тверд.

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
144	Чугуна мягкого . Чугуна сырого .	$2^1/_2$ $2^1/_2$	1	30	Сплавился хорошо, но при первых ударах молота получил трещины. Примечание. Из сих опытов видно, что предлагаемые Бреаном способы составляют начало к проявлению узоров, подобно прежним опытам.
145	Тагильского железа . . . . . Графита . . . . . Железной руды .	10 1 $^{24}/_{96}$	3	20	Вытекло, почему количество руды уменьшено.
146	Тагильского железа . . . . . Графиту . . . . . Обожженной железной руды	10 $^{48}/_{96}$ $^{12}/_{96}$	3	30	Почти все сплавилось, но узоров не оказалось.
147	Тагильского железа . . . . . Графиту . . . . . Обожженной железн. руды	10 $^{84}/_{96}$ $^{24}/_{96}$	3	45	Ковался хорошо, но узоров нет. Грунт темный. Прибавление руды вместо кварца не имело успеха.
148	Тагильского железа . . . . . Графита . . . . . Кварца	10 $^{84}/_{96}$ $^{16}/_{96}$	3	40	Сплавился хорошо, ковался медленно; откованные клинки составляли булат куш-гынды; с кварцем из того же графита получен булат.
149	Навивного железа	10	3	15	Плавлено без крыши до совершенной жидкости. Сплавок не сковался.
150	Сплавок . . . . . Окалины железной	10 $^1/_2$	3	—	Плавка под крышей. Нижний конец немного проковался. Остальное расплелилось. На нижнем конце узоры крупного кара-хорасана. Из этого следует: 1) что кара-хорасан в клинке получить весьма трудно; 2) что закись железа другое влияние имеет на сталь, нежели окись.
151	Железа . . . . . Окалины	40 2	3	20	Тигель повредился и расплавленный металл вытек.

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час	мин.	
152	Крепкой, несковавшейся литой стали . . . . . . Окалины	15 3/4			По раскрытии тигля в нем оказался кусок железа, сохранивший формы заложенных в тигель кусков стали. Все эти формы оказались пустыми, расплавленного же металла получено 12 фунтов. Сплавок вначале ковался, а после получил трещины; на рассеченных кусках обнаружились узоры кара-хорасана, но грунт хуже прежнего. Из этого следует, что навивное железо гуще, нежели обыкновенное, и что закись железа способствует к образованию узоров. Из этого опыта и многих предшествовавших можно сделать заключение еще важнее, но я остановлюсь до дальнейшего исследования графитов.
153	Стальных обсечек Окалины при закрытии тигля крышей	40 1	4		Плавилась как обыкновенно и вылита в форму. Узоров на полосе почти не оказалось, равно не обнаружилось разности в свойствах с обыкновенной литой сталью. Почему и не предпринято в заведенной методе никакой перемены. Итак, влияние, производимое окалиной, уничтожается или, по крайней мере, уменьшается отливкой.
154	Тагильского железа . . . . . . Графита . . . . . Окалины	12 1 1/4 1/2	4	30	Не сплавилось, а графит почти весь остался. Примечание. Выписанный графит оказался в кусках от тиглей, но хорошего качества по темноте цвета и мягкости к осязанию.

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
155	Тагильского сварочного железа . .	10	4	30	Несовершенно расплавилось. В остатке графита 1 фунт. Для восстановления 1 фунта окалины и для расплавления железа употреблено $^1/_2$ фунта, но как для расплавления железа потребно не более $^1/_{100}$, следовательно для восстановления 1 фунта окалины нужно 38,4 золотника или 0,38 по весу, а может быть и еще меньше, если графит чист.
	Графита выписного	$1^1/_4$			
	Окалины	1			
156	Тагильского железа	10	5	—	Также не совсем расплавилось. Графита в остатке $^3/_4$ фунта. Узор слабого хорасана. Для проявления сего узора нужно было $^1/_4$ фунта графита. Из сих опытов видно, что для совершенного расплавления железа при графите от тиглей необходимо прибавлять флюс. Между тем опыты показали мне, что прибавление горного хрусталя уничтожило узоры в булате, а пожженный кварц хотя их и не уничтожает, но может, судя по первоначальным опытам, вредить качеству металла, почему вместо горнового камня думаю употребить доломит.
	Графита	$1^3/_4$			
	Окалины	1			
157	Тагильского железа	12	5	—	Металл покрыт шлаком, остаток графита незначителен. По узору табан невысокий. Примечание. Дутье против обыкновенного усилено: вместо $^3/_4$ дюйма, духомер начал показывать до 1 дюйма.
	Графита	1			
	Окалины	$^{36}/_{96}$			
	Доломита	$^{36}/_{96}$			
158	Тагильского железа	12	5	—	Табан с мелкими узорами — ровными.
	Графита	1			
	Окалины	$^{36}/_{96}$			
	Доломита	$^{36}/_{96}$			

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
159	Сварочного тагильского железа .	12	4	50	Не мягкий, но совершенный в ковке. В остатке $^1/_2$ фунта графита. Шлаку немного. По узору хорасан хорошего качества.
	Графита	1			
	Окалины	$^{36}/_{96}$			
	Доломита	$^{36}/_{96}$			
160	Тагильского железа	0	5	—	Покрыт шлаком, в остатке 48 золотников. Ковался хорошо. Табан с мелкими узорами.
	Графита	1			
	Окалины	$^{36}/_{96}$			
	Доломита . . .	$^{36}/_{96}$			
161	Тагильского железа	10	5	—	В остатке 48 золотников, табан с мелкими узорами.
	Графита	1			Примечание. По этим двум опытам количество углерода в хорасане и мелком табане простирается до $3^1/_2$ процентов в 100 частях, предполагая, что графит чист.
	Окалины	$^1/_4$			
	Доломита	$^1/_4$			
162	Гвоздей из тагильского железа . . .	10	5	—	В ковке мягок. Мелкие узоры табана; в остатке $^1/_2$ фунта.
	Графита выписного	1			
	Окалины	$^1/_4$			
	Доломита	$^1/_4$			
163	Тагильского железа	10	5	—	И в ковке и по узору одинаков с предыдущим, следовательно, уменьшение частей железа в предыдущем опыте не имеет влияния на качество металла.
	Графита выписного	1			
	Окалины	$^1/_4$			
	Доломита	$^1/_4$			
164	Тагильского железа	10	5	—	Выбежало из тигля до $^1/_2$ фунта. Остальное не сковалось. Табан с крупными узорами. В остатке 12 золотников графита.
	Графита миасского	$^{80}/_{96}$			
	Окалины	$^{36}/_{96}$			
	Доломита	$^{36}/_{96}$			
165	Прежний сплавок		4	—	Не сковался и оставлен.
	Графита	$^{12}/_{96}$			
	Окалины	$^{12}/_{96}$			
	Доломита	$^{12}/_{96}$			

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин	
166	Тагильского железа	12	4	45	Ковался хорошо, но медленно; по узору кара-хорасан невысокий.
	Графита	1/2			
	Графита от прежних плавок	1/2			Примечание. Полученный вновь графит имел менее темный цвет и запах, бывающий в москательных лавках, где, вероятно, и куплен.
	Окалины	36/96			
	Доломита	1/4			
167	Тагильского железа	12	5	—	Получено булата 12 3/4 фунта. Графита 12 зол. Шлаку 3/4 фун. Весьма ковок. Узоры некрупного табана.
	Графита от горшков	1			
	Окалины	1/2			
	Доломита	1/2			
168	Тагильского железа	12	4	50	Получено булата 12 1/2 фунтов. Графита 16 золотников. Шлаку 76 зол. Узор табана некрупный, но грунт темный.
	Графита от горшков	1			
	Окалины	36/96			
	Доломита	1/2			
169	Тагильского железа	12	5	—	Получено булата 12 ф. 36 зол. Графита 12 зол. Шлаку 3/4 фунта.
	Графита	1			
	Окалины	36/96			
	Доломита	1/2			
170	Тагильского железа	12	5	15	Получено булата 12 1/4 фунта. Графита 16 золотников. Шлаку 3/4 фунта. Ковался трудно, узоры мелкие табана, грунт темен.
	Графита	1			
	Окалины	36/96			
	Доломита	1/2			
					Примечание. Из сих опытов видно: чем дольше плавится булат, тем более улучшается его качество; но продолжать долее 5 часов не всегда возможно, особенно на сильном духу.
171	Тагильского железа	12	5	30	Ковался хорошо; табан с узорами средней величины. По испытании бритвы оказались весьма хорошими.
	Графита	1			
	Окалины	36/96			
	Доломита	1/2			
172	Тагильского железа	12	5	30	Подобен прежнему и в ковке и по узору.
	Графита	1			
	Окалины	36/96			
	Доломита	1/2			

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час	мин.	
173	Тагильского железа . . . . . . Графита от прежних плавок . . . . Окалины . . . . Доломита	12 1 36/96 48/96	5	30	Получено булата 12 ф. 36 зол. Графита 16 зол. Шлака 1 ф. 12 зол. Ковался трудно, грунт темный, узоры редки, но крупны.
174	Тагильского железа . . . . . . Старого графита . Окалины . . . . Доломита	12 1 36/96 1/2	5	30	Получено булата 12 ф. 24 зол. Графита 54 зол. Шлаку 76 зол. Грунт темный блестящий, отлив золотистый; узоры мелки. Мягок в ковке и крепок по закалке. Отличные бритвы.
175	Тагильского железа . . . . . . Старого графита без флюса	12 1	5	30	Получено булата 12¼ ф. Графита 16 зол. Шлаку 48 зол. Весьма тверд в ковке, кара-табан невысокий. Примечание. Прибавление флюса к старому графиту увеличивает жидкость и массу шлака, который, кажется, прежде времени прекращает соединение графита с железом.
176	Тагильского железа . . . . . . Старого графита . Окалины	12 11/4 1/2	5	30	Получено булата 12½ ф. Графита 12 зол. Шлаку 72 зол. В потере графита 1 ф. 12 зол. Кара-табан со средним узором.
177	Тагильского железа . . . . . . Старого графита . Окалины . . . . Доломита	12 11/4 36/96 36/96	5	30	Получено булату 12 ф. 32 зол. Графиту 28 зол. Шлаку 48 зол. В потере графита 92 зол.

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания.
			час.	мин.	
178	Тагильского железа . . . . . . Старого графита . Окалины	10 $1^1/_4$ $^3/_4$	5	30	Получено булата 10 ф. 48 зол. Графиту 6 зол. Шлаку 78 зол. Ковался медленно, но чисто; кара-табан с крупными узорами, выше всех бывших. В потере графита 1 ф. 18 зол. Из сих опытов следует: 1) чем более издерживается графита и чем более получается шлака, тем выше достоинство булата. 2) бывший в плавке графит не требует флюса для расплавления железа, и прибавление окалины улучшает металл.
179	Тагильского железа . . . . . . Старого графита от полуузких горшков . . . . . . Миасского графита . . . . . . Окалины . . . . Кварцевого флюса	12 $^1/_2$ $^3/_4$ $^{36}/_{96}$ $^1/_2$	5		Ковался довольно медленно; 6 нагревов до рассечки; рассекался начисто. Узоры явственны и крупны, кара-табана. Один из клинков употреблен на саблю для великого князя Михаила Павловича.
180	Тагильского железа . . . . . . Графита английского . . . . . . Окалины . . . . Доломита	12 1 $^{24}/_{96}$ $^{24}/_{96}$	5	30	В ковке весьма мягок, разрубался начисто. Будучи раз нагрет, вытягивается из бруска в полосу, нагревается от ударов молота. Узоры хорасана, грунт темный, отлив чисто золотится. В остатке графита 12 золотников.
181	Тагильского железа . . . . . . Графита английского . . . . . . Окалины . . . . Доломита	10 1 $^{24}/_{96}$ $^{24}/_{96}$	5	30	Ковался медленнее предыдущего, но чисто. Узоры крупные, отлив золотистый.
182	Старого железа бывшего в земле . . . . . . Графита старого . Окалины . . . . Доломита	10 1 $^1/_2$ $^1/_2$	5	—	Не сплавилось.

№	Смешения	Вес. фун.	Время плавки		Замечания
			час.	мин.	
183	Несплавленного железа	10	5	30	Сплавился хорошо, ковался весьма трудно, рассекался не чисто, узоры крупные кара-хорасана.
	Графита старого .	1/2			
	Доломита	1/4			Примечание. Эти два опыта показывают, что старое железо труднее плавится и что без прибавления окалины при втором опыте узоры ближе к кара-хорасану, нежели к табану.
184	Тагильского железа	5	5	—	Плавка в большом тигле. Металл покрыт тонким слоем шлака; в остатке 1/4 фунта графита.
	Графита	1/2			
	Окалины	1/8			
	Доломита	1/8			
185	Тагильского железа	5	5	—	Металл покрыт тонким слоем шлака; в остатке 1/4 фунта графита, но алмаза, при тщательном рассмотрении и графита и шлака, не оказалось. Из этого следует, что алмаз расплавился в булате.
	Графита	1/2			
	Окалины	1/8			
	Доломита	1/8			
	Алмаз, весом в 1/4 карата				Наблюдения при отковке показали, что первый булат несколько удобнее куется нежели второй. При рассечке разности не замечено. При окончательной проковке первая казалась мягче второй. [8].
					При вытравке кованцев узоры оказались сходны, но грунт у второй был несколько светлее; приготовленные из того и другого булата клинки составили металл, называемый кумгынды. Узоры и грунт были лучше в первой, нежели во второй. [8].
					Примечание. Приготовленные мною в продолжение опытов булаты в виде различного рода оружия и изделий, представлены на благоусмотрение начальства и помещены на бывшей выставке в С.-Петербурге в 1839 году.

ПРИМЕЧАНИЯ РЕДАКЦИИ К СТАТЬЕ П. П. АНОСОВА „О БУЛАТАХ“

1. Статья П. П. Аносова напечатана впервые в 1841 г. в „Горном журнале“, кн. 2, стр. 157—317 под кратким названием „О булатах“. В том же году она вышла отдельным изданием в двух книгах, причем текст напечатан из „Горного журнала“ без изменений за исключением титульных листов и вводного примечания на первой странице, которые воспроизведены в настоящем издании. На титульном листе первой книги имеется пометка „Санкт-Петербург 1841“. Вторая часть книги имеет пометку „Златоуст 1841 года“.

2. Здесь Аносов подразумевает булат, изготовленный из литой стали. Что касается сварочных булатов, то далее автор указывает, что они изготовлялись в Грузии. Имеются данные, что сварочные булаты изготовлялись также в Москве в XVII в. и в Астрахани.

3. Головнин Василий Михайлович (1776—1831 гг.) — знаменитый русский мореплаватель и путешественник. Во время гидрографических работ у Курильских и Шантарских островов был вероломно захвачен японцами в плен, где пробыл с 1811 по 1813 г. Свое пребывание в Японии он описал в сочинении „Записки флота капитана Головнина о приключениях его в плену у японцев в 1811, 1812 и 1813 гг. с приложением замечаний его о Японском государстве и народе“, СПБ, 1816.

4. Темир-Ланг, он же Тамерлан, — завоеватель XIV в. (1336—1405 гг.).

5. О применении микроскопа для исследования структуры см. также журнал опытов (книга вторая), опыты № 68, 74. 75.

6. „Зернистая оболочка, потерявшая первоначальную твердость“ — это, очевидно, обезуглероженный слой, что подтверждается дальнейшим указанием автора: „сталь в изломе приобретает зернистое сложение токмо с поверхности, от которого происходит особый кант белого цвета по краям бруска“.

7. Потассий — калий.

8. Вероятно, под словом „первая“ Аносов подразумевает предыдущую плавку без алмаза, а под словом „вторая“ — плавку с алмазом.

НИКОЛАЙ ВЕНИАМИНОВИЧ КАЛАКУЦКИЙ

8 Нахимов 2988

Н. В. КАЛАКУЦКИЙ (1831—1889)

Николай Вениаминович Калакуцкий принадлежит к блестящей плеяде русских ученых XIX в., создавших новую отрасль знания — металловедение.

Научно-техническая деятельность Н. В. Калакуцкого началась после Крымской войны, в которой он принимал непосредственное участие.

Крымская война, вскрывшая всю „...гнилость и бессилие крепостной России“ [1], показала, в чем заключалась сила и слабость русской армии. Ее сила была в героизме и беззаветной любви к родине солдат и офицеров. Ее слабость обнаружилась в недостаточном снабжении и неудовлетворительной технической оснащенности. Это отставание было не случайным.

„Ничто так не зависит от экономических условий, — писал Энгельс, — как именно армия и флот. Вооружение, состав, организация, тактика и стратегия зависят прежде всего от достигнутой в данный момент ступени производства и от средств сообщения“ [2].

В крепостной России не могла по-настоящему развиваться промышленность. Главным поставщиком металла для нужд военного снабжения был Урал, который представлял собой, как указывал В. И. Ленин, „...оригинальный строй промышленности. В основе «организации труда» на Урале издавна лежало крепостное право...“ [3], которое оказалось главной причиной застоя промышленности.

В 60-х годах прошлого века в артиллерийской технике произошел переворот. Вместо чугунных и бронзовых пушек появились орудия из литой стали. Перед лучшими русскими людьми встала проблема изготовления литой стали и освоения производства стальных пушек в России. Иначе вставала угроза снижения силы русской армии.

Поставленная задача была решена коллективным творчеством Обухова, Калакуцкого, Лаврова, Чернова, Ржешотарского и других русских ученых. В результате их работ русские стальные орудия

---

[1] Ленин В. И., Соч., изд. 4-е, т. 17, стр. 95.
[2] Энгельс Ф., Анти-Дюринг, Госполитиздат, 1948, стр. 156.
[3] Ленин В. И., Соч. изд. 4-е, т. 3, стр. 424.

превзошли по своему качеству заграничные и показали отсутствие разрывов, которые часто бывали при испытаниях пушек иностранного происхождения. Следует отметить, что в Западной Европе методы обработки стали отдельными фирмами сохранялись под строжайшим секретом. По этой причине на западе не могло быть и речи об обмене опытом и научном обобщении. Обработка металлов была мастерством, построенным на случайных рецептах. В одной из первых своих работ, а именно, в предисловии к сделанному им переводу английской книги „Руководство для обработки стальных изделий", составленной мастером Вуличского арсенала Эде, Н. В. Калакуцкий, анализируя работу английских мастеров, писал: „Мастера помимо своей малограмотности — имеют привычку держать свое искусство в строгой тайне"[1]. (Следует отметить, что в те времена литература по вопросам обработки металлов была вообще очень бедна.) Работа русских инженеров была чрезвычайно плодотворной. Здесь ярко проявился творческий гений русских ученых. Основной научный принцип, примененный ими при решении задачи по повышению свойств стали, заключался в систематическом последовательном изучении взаимной связи процессов, происходящих в стали при тепловой и механической обработке. Вместо копирования рецептов малограмотных „мастеров" русские инженеры произвели многочисленные опыты и наблюдения над влиянием различных факторов на свойства стали. Аносов, применивший впервые в мире микроскопический и макроскопический методы для изучения структуры стали, положил начало научному металловедению. Д. К. Чернов, Н. В. Калакуцкий, А. С. Лавров, А. А. Ржешотарский и др. в тесном научном содружестве открыли взаимную связь между условиями кристаллизации стали и ее физико-химическими свойствами, между строением слитка и температурой заливки стали, между величиной зерна и прочностью стали. Они показали, что свойства готовых изделий являются результатом развития всей истории металла, начиная от плавки и кончая условиями ковки и тепловой обработки. Иначе говоря, русские инженеры применили действительно научный, диалектический метод вместо метафизического, господствовавшего до этого в знаниях об обработке металлов. Таким образом гениальный Чернов открыл критические точки, а Калакуцкий разработал метод исследования и определил впервые в мире внутренние напряжения в стали и чугуне.

Николай Вениаминович Калакуцкий родился 9 февраля 1831 г. в Бельском уезде Смоленской губернии[2]. Его отец работал артиллерийским приемщиком в Златоусте. Н. В. Калакуцкий учился сперва

---

[1] „Артиллерийский журнал" № 4, 8, 11 и 12, 1868; издано также отдельной книгой, СПБ, 1868.

[2] В некрологе, написанном А. Скиндером („Артиллерийский журнал" № 12, 1889), неправильно указано, что Н. В. Калакуций родился в Златоусте. Все другие источники и послужной список (Центральный государственный военно-исторический архив, ф. 320, оп. 2, связка 279, д. 210-а, л. 108, ф. 400, оп. 2377, д. 888, л. 5) дают основание утверждать, что Н. В. Калакуцкий родился в Смоленской губернии.

в Тульской гимназии, а затем, когда ему было 14 лет, поступил в специальное военно-учебное заведение, так называемый „дворянский полк“ (впоследствии Константиновское военное училище) в Петербурге. Он окончил курс в 1849 г., был произведен в офицеры и назначен в 4-ю артиллерийскую бригаду. После Крымской войны (1853—1856 гг.) он стал добиваться назначения на Урал, так как его интересовала производственная деятельность. В 1861 г. его просьба была удовлетворена, и он был назначен в Златоуст приемщиком. В это время в Златоусте началось производство пушек из литой стали по способу П. М. Обухова[1].

Значительное влияние на дальнейшую деятельность Н. В. Калакуцкого оказал А. С. Лавров, который был несколько позже Калакуцкого назначен в Златоуст старшим приемщиком. Между Н. В. Калакуцким и А. С. Лавровым завязались дружественные отношения. Пользуясь указаниями Лаврова, Н. В. Калакуцкий с большой настойчивостью занялся самообразованием. Он изучает иностранные языки, математику, химию и металлургию[2]. К этому времени относится первая литературная работа Н. В. Калакуцкого. Он сделал упомянутый выше перевод английской книги Эде „Руководство по обработке стальных изделий“. Эта книга была издана впоследствии в 1868 г. с многочисленными примечаниями Н. В. Калакуцкого. В этот же период вместе с А. С. Лавровым он занимается изучением строения и свойств литой стали. После отъезда Лаврова, в 1864 г., он продолжает эту работу один. Производство литой стали, ковка и термическая обработка крупных поковок были тогда новыми, недостаточно изученными процессами. Никакой литературы по этим вопросам не существовало. Н. В. Калакуцкий проводит дни и ночи в литейном и молотовых цехах и в лаборатории. Он изучает связь между кристаллическим строением слитка, условиями отливки, ковки, термической обработки и свойствами стали. Результаты этих работ были опубликованы Н. В. Калакуцким в ряде статей. Его первая статья появляется в № 1 „Артиллерийского журнала“ за 1866 г. под названием „Проба стальных орудий“. Далее, в 1867 г., он печатает в „Артиллерийском журнале“ серию статей под общим названием „Материалы для изучения стальных орудий“[3]. Затем в 1869 г. в „Артиллерийском журнале“ появляются „Материалы для изучения сталелитейного дела в России“[4]. Эти статьи привлекли всеобщее внимание как по глубине содержания, так и по методике исследования. Работам Н. В. Калакуцкого и А. С. Лаврова была дана высокая оценка гениальным русским ученым Д. К. Черновым, который свой основной труд, посвященный критическим точкам в стали, опубликовал

---

[1] Данилевский В. В., Русская техника, 1949.

[2] Газета „Новости и биржевая газета“ от 19 января 1889 г., некролог о Н. В. Калакуцком.

[3] „Артиллерийский журнал“, № 5, 1867, стр. 784—817; № 7, стр. 1205—1227; № 9, стр. 1601—1642; № 10, стр. 1737—1760.

[4] „Артиллерийский журнал“ № 1, 1869, стр 48—119; № 4, стр. 750—814 № 9, стр. 284—307.

под названием „Критический обзор статей гг. Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д. К. Чернова исследования по этому предмету“.

Д. К. Чернов писал, что „труды гг. Лаврова и Калакуцкого, не имея ничего себе подобного не только в русской но и иностранной литературе, заслуживают с нашей стороны полной признательности к их авторам ...“, и далее: „Наша литература должна гордиться трудами гг. Лаврова и Калакуцкого; они первые указали распределение пустот в литых стальных болванках и зависимость их от обстоятельств плавки и литья ...“ [1].

Н. В. Калакуцкий в своих работах дал обстоятельный и подробный анализ существовавшего на Златоустовском заводе производства стальных пушек, начиная с выплавки стали и кончая испытаниями готовых орудий ковкой. Он провел ряд систематических опытов и наблюдений над влиянием различных факторов на свойства стали В работах Н. В. Калакуцкого и А. С. Лаврова впервые исследовалась неравномерность химического состава по сечению слитка, т. е. явление ликвации в стали. Особый интерес представляет также исследование плотности стали в разных участках слитка и готовых изделий, которое потребовало чрезвычайно трудоемкой и тщательной работы. Большинство данных и объяснений, приведенных Н. В. Калакуцким, представляет интерес до настоящего времени.

Автор, изучая строение металла в литых болванках, указывает на постепенное увеличение зерна к центру слитка и „строгую правильность“ в расположении кристаллов. Он приходит к выводу, что размер кристаллов зависит, во-первых, от избытка температуры жидкой стали над температурой плавления и, во-вторых, от времени охлаждения и затвердевания слитка. Значительный интерес представляет исследование влияния условий нагрева и ковки на структуру стали. Здесь Н. В. Калакуцкий устанавливает, что повышение температуры и продолжительности нагрева способствуют „полному развитию кристаллов“, т. е. увеличению зерна в стали.

Далее Н. В. Калакуцкий определяет связь между величиной зерна и температурой конца ковки. Он пишет, что ковка должна заканчиваться при достаточно низкой температуре. Ковка „должна быть ведена до охлаждения стали, или до бура“. Прокованные части следует предохранять от действия повторных нагревов, что бывает на практике в том случае, когда ковка „частей, с ними смежных, не окончена“.

Наблюдения за условиями затвердевания и охлаждения стали приводят автора к мысли о неизбежности возникновения в стали остаточных напряжений.

Рассматривая процесс затвердевания слитка в изложнице, он пишет: „... всякий вновь застывающий слой пристает к слою несколько охладившемуся, а оттого между ними, после окончательного их охлаждения до одной общей температуры, являются внутренние

---

[1] „Записки Русского технического общества“, 1868, стр. 399—440

напряжения, в силу которых внутренние слои болванки будут растянуты действием наружных слоев . . .»[1] Это положение совершенно правильно. Действительно, вновь застывший внутренний слой имеет температуру более высокую, чем температура наружного слоя в этот момент. Поэтому после полного охлаждения тепловое сжатие внутреннего слоя должно получиться соответственно больше, чем в наружном. При условии отсутствия нарушения сплошности после полного охлаждения во внутреннем слое возникнут растягивающие остаточные напряжения.

Таким образом, Н. В. Калакуцкий уже в 1867 г. совершенно правильно установил механизм возникновения остаточных напряжений при затвердевании стали и дал точное определение знака напряжения в поверхностных и внутренних слоях слитка.

В 1870 г. Н. В. Калакуцкий был вызван в Петербург, где он получил новое задание. В это время русская армия в связи с развитием военной техники должна была перейти на новую систему стрелкового оружия: на вооружение была принята скорострельная винтовка системы Бердана, фактически сконструированная русскими офицерами Горловым и Ганиусом[2]. Н. В. Калакуцкому было поручено заняться вопросом о пороховой пробе малокалиберных ружейных стволов. Этой работой Н. В. Калакуцкий занимался до 1878 г. Для решения этой задачи он проводит большое число систематических опытов по испытанию ружейных стволов. Он разрабатывает методику испытания и подробно исследует свойства стали и влияние различных способов ее обработки на качество стволов.

Результаты этих исследований Н. В. Калакуцкий опубликовал в ряде статей под названием „Испытания ствольной стали и опыты над малокалиберными стволами разных заводов“[3].

Задачу исследования автор ставит следующим образом: „Известно, что механические и физические свойства стали зависят главным образом от способа ее обработки, а также от химического ее состава. Производя опыты я имел в виду по возможности вывести эту зависимость и на основании сделанных выводов оценить достоинства стали рассматриваемых заводов“.

Работа производилась по следующему плану:

1. Исследование механических и некоторых физических свойств стали, а именно:

а) испытания образцов на растяжение;

б) испытания твердости ножом Родмана[4];

в) испытания сплошных болванок гибом в холодном состоянии под паровым молотом;

г) определение удельного веса стали;

---

[1] „Артиллерийский журнал“ № 5, 1867 г., стр. 783.

[2] Зайончковский П., Военные реформы 60—70-х годов XIX в., диссертация, М. 1950.

[3] Оружейный сборник 1871, № 1, ч. II, стр. 1—17; № 2, ч. II, стр. 34—78; № 3, ч. II, стр. 76—91; 1874, № 2, ч. II, стр. 70—74.

[4] Это испытание делалось вдавливанием ножа, имевшего вид пирамиды.

д) испытания болванок и стволов гибом на особом станке;

е) определение влияния гиба на другие механические свойства.

2. Определение химического состава стали в некоторых опытных стволах.

3. Пороховая проба стволов:

а) приискание заряда и пули для общей пробы;

б) определение наивыгоднейшего сочетания зарядов и пуль для пробы стволов на разрыв;

в) проба стволов как общей пробой, так и стрельбой до разрыва.

4. Исследование влияния гиба болванок и стволов на сопротивление стали действию пороховых газов:

а) влияние различных условий гиба на сопротивление стали действию пороховых газов;

б) влияние пороховой пробы на гиб.

Рассматривая результаты испытаний, Н. В. Калакуцкий устанавливает влияние на свойства стали различных факторов. Например, он обнаруживает, что мелкозернистая сталь имеет более высокую прочность, чем крупнозернистая. Он устанавливает значение металлургических дефектов и влияние чистоты шихты на вязкость стали. Он показывает важность определения отношения предела упругости к сопротивлению разрыву (т. е. пределу прочности). На основании полученных данных автор приходит к выводу, что предел упругости изменяется чрезвычайно резко под влиянием обработки (на 270%), в то время как сопротивление разрыву при тех же условиях показывает меньшую чувствительность (изменение на 45%).

Из подробного анализа полученных данных Н. В. Калакуцкий делает вывод, „что стволы, приготовленные на наших русских заводах, как по своему сопротивлению гибу, так и по другим механическим свойствам, не только не уступают, но в некоторых отношениях даже значительно превосходят стволы лучших заграничных заводов“.

Далее он пишет: „Россия представляет все средства для развития сталествольного производства — и стыдно нам, имея у себя до 7-ми сталелитейных заводов[1], возить из-за границы сталь посредственных качеств“.

В 1879 г. Н. В. Калакуцкий публикует „Работы по определению давления пороховых газов в стальных малокалиберных стволах“[2]. Указанные работы имели большое значение для установления правильной методики испытания[3], а также для развития производства оружейных стволов в России[4].

---

[1] В то время литая сталь производилась на заводах Пермском, Обуховском, Златоустовском, Сормовском, Алапаевском, Серебрянском, и Камско-Воткинском. Кроме того, плавка стали существовала на Ижевском заводе.

[2] „Оружейный сборник“, 1879, № 1, ч. I, стр. 108, № 2, ч. I, стр. 83, № 3, ч. I, стр. 1; также отдельное издание, СПБ 1879.

[3] Дроздов Н. Ф., Работы Калакуцкого по определению давлений пороховых газов в стальных мелкокалиберных стволах, Пгр. 1920.

[4] Зыбин С., Материал охотничьих стволов и его свойства, „Оружейный сборник“, 1905, № 1, стр. 1—44.

Период жизни Н. В. Калакуцкого, начиная с 1870 г., характеризуется чрезвычайно разносторонней деятельностью. Он работает приемщиком на Обуховском сталелитейном заводе. В то же время он состоит правителем дел 2-го отдела Артиллерийского комитета. Кроме того, около 1871 г. он был приглашен консультантом на Путиловский завод. Он участвует в различных комиссиях по металлургическим вопросам, связанным с производством стальных, чугунных и бронзовых орудий и снарядов.

Казалось бы, что при таких разносторонних занятиях трудно вести научную работу, но Н. В. Калакуцкий умел сочетать практическую работу с научной. Кроме указанных работ по исследованию ствольной стали и определению давления пороховых газов, он работает над различными вопросами и печатает ряд статей в периодической печати. Он занимается историей артиллерии[1]. Далее появляются статьи „О некоторых сплавах меди[2], „Значение фосфористой стали для промышленных целей“[3], „Новая английская артиллерия“[4] и т. д. Чрезвычайно благотворные результаты имела деятельность Н. В. Калакуцкого на Обуховском сталелитейном заводе. Он принимал непосредственное участие в разработке мероприятий по улучшению качества орудийной стали. Результаты этих исследований опубликованы им в статье „Подробное изложение результатов механических испытаний, произведенных над сталью Обуховского завода“[5]

Однако самой главной, самой выдающейся работой Н. В. Калакуцкого был его труд „Исследование внутренних напряжений в чугуне и стали“. Этой работе он посвятил 16 лет своей жизни. Она была опубликована в Петербурге в 1887 г. В следующем 1888 г. она издается вторично по распоряжению Горного ученого комитета и рассылается подписчикам „Горного журнала“ в виде приложения. Эта работа представляла замечательное научное открытие. Н. В. Калакуцкий первый в мире разработал метод определения остаточных напряжений в чугунных и стальных изделиях.

Проблема остаточных напряжений интересовала Н. В. Калакуцкого еще в начальный период его заводской деятельности. Как уже выше указывалось, еще в 1867 г. он описал в одной из своих статей механизм зарождения внутренних напряжений при отливке стали. Изучая случаи разрыва орудий при стрельбе, а также случаи разрушения других стальных и чугунных изделий, Н. В. Калакуцкий приходит к выводу, что внутренние напряжения могут существенно изменить прочность металла. Он различает полезные и вредные внутренние напряжения. Первые повышают эксплоатационную прочность изделий, а вторые — понижают.

---

[1] Калакуцкий Н. В., Громадные орудия прежнего времени, „Артиллерийский журнал“ № 3, 1870, стр. 507—540.

[2] „Артиллерийский журнал“, 1870, № 12; 1871, № 1.

[3] Газета „Голос“ 1875, № 158.

[4] „Морской сборник“ 1886, № 12.

[5] Отчет артиллерийского отделения Морского технического комитета за 1876 г., СПБ 1877

До тех пор, пока величина и знак внутренних напряжений неизвестны, нельзя считать орудия вполне надежными. Первым шагом для повышения прочности изделий будет, следовательно, как указывает Калакуцкий, „изучение внутренних напряжений в металле, потому что если они существуют и могут, при известных условиях, достигать значительной величины, то необходимо ими воспользоваться для увеличения сопротивления, а не оставлять их действовать в невыгодную сторону“ [1]. Он далее указывает, что „изучение натуральных внутренних напряжений имеет важное значение не в одном только орудийном деле. Оно не менее полезно и при выделке всякого рода предметов, долженствующих обладать большим сопротивлением. Почти каждому приходилось слышать о внезапной поломке коленчатых валов, штоков, о разрывах громадных цилиндров и труб, о лопании шин и т. п.“ [2]. Изучение внутренних напряжений имеет большое значение для стальных изделий, подвергаемых закалке, так как частым видом брака на производстве являются трещины и деформации. Внутренние напряжения появляются при холодной деформации, например, при низкотемпературной прокатке тонких листов.

„В литейном деле еще более случаев проявления внутренних напряжений, — пишет Калакуцкий. — Так, несоблюдение некоторых практических правил во время отливки и затем следующего охлаждения ведет к тому, что отлитая вещь, вынутая из опок в целом виде, лопается через несколько часов или дней“ [3]. Очень интересны примеры растрескивания литых, а также кованых и закаленных снарядов при хранении в складах или при перевозках.

Метод определения внутренних напряжений, предложенный Калакуцким, заключается в последовательной вырезке концентрических колец из диска, измерении изменения радиусов колец после вырезки и расчетах напряжений по предложенным автором формулам. Так как в те времена достаточно точных приборов для линейных измерений не существовало, то Н. В. Калакуцкий сконструировал для этой цели специальный прибор, который позволял делать измерения длин свыше 600 *мм* с точностью $\pm 0{,}001$ *мм*. Для того чтобы достигнуть такой точности, Н. В. Калакуцкий попутно предпринял ряд обширных опытов для определения разности коэфициента линейного расширения стали и серебра, так как имевшиеся в те времена данные были недостаточно точными. Эти данные ему понадобились в связи с тем, что шкала на его приборе была серебряная, а исследуемые диски — стальные и чугунные. Так как опыты продолжались до 2 мес. и обеспечить постоянство температуры при существовавших условиях было невозможно, то требовалось вводить возможно более точно поправку на разницу коэфициента расширения серебра и стали. После обширного специального исследования эта разница была установлена Н. В. Калакуцким равной 0,00001 на 1° С.

---

[1] Стр. 138 настоящей книги.
[2] Там же.
[3] Там же.

Н. В. Калакуцкій.

ИЗСЛѢДОВАНІЕ ВНУТРЕННИХЪ НАПРЯЖЕНІЙ

въ

ЧУГУНѢ И СТАЛИ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типо-Литографія А. М. Вольфа, Большая Итальянская, д. 2.

1887.

Титульный лист 1-го издания книги Н. В. Калакуцкого
($^2/_3$ нат. вел.)

Н. В. Калакуцкий разработал несколько вариантов своего метода, которым определялись тангенциальные (окружные) и радиальные напряжения.

1. После разметки диска на кольца и измерения диаметров (см. фиг. 1—3 черт. 3, приложенные к статье Калакуцкого) производилась вырезка сразу всех намеченных слоев. Повторное измерение диаметров позволяло определить изменения их после вырезки, что давало исходные данные, нужные для расчета.

2. Вырезанные из диска концентрические кольца дополнительно стачивали или растачивали, чтобы проверить оставшиеся внутренние напряжения в каждом кольце.

3. Третий ряд опытов производился с дополнительной разрезкой стенки отдельных колец.

4. Как наиболее точный метод автор применил последовательное вырезание концентрических колец снаружи или с внутренней стороны диска, причем после удаления каждого слоя делали измерение всех диаметров как в вырезанном кольце, так и в остающихся неразрезанными частях диска. Работа по этому методу очень трудоемка. Например, исследование диска от 11-дюймового орудийного ствола, разрезанного на 12 слоев, потребовало более 600 измерений и свыше 2 мес. работы. Но, несмотря на эти затруднения, автор рекомендует этот метод как наиболее точный. Перечисленные варианты метода определения остаточных напряжений применяются и до настоящего времени. Однако эти методы почему-то часто называют именем различных иностранных ученых, применивших эти методы примерно на 40—50 лет позже. Так, появился метод Кирхберга (1933 г.), метод Мекри (1936 г.), метод Андерсона и др.

Труд Н. В. Калакуцкого отличается широтой поставленной задачи. Он пишет, что „цель предпринятых опытов состояла главным образом в том, чтобы не только определить величины и род внутренних напряжений, развивающихся в металле при различных условиях его обработки, но вместе с тем, чтобы вывести заключение о сопротивлении цилиндров и таким путем перейти к практическим результатам“. Определив внутренние напряжения в орудийных стволах и скрепляющих цилиндрах, автор сделал расчеты и показал, что действительная прочность изделий может резко отличаться от проектируемой, если вычисления последней сделаны обычным способом без учета внутренних напряжений. Он приводит поразительный пример, когда сопротивление 9-дюймового чугунного ствола удвоилось благодаря полезным внутренним напряжениям, в то время как в некоторых стальных стволах благодаря вредным внутренним напряжениям прочность оказалась почти вдвое ниже расчетной.

Чрезвычайный интерес представляют опыты Н. В. Калакуцкого по изучению зависимости внутренних напряжений от условий обработки металла. В числе опытов нужно отметить опыт № 79, в котором образец подвергался особой термической обработке с целью получения полезных напряжений. Автор не указывает, в чем заключалась эта обработка, или, как он называет ее, „особый отжиг“

Из таблицы Б (см. стр. 163) видно, что после этой обработки отношение прочности внутренних слоев к прочности внешних слоев получается больше, чем после обычного „отжигания в масле“ [1]. Это значит, что свойства металла по сечению изделия стали более равномерными, вероятно, путем высокого отпуска, после которого было сделано быстрое охлаждение канала ствола. Поэтому на поверхности канала возникли полезные сжимающие напряжения. Таким образом, по расчетам автора, предложенный им метод повысил прочность ствола на 90% против проектной, в то время как обычная обработка вследствие развития вредных напряжений дала уменьшение прочности на 25—28%. Н. В. Калакуцкий пришел к выводу, что предлагаемая им обработка позволит отказаться от скрепления стволов, что значительно упростило бы технологию производства, но его предложение было отклонено, и дальнейшие опыты пришлось остановить.

Опубликование работ Н. В. Калакуцкого оказало очень большое впечатление на современников. В периодической печати русской и иностранной появилось много статей, посвященных теории внутренних напряжений, разработанной Н. В. Калакуцким [2]. Газета „Новости и биржевая газета“ [3] писала: „Книга Н. В. Калакуцкого произвела настоящий фурор во всем образованном мире и немедленно была переведена на иностранные языки. Все лучшие технические журналы поспешили дать о ней восторженные отзывы“. Работа Н. В. Калакуцкого о внутренних напряжениях была помещена в 1888 г. на французском языке в журнале „Revue d'Artillerie“ [4], где также была опубликована отдельная статья Н. В. Калакуцкого [5]. Одновременно работа Калакуцкого была напечатана на английском языке в журнале „Engineering“ [6], а также в виде отдельной книги [7]. Английский журнал „Engineering“ в статье, посвященной работе Калакуцкого, писал: „... При употреблении для орудий стали как металла, повсеместно принятого теперь, мы имеем дело с напряжениями, несомненно большими даже чем в прежних чугунных пушках. Единственный человек, который вполне понял важное значение внутренних напряжений—это генерал русской артиллерии Н. В. Калакуцкий, произведший ряд весьма сложных и трудных опытов, чтобы определить действительную величину внутренних напряжений“ [8].

Интересно отметить полемику русских газет того времени с американской печатью о приоритете открытия Н. В. Калакуцкого.

---

[1] „Отжигание в масле“ — термическая обработка, применявшаяся на Обуховском заводе. См. примечание [13] на стр. 216 настоящей книги.

[2] Газета „Новости и биржевая газета“, от 17 октября 1887 г. Там же, I изд. от 16 мая 1888 г. Журнал „Инженер“, 1888 г., № 12.

[3] Газета „Новости и биржевая газета“, 19 января 1889.

[4] Kalakoutzky N., „Revue d'Artillerie“, январь — февраль 1888.

[5] Kalakoutzky N., „Etude sur les tensions interieures dans la fonte et l'acier, „Revue d'Artillerie, май, 1888.

[6] Kalokoutzky N., „Engineer“, 1887 — 1888, № 1667 — 1694.

[7] Kalakoutzy N., „Investigations into the Internal stresses in Cast Iron and Steel, London 1888.

[8] „Engineering“, London, февраль 1888 г

Газета „Новости“ писала, что в журнале „The Army and Novy Register“ в третьей по счету статье, посвященной исследованиям Н. В. Калакуцкого, говорится: „Замечательно то обстоятельство, что способ исследования внутренних напряжений, принятый Ватертоунским арсеналом, совершенно сходен во всех даже мельчайших подробностях со способом, выработанным г. Калакуцким“. Однако пальма первенства, отмечает газета „Новости“, все же остается на стороне русского исследователя, так как по признанию американского журнала „опыты г. Калакуцкого начались ранее американских“ [1]. Далее газета „Новости“ делает вывод: „Значит, если бы и могла быть речь о каком бы то ни было заимствовании, то уж, конечно, искать его пришлось бы не у нашего соотечественника, на несколько лет опередившего американских исследователей. Заимствование же возможно допустить, так как г. Калакуцкий не делал тайны из производимых им исследований“ [2].

Действительно, в своей книге Калакуцкий писал, что он получал много образцов для исследования внутренних напряжений от различных заграничных фирм, которым он сообщал результаты своих исследований еще до опубликования своих работ. Как указывает его ближайший помощник и сотрудник А. Скиндер [3], который участвовал под руководством Н. В. Калакуцкого в подготовительных экспериментальных работах по определению напряжений, через его руки проходили образцы, присланные от Круппа, от Тер-Нуара, от Камеля и других иностранных фирм. Таким образом, результаты исследований Н. В. Калакуцкого были известны многим иностранным фирмам, занимавшимся изготовлением орудий. Приоритет Калакуцкого был настолько очевиден, что никаких возражений в американской печати не последовало, и газета „Новости“ спустя 6 мес. в некрологе, посвященном памяти Н. В. Калакуцкого, писала, что хотя „в Америке пробовали оспаривать первенство исследований, но очевидность скоро устранила эту попытку и оставила пальму первенства за нашим соотечественником“ [4].

13 октября 1884 г. Н. В. Калакуцкий вышел в отставку и был приглашен Морским министерством на Обуховский завод для работы по техническому переоборудованию завода. По вопросам, связанным с новым оборудованием, Н. В. Калакуцкий ездил два раза за границу. После второй поездки он почувствовал приступы усилившейся болезни сердца. 17 января 1889 г., на 58-м году своей жизни, Н. В. Калакуцкий скончался. Несмотря на болезненное состояние, вплоть до самой смерти он продолжал работать и публиковать статьи по разным вопросам как в русских, так и в иностранных журналах. За несколько дней до смерти он еще просматривал присланную из Па-

---

[1] Газета „Новости и биржевая газета“, 1-е изд., 16 мая 1888 г.

[2] Там же.

[3] Скиндер А., Николай Вениаминович Калакуцкий, некролог, „Артиллерийский журнал“ 1889, № 12, стр. 5.

[4] Газета „Новости и биржевая газета“, 19 января 1889 г., некролог о Н. В. Калакуцком.

рижа корректуру своей статьи „Американские опыты по вопросу о скреплении орудий кольцами“ [1].

Как уже указывалось, современники высоко ценили работы Н. В. Калакуцкого. Его работы получили признание при его жизни. Так, еще в 1878 г. ему была присуждена премия имени генерала Дядина, выдававшаяся раз в 5 лет за лучшее сочинение по артиллерии или по наукам, имеющим непосредственное применение к артиллерии. В приказе по артиллерии говорится, что премия присуждена Н. В. Калакуцкому „за систематическое изучение свойств стали и др. материалов, применяемых в артиллерии“ [2].

Работы Н. В. Калакуцкого имели большое значение для развития производства стальных орудий и ружейных стволов в России. В восьмидесятых годах высокое качество продукции Обуховского завода завоевало всеобщее признание. Значительное участие в этом деле вместе с Д. К. Черновым и А. А. Ржешотарским принимал непосредственно Н. В. Калакуцкий, через руки которого прошли все орудия, изготовленные Обуховским заводом для сухопутной и морской артиллерии в период 1870—1884 гг. Его деятельность значительно способствовала развитию производства и улучшению качества изделий также и на других заводах. Как указывает С. Зыбин, „замечательные исследования“, произведенные нашим русским артиллеристом Калакуцким, оказали значительное влияние на оружейное производство. В соответствие с выводами Калакуцкого применялся следующий технологический процесс закалки ружейных стволов. „Стальные болванки для стволов, предварительно высверленные до калибра 0,275 дюйма и обточенные по наружности, подвергают закалке в льняном масле, для чего нагревают их последовательно в двух свинцовых ваннах; в одной — стволы нагревают до температуры около 700° Цельсия, а в другой — до 900° Ц. Для закалки нагретые стволы устанавливаются вертикально в станках, и масло под давлением от 20 до 40 фунтов на квадратный дюйм (т. е. от 1,4 до 2,8 *кг/см²* — *ред.*) прогоняется сквозь каналы стволов; охлаждение стволов маслом на станке производится до тех пор, пока их можно взять рукой. С теоретической точки зрения закалку стволов изнутри надо признать рациональной; при такой закалке, вследствие первоначального остывания внутренних слоев, в стенках должны получиться *полезные натяжения, увеличивающие сопротивление стволов давлению пороховых газов*“ [3].

Несмотря на большое практическое значение, теория внутренних напряжений после смерти Н. В. Калакуцкого долго не получала своего дальнейшего развития. Между тем идеи Калакуцкого вполне актуальны и в наше время. Его представления о механизме зарождения внутренних напряжений при литье и закалке, идея использования

---

[1] „Revue d'Artillerie“, февраль, 1889.

[2] О присуждении премии генерала от артиллерии Дядина за 1873—1878 гг., „Артиллерийский журнал“ № 4, 1879, разд. „Приказы по артиллерии“, стр. 127—128.

[3] Зыбин С., Материал охотничьих стволов и его свойства, „Оружейный сборник“ № 1, 1905, стр. 1—44.

полезных и борьба с вредными напряжениями путем соответствующих изменений технологических процессов закалки долгое время не находили достаточно широкого применения. Только после Великой Октябрьской социалистической революции ряд советских ученых продолжил работы Калакуцкого. Особенно важно отметить работы действительного члена АН УССР Н. Н. Давиденкова.

В одной из своих последних работ[1] Н. Н. Давиденков после анализа различных методов определения остаточных напряжений в телах вращения цилиндрической формы приходит к выводу, что наиболее надежные результаты для случая, когда длина цилиндра небольшая и не превышает диаметр более чем в 5—6 раз, могут быть получены только методом Калакуцкого, путем вырезки концентрических колец и дальнейшей их разрезки. Таким образом, метод Калакуцкого находит дальнейшее развитие в самое последнее время. Идеи Калакуцкого об использовании полезных внутренних напряжений находят применение в настоящее время и в целях повышения предела выносливости путем искусственного создания сжимающих напряжений на поверхности изделий.

---

[1] Давиденков Н. Н., Об измерении остаточных напряжений „Заводская лаборатория" № 2, 1950.

СПИСОК ТРУДОВ Н. В. КАЛАКУЦКОГО

1. Калакуцкий Н. В., Сталь (перевод с французского, „Артиллерийский журнал“ № 9 и 10, 1865.

2. Калакуцкий Н. В., Проба стальных орудий, „Артиллерийский журнал“ № 1, 1866, стр. 28—54.

3. Калакуцкий Н. В., Материалы для изучения стальных орудий, „Артиллерийский журнал“ 1867, № 5, стр. 784—817; № 7 стр. 1205—1227; № 9, стр. 1601—1642; № 10, стр. 1737—1760.

4. Калакуцкий Н. В., Руководство для обработки стальных изделий. Составлено мастером Вуличского арсенала Эде (перев. с англ. с большим количеством примечаний переводчика), „Артиллерийский журнал“ 1868, № 4, стр. 1—74; № 8, стр. 75—122; № 11, стр. 123—170; № 12, стр. 171—213; то же, отдельное издание, СПБ. 1868.

5. Калакуцкий Н. В., Громадные орудия прежнего времени, „Артиллерийский журнал“ № 7, 1869, стр. 1—37.

6. Калакуцкий Н В., Материалы для изучения сталелитейного дела в России, „Артиллерийский журнал“ 1869, № 1, стр. 48—119; № 4, стр. 750—814; № 9, стр. 284—307.

7. Калакуцкий Н. В. По поводу заметки с Княземихайловской фабрики, „Голос“ № 82, 1869.

8. Калакуцкий Н. В., О старинных русских орудиях (по поводу возражений г. Бранденбурга), „Артиллерийский журнал“ № 3, 1870, стр. 507—540.

9. Калакуцкий Н. В., О некоторых сплавах меди, „Артиллерийский журнал“ 1870, № 12, стр. 863—883; 1871, № 1, стр. 43—65.

10. Калакуцкий Н. В., Испытания ствольной стали и опыты над малокалиберными стволами разных заводов, „Оружейный сборник“ 1871, № 1, ч. II, стр. 1—17; № 2, стр. 34—78; № 3, стр. 76—91; 1874, № 2,стр. 70—77.

11. Калакуцкий Н. В., По поводу разрыва дульной части в 11-дюймовом орудии, „Русский инвалид“ № 239, 1871.

12. Калакуцкий Н. В., Александровский чугунно-пушечный завод, „Артиллерийский журнал“ № 11 и 12, 1874.

13. Калакуцкий Н. В., Подробное изложение результатов механических испытаний, произведенных над сталью Обуховского завода. Отчет артиллерийского отделения Морского технического комитета за 1876 г., СПБ. 1877.

14. Калакуцкий Н. В., Значение фосфористой стали для промышленных целей", газета „Голос" № 158, 1875.

15. Калакуцкий Н. В., Какое значение на нашем железном рынке будет иметь ежегодный выпуск на него железными дорогами изношенных и негодных рельсов и какое наилучшее употребление можно из них сделать, „Записки Русского технического общества вып. 3, 1875, стр. 281—290.

16. Калакуцкий Н. В., Разъяснение по поводу фосфористой стали, газета „Голос" № 168, 1875.

17. Калакуцкий Н. В., Работы по определению давлений пороховых газов в стальных малокалиберных стволах при различных условиях стрельбы, „Оружейный сборник, 1879, № 1, ч. I, стр. 108; № 2, ч. I. стр. 53; № 3, ч. I, стр. I; то же отдельной книгой, СПБ. 1879.

18. Калакуцкий Н. В., Новая английская артиллерия в начале 1886 г., „Морской сборник" № 12, 1886, стр. 1—87.

19. Калакуцкий Н. В., Исследование внутренних напряжений в чугуне и стали: 1) издание Вольфа, СПБ. 1887; 2) издание Горного ученого комитета, СПБ. 1888; 3) „Engineer", London 1887—1888, № 1667—1694; 4) Kalakoutzky N., Investigations into the Internal stresses In Cast Iron and Steel, London 1888; 5) Kalakoutsky N., „Revue d'Artilleire", январь — февраль 1888;

20. Калакуцкий Н. В., Заметка по поводу опытов для исследования внутренних напряжений. „Revue d'Artillerie", май, 1888 г.

21. Калакуцкий Н. В., Американские опыты по вопросу о скреплении орудий кольцами, „Revue d'Artillerie", сентябрь—октябрь 1888; февраль 1889

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЧУГУНЕ И СТАЛИ [1]

Н. В. КАЛАКУЦКИЙ

I

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ОТ ЕГО ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Под внутренними напряжениями мы разумеем такие, которые существуют в стенке какого-либо цилиндра или иного предмета в его спокойном состоянии, т. е. тогда, когда внешние силы на него не действуют. От приложения к такому цилиндру давлений на наружную поверхность, или при действии давлений в его канале, во внутренних слоях стенки появятся новые или добавочные давления, независимые от величины бывших ранее внутренних напряжений; вновь образующиеся напряжения складываются с напряжениями существовавшими, но складываются так, что в каждой точке стенки по какому либо направлению будет существовать равнодействующая этих двух напряжений. Так, например, если величину внутреннего напряжения на расстоянии r_x от оси цилиндра и в направлении касательной к поперечному сечению канала, назовем через t, а величину добавочного напряжения, появившегося в той же точке и в том же направлении от действия давления в канале цилиндра, обозначим через T, то вновь образующееся напряжение будет $t + T$.

Если обозначим наружный и внутренний радиусы цилиндра через R и r_0 и примем давление, действующее на наружную поверхность, равным нулю, то, при давлении P_0 в канале, напряжение на радиусе r_x определяется следующим выражением, выводимым из известных основных формул Ламе:

$$T = P_0 \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} \cdot \frac{R^2 + r_x^2}{r_x^2},$$

откуда видно, что T достигает наибольшей величины при $r_x = r_0$, т. е. для слоя, непосредственно прилегающего к каналу цилиндра. Обозначая внутреннее напряжение в этом слое через t_0, а напряжение, развивающееся от действия в канале давления P_0 для того же слоя — через T_0 и принимая, что сумма обоих этих

напряжений не должна превосходить величины предела упругости U — получим

$$T_0 = U - t_0.$$

А соответствующее этому T_0 давление в канале будет

$$P_0 = (U - t_0)\frac{R^2 - r_0^2}{R^2 + r_0^2}.$$

Давление это увеличивается с возрастанием $(U - t_0)$. При t_0 положительном, т. е. когда в стенке цилиндра внутренние напряжения таковы, что металл, в слоях, ближайших к каналу, находится в растянутом, а в наружных слоях — в сжатом состояниях, — то цилиндр будет иметь тем меньшую прочность, чем больше будет численное значение t_0, и такого рода напряжения называются вредными.

При t_0 отрицательном прочность цилиндра увеличивается с увеличением численного значения t_0, и тот вид внутренних напряжений, при котором слои, ближайшие к каналу, находятся в сжатом, а наружные —в растянутом состояниях, называется полезным.

Поэтому для увеличения сопротивления цилиндра необходимо стремиться достигнуть на внутреннем слое предварительного сжатия, возможно близкого к пределу упругости материала. В сущности идея эта не представляет ничего нового, так как она вошла как основное начало в теорию скрепленных кольцами орудий. Теория эта уже указала, каким образом можно развить в стенке орудия, в его спокойном состоянии, до выстрела, полезные предварительные напряжения, и тем самым увеличить его сопротивление. Такого рода напряжения, появляющиеся при составлении стенки цилиндра из нескольких слоев, нагоняемых один на другой с определенным стягиванием, мы называем напряжениями составных цилиндров, в отличие от натуральных напряжений, развивающихся в однородных массах в зависимости от условий обработки металла. Если мы представим себе стенку цилиндра, составленную из множества очень тонких слоев, например из проволоки, навитой одна на другую с определенным стягиванием, причем внутренний ее слой представлял бы собой ствол орудия, то распределение внутренних напряжений и их величина были бы очень близки к идеально полезным напряжениям однородного цилиндра; но в цилиндрах, составляемых из двух, трех или четырех слоев большой толщины, — в этом отношении существует значительное различие.

Величины напряжений составных цилиндров определяются расчетом при предположении, что в отдельных слоях (стволе и кольцах), из которых состоит стенка, нет предварительных натуральных напряжений. Все современные орудия приготовлены при допущении справедливости такого предположения. Между тем еще в 1857 г. Родман первый обратил внимание на то, что

в металле, при известных условиях литья и последующего остывания, должны развиваться внутренние напряжения, — и эти соображения привели его к отливке чугунных орудий с охлаждением их канала водой и при наружном подогреве опок. Отливка орудий по способу Родмана хотя и была введена повсеместно, но нигде до сих пор не было произведено сколько-нибудь серьезных опытов по исследованию внутренних напряжений, а при переходе от чугунных орудий к стальным — вопрос этот был отодвинут на задний план, и только в последнее время к нему стали возвращаться.

Придерживаясь существующей теории скрепления орудий кольцами, мы можем составить себе ясное представление о наивыгоднейшем виде внутренних напряжений как в однородном, так и в составном цилиндрах. В этом отношении мы можем указать на работы полковников В. А. Пашкевича и В. А. Дюшена; труды первого из них был напечатаны в Арт. журнале за 1884 год, а второго — в отдельной брошюре «Основания теории скрепленных орудий», из которой мы и заимствуем некоторые из нижеследующих объяснений.

Наибольшее сопротивление ствола или цилиндра будет достигнуто, если при выстреле все слои его стенки одновременно расширятся до предела упругости материала. В таком случае, сохраняя прежние обозначения, будем иметь

$$P_0 = T\frac{R - r_0}{r_0}. \qquad (1)\ [2]$$

Но так как до действия давления в канале внутренние предварительные напряжения до выстрела не должны превосходить предела упругости [1], то величина R и должна быть определена из сказанного условия.

В цилиндре, в котором в состоянии покоя не было предварительных напряжений, наиболее растянутая фибра будет при выстреле находиться на внутреннем радиусе, а расширения всех остальных слоев стенки будут итти уменьшаясь к наружному радиусу, причем напряжение для фибры радиуса r_x

$$t'_x = P_0\frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2}\cdot\frac{r_x^2 + R^2}{r_x^2}. \qquad [3]$$

Следовательно, для достижения наибольшего сопротивления цилиндра, величина t_x, предварительного натурального напряжения, определится разностью $T - t'_x$, а так как величина T выражена уравнением (1), то

$$t_x = T\left(1 - \frac{r_0}{R + r_0}\cdot\frac{r_x^2 + R^2}{r_x^2}\right). \qquad (2)$$

[1] Заметим, однако, что в составном цилиндре сжатие металла на поверхности канала может перейти за предел упругости, но такое обстоятельство не может иметь места при натуральных напряжениях.

Наибольшее значение $t_x = t_0$ отвечает поверхности канала и притом оно должно равняться $= -T$ [4], следовательно

$$\frac{r_0^2 + R^2}{r_0 (R + r_0)} = 2,$$

откуда [5]

$$P_0 = T\sqrt{2} = 1{,}41T.$$

Из всего сказанного выходит, что в однородном цилиндре достигнуть одновременного расширения до предела упругости всех слоев стенки при выстреле возможно лишь при известном соотношении радиусов и когда мы задаемся наибольшим допустимым давлением в канале, не превосходящим 1,41 U.

Уравнение (2) можно изобразить так:

$$t_x = T\frac{R}{R + r_0} \cdot \frac{r_x^2 - Rr}{r_x^2}. \tag{3}$$

Полагая в нем последовательно $r_x = r_0$ и $r_x = R$, получим выражения для предварительных напряжений на наружном и внутреннем радиусах

$$t_R = T\frac{R - r_0}{R + r_0} \quad \text{и} \quad t_{r_0} = -T\frac{R}{r_0} \cdot \frac{R - r_0}{R + r_0}.$$

Следовательно, в однородном цилиндре, при идеально полезных внутренних напряжениях, слой, прилегающий к каналу, должен находиться в сжатом состоянии и величина этого сжатия относится к величине растяжения наружного слоя обратно пропорционально их радиусам. Затем очевидно, что внутренние напряжения будут следовать определенному и весьма простому закону, а именно: в стенке цилиндра должен существовать слой, напряжение которого O (слой этот лежит в радиусе, равном $\sqrt{Rr_0}$); от этого слоя напряжения идут возрастая к внешним радиусам цилиндра, на которых и достигают наибольшей величины, оставаясь притом во внутренних слоях сжатыми, а в наружных — растянутыми.

Путем весьма несложных вычислений можно определить также и внутренние давления, соответствующие означенными напряжениям. Для них получается в окончательном и наиболее удобном для вычислений виде следующее выражение:

$$P_x = T\frac{R}{R + r_0}\left(\frac{R}{r_x} - 1\right)\left(1 - \frac{r_0}{r_x}\right). \tag{4}$$

Чтобы нагляднее представить распределение напряжений и давлений в стенке однородного цилиндра, возьмем для примера

ствол калибром в 6 *дм* (153 *мм*). Положим $T = 3000$ атмосфер [6], следовательно, при наивыгоднейших условиях $P_0 = 1{,}41\ T$ или 4230 атмосфер. А из выражения (1) определим $R = 184{,}36$ *мм*. При этих данных произведено вычисление величин внутренних напряжений и давлений для построения диаграммы, представленной на чертеже 2 фиг. 1. Напряжения при выстреле под давлением в канале в 4230 атмосфер выражены линией *bc*, параллельной оси абсцисс, ибо эти напряжения во всех слоях стенки достигают одинаковой величины и притом равной пределу упругости 3000 атмосфер.

Если бы в стенке ствола не существовало до выстрела никаких внутренних напряжений, то его сопротивление $P_0 = U\dfrac{R^2 - r_0^2}{R_2 + r_0^2}$ или 2115 атм., т. е. было бы вдвое меньшее, чем в идеальном цилиндре. Из этого видно насколько выгодно развивать в металле полезные напряжения и сообразно этому направлять условия его обработки. Если на это не будет обращено должного внимания, и в металле разовьются вредные напряжения, — то сопротивление цилиндра всегда будет ниже 2115 атм., а при переходе этих напряжений за известную величину, — предел прочного сопротивления будет перейден даже и без действия внешних усилий (цилиндр не выдержит никакого давления в канале, ибо от всякого давления растяжение по касательной окружности увеличится в слоях цилиндра), хотя бы металл по испытанию пробных образцов, взятых от ствола, и обладал тем же высоким пределом упругости в 3000 атмосфер.

Для более наглядного уяснения различия между законом распределения полезных внутренних напряжений в однородном и составном цилиндрах, представим себе этот последний (при тех же наружных и внутренних радиусах) составленным из двух слоев, т. е. из ствола, скрепленного кольцом, надетым при наивыгоднейшем стягивании, причем внутренний радиус этого кольца $= \sqrt{Rr_0}$ или 118,7 *мм*. Вычислив по известным общепринятым формулам как величину давления, производимого кольцом на ствол, так и величины напряжений и давлений в стволе и кольце до и после выстрела, мы построили диаграмму, помещенную на чертеже 2 фиг. 2.

Сравнение диаграмм показывает, в чем состоит различие между внутренними напряжениями в однородном и составном цилиндрах. Из сравнения этих диаграмм видно, что в скрепленном стволе напряжения слоев до выстрела идут уменьшаясь от внутренних радиусов ствола и кольца к наружным радиусам, но это уменьшение сравнительно невелико. Того слоя, в котором напряжения в состоянии покоя равны нулю — нет. Во-вторых, при выстреле одновременно достигают напряжения равного предела упругости не все слои, а только два слоя — на внутренних радиусах ствола и кольца, почему и выходит, что

такой цилиндр обладает меньшим сопротивлением, чем однородный цилиндр при существовании в нем идеально полезных внутренних напряжений. Вычисление показывает также, что сопротивление составного ствола 3262 атм., или 72% сопротивления однородного цилиндра. Увеличивая число слоев или рядов скрепляющих колец, при той же общей толщине стенки и том же калибре ствола, мы введем большее число слоев, принимающих равное участие в общем сопротивлении и достигающих при выстреле одинакового и притом наибольшего допустимого напряжения. Стремление осуществить эту идею выразилось в предложениях Лонгриджа, Шульца др. — обвивать орудийные стволы проволокой, а также в недавних подражаниях этой системе, а именно в составлении орудий из увеличенного числа утоненных колец, нагоняемых на ствол. Но как в проволочных пушках, так и в орудиях с увеличенным числом рядов колец (от 4 до 6 и более рядов) ожидаемое повышение сопротивления связано с допущением отступлений от одного из основных принципов теории скрепления, так как в большей части орудий этих типов предварительное сжатие металла на поверхности канала переходит за предел упругости [1]. Здесь мы видим пример отступления от теоретических начал вместе с допущением предположения, что в стенке ствола, до скрепления его кольцами, не существует никаких натуральных напряжений. Но если бы ствол имел идеально полезные напряжения, и мы задались бы мыслью скрепить его кольцами или обвивкой проволоки, придерживаясь ныне принятых расчетов, то без сомнения мы расстроили бы металл ствола и уменьшили бы, а не увеличили его сопротивление, потому что металл на поверхности канала оказался бы до выстрела сжатым на величину, в два раза превосходящую предел упругости. Примером такой порчи может служить принятый способ скрепления кольцами чугунных стволов, отлитых по способу Родмана. Если бы было принято в соображение то обстоятельство, что в них должны быть полезные напряжения, достигающие несомненно значительной величины, то на такие стволы стали бы надевать кольца или без всякого стягивания, или с весьма незначительным стягиванием; а между тем к ним, во всех артиллериях, применяли такие расчеты, которые были правильны лишь для стволов, не заключающих в себе никаких натуральных напряжений.

Не менее важно при постройке орудий знать и принимать в соображение при скреплении стволов кольцами величины и распределение в стволе вредных напряжений, если таковые в нем существуют. Если бы они были известны, то скрепляя ствол кольцами, было бы возможно довести сжатие металла у поверх-

---

[1] В некоторых случаях, конечно, это может быть полезно, как, например, когда ствол имеет вредные напряжения; но для того, чтобы применить соответствующее стягивание, необходимо знать величину таких напряжений.

ности канала до желаемой величины, уничтожив там существовавшее предварительное натуральное расширение, и таким образом возместить происходящее от того уменьшение сопротивления ствола. Точно так же необходимо изучить характер и величину напряжений в кольцах, в зависимости от условий их обработки, — так как иначе невозможно произвести вполне правильного скрепления стволов. Если в стенке кольца существовали, до его нагонки на ствол, напряжения вредные, то при выстреле слой на внутреннем радиусе кольца, надетого с ныне рассчитываемым стягиванием, будет расширяться за допустимый предел, а вследствие этого прочность орудия может быть менее ожидаемой [1].

Из всего вышеизложенного очевидно, что для точного определения сопротивления цилиндров и для правильного расчета скрепления стволов кольцами — безусловно необходимо знать, существуют ли внутренние натуральные напряжения в стволе и кольцах, какова их величина и какого они рода: т. е. полезные или вредные. Применяя все вышеизложенное к современным орудиям, нельзя не заметить, что при постройке их нигде не обращено внимания на указанные исследования. Если этим можно до некоторой степени пренебречь при приготовлении орудий небольших калибров, со стенками незначительной толщины, при которой нельзя ожидать сильно развитых внутренних напряжений, то этого нельзя сказать о громадных дорогостоящих орудиях последнего времени. В орудиях этих стены ствола и колец имеют большую толщину, а следовательно, существует огромная вероятность развития в них весьма значительных внутренних напряжений. Что прочность этих орудий далеко ниже предполагаемой — это подтверждается из года в год повторяющимися случаями разрывов.

Опасение за стойкость таких пушек высказывается в тех мерах предосторожности, которые повсеместно приняты для их сбережения. А между тем орудия эти получаются с первоклассных заводов Европы, и к ним применено все, что может дать лучшего артиллерийская и заводская техника, — и потому казалось бы, что не должно быть места опасениям за прочность таких пушек. Но тем не менее опасения повсеместно существуют и невольно приводят к мысли, что как самая постройка орудий больших калибров, так и условия их приготовления — не могут быть признаны за наилучшие. В виду громадности затрат, которые несет каждое государство, чтобы иметь в своем вооружении вполне надежные пушки — вопрос требует возможно скорого и обстоя-

---

[1] Когда ствол обвивают проволокой (как в проволочных пушках), то предварительным или натуральным напряжением проволоки можно пренебречь, вследствие ее небольшой толщины; но при скреплении ствола утоненными кольцами, нагоняемыми с увеличением числа рядов — величина натуральных напряжений в кольцах имеет немаловажное значение в смысле увеличения или уменьшения сопротивления всего орудия.

тельного исследования. Первым шагом в этом направлении является изучение внутренних напряжений в металле, потому что если они существуют и могут, при известных условиях, достигать значительной величины, то необходимо ими воспользоваться для увеличения сопротивления, а не оставлять их действовать в невыгодную сторону.

Изучение натуральных внутренних напряжений имеет важное значение не в одном только орудийном деле, оно не менее полезно и при выделке всякого рода предметов, долженствующих обладать большим сопротивлением. Почти каждому приходилось слышать о внезапной поломке коленчатых валов, штоков, о разрывах громадных цилиндров и труб, о лопании шин и т. п. В большинстве случаев исследование причин подобных внезапных разрывов и поломок не приводило к положительным результатам; обыкновенно оказывалось, что металл имел требуемый предел упругости и удовлетворял всем условиям, указанным инструкциями и т. п. Быть может, если бы при этих исследованиях было обращено внимание на состояние внутренних напряжений в металле — то причина подобных случаев была выяснена, а следовательно, и устранена.

На практике известно также проявление весьма значительных напряжений в разного рода стальных предметах, подвергаемых закалке, каковы, например: штампы, разного рода инструменты, клинки и т. п. К этому же разряду предметов можно отнести тонкие стальные листы после их прокатки при низкой температуре и некоторые другие предметы, подвергаемые наклепке в холодном состоянии.

В литейном деле еще более случаев проявления внутренних напряжений. Так, несоблюдение некоторых практических правил во время отливки и затем следующего охлаждения ведет к тому, что отлитая вещь, вынутая из опок в целом виде, лопается через несколько часов или дней. Артиллерийские бронепробивающие снаряды из литой некованной стали, а также кованные и закаленные снаряды, металл которых обладает сопротивлением разрыву свыше 12000 атмосфер, при пределе упругости свыше 6 и 7 тысяч атмосфер, дают сквозные трещины и лопаются на станках при заточке желобка для помещения медного заднего пояска. В тех же стальных снарядах, равно как и в снарядах из закаленного чугуна, отлетают головные части во время хранения в складах или при перевозках. Такого рода явления, как мне кажется, служат несомненным доказательством существования в металле их внутренних напряжений значительной величины.

По всей вероятности, выделка многих предметов достигла бы несравненно большего совершенства, если бы она своевременно сопровождалась изучением внутренних напряжений.

Выяснив значение и сущность предмета, я перехожу к изложению тех опытов, которые были мною произведены.

II

СПОСОБ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ОБЩЕЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ХОДА РАБОТ

Принцип, положенный мною в основание исследования внутренних напряжений, заключается в следующем.

Представим себе отрезанный от какого-либо цилиндра диск, который не подвергается никаким внешним давлениям, но в котором мы предполагаем существование внутренних напряжений. Если такие напряжения существуют, то они будут зависеть от величины того радиуса, на оконечность которого действуют. От этих напряжений должны явиться на цилиндрической поверхности данного радиуса, внутри стенок, нормальные к этой поверхности давления, вообще изменяющиеся при переходе от этой поверхности к другой, с большим или меньшим радиусом. Если мы вырежем из диска наружный или внутренний слой, то вследствие уничтожения давления, которое действовало на этот слой в его первоначальном состоянии, произойдет изменение радиусов; другими словами — вырезанный нами слой расширится или сожмется, и по величине изменений радиусов мы можем определить то давление, которое существовало в диске до вырезки слоя.

Из вышеприведенного основного принципа определения внутренних напряжений видно, что дело сводится к точному измерению изменения радиусов, происходящему вследствие уничтожения давлений, существовавших в стенке диска. А так как зависящие от того перемещения частиц всегда заключаются в пределах упругих изменений металла, следовательно, они всего сильнее и значительнее должны проявляться в металлах, обладающих высоким пределом упругости, как например, в стали, при различных условиях ее обработки, а также в чугунах, отливка которых сопровождается быстрым охлаждением; в металлах же, называемых мягкими, каковы: красная медь, некоторые сорта железа и т. п. — величина внутренних напряжений не может быть значительна. Напомню также, что относительные удлинения, отвечающие пределу упругости самых твердых сортов стали, не превосходят 0,0025, а в чугунах они редко достигают до 0,0008, а потому приходится улавливать и измерять весьма малые перемещения, и уже по ним вычислять давления и существующие внутренние напряжения. Из этого видно, что определение изменения, происходящего в слоях диска, должно быть ведено с большей точностью, так как в большинстве случаев приходится иметь дело с абсолютными величинами, не превышающими сотых долей миллиметра.

Первоначально для своих работ я пользовался катетометрами, употребляемыми для определения удлинений в пределах упругости при испытании брусков растяжением на прессе. Для того

чтобы работать такими катетометрами, было необходимо устанавливать испытываемые диски вертикально и действовать двумя приборами, производя отсчеты по двумя шкалам. Это представляло много неудобств и затруднений, — а потому результаты первых опытов пришлось бросить как неудовлетворительные. В конце 1871 года я спроектировал особый прибор, специально приспособленный для предположенных работ. Он был выполнен покойным Георгом Брауэром, одним из лучших в Европе механиков по приготовлению точных инструментов. Общий вид прибора представлен на чертеже 1. В сущности он весьма прост и представляет несколько видоизмененный компаратор, в котором на горизонтально укрепленную теобразную рейку *a* надеты обоймы, поддерживающие в вертикальном положении два микроскопа *д* с микрометрами Рамсдена. Обоймы с микроскопами могут свободно передвигаться вдоль рейки, но при производстве наблюдений они закрепляются неподвижно. Исследуемый диск кладется на платформу *b* или стол, который может быть по произволу или вращаем вокруг своей оси для установки диска в надлежащем положении, или закреплен неподвижно. При начале опыта шкала устанавливается на одном горизонтальном уровне с верхней плоскостью диска. Платформа, на которой лежит диск, опускается и подымается, и таким образом верхняя плоскость диска приводится к требуемому уровню. Окуляры микроскопов устанавливаются так, чтобы одно деление микрометра составляло 0,001 *мм* и отсчет этот поверяется при начале каждого опыта. Доли меньшие 0,001 *мм* определялись на глаз, примерно, по положению черты на головке микрометрического винта относительно делений, по которым делается отсчет перемещения волосков микрометра. Когда диск подведен под микроскопы и эти последние установлены приблизительно над точками, обозначающими измеряемый диаметр, то как платформа, так и обоймы микроскопов закрепляются неподвижно, и окончательная установка волосков на точках делается уже посредством микроскопического винта. После этого платформа с диском отводится назад и в то же время под трубы подходит шкала.

Для повторения сделанного наблюдения нет надобности выводить трубы из данного им положения, а остается только подвести снова диск и затем опять шкалу.

Употребляемая мною шкала разделена на полумиллиметры и сверена с парижским нормальным метром.

Точность измерений, достижимая на моем приборе, была бы вполне достаточна для указанной цели, если бы я мог производить все свои наблюдения при одной постоянной температуре. Но при нашем климате достигнуть этого весьма затруднительно, а для меня даже невозможно, так как приходилось иногда переносить прибор из одного помещения в другое, и притом все помещения которыми я пользовался, не были приспособлены к тому, чтобы сохранять постоянную температуру. Между тем поправка в за-

висимости от температуры, при которой производилось наблюдение, имеет большое значение на точность получаемых результатов. Шкала была серебряная, и исследуемые диски по большей части стальные или чугунные. Коэфициенты линейного расширения серебра и стали различны, а так как поправки на температуру зависят от разности этих коэфициентов, то было существенно необходимо определить их точные величины. Ввиду этого я обратился к трудам известных ученых, каковы: Laplace, Lavoisier, Smeaton, Roy, Troughton и другие. Опытов над серебром было сделано крайне мало, и коэфициент линейного расширения его определен разными экспериментаторами от 0,000019 до 0,000020826; сталь и железо более исследованы, но зато и разница в определениях коэфициентов значительнее, а именно от 0,000009 до 0,000012583. Ввиду такого разнообразия определений я должен был предпринять ряд довольно обширных опытов, на основании которых и принял для своих вычислений разницу коэфициентов расширения серебра и стали в 0,00001 на 1° Цельсия. Все результаты опытов, помещенные в прилагаемых при сем таблицах, дают измерения, приведенные к температуре 15° Ц, т. е. к той средней температуре, при которой были произведены все мои наблюдения.

Исследуемые мною диски я не мог разрезывать на очень большое число концентрических колец, так как величина прорезей, при высоте дисков около 1 дюйма выходила от 2,5 до 4 *мм*. Диски в зависимости от величины наружного радиуса и общей толщины стен, разрезались на 6 и до 12 концентрических колец, а диски с малым наружным радиусом или с малой толщиной стен были разрезаемы — и то с трудом, — на 2 и до 4 слоев.

В каждом слое обмерялось не менее 4 диаметров, а иногда число диаметров доходило до 6. Диаметры всегда проводились под равными углами.

Столь большое число измерений в каждом слое делалось собственно потому, что вырезываемые кольца нередко принимали эллиптическую форму, а поэтому становилось необходимым путем средних величин, выводимых из измерений по нескольким диаметрам в одном и том же слое, устранять влияние ошибки, зависящей от такого деформирования, тем более, что большие и малые оси эллипсисов в различных слоях иногда располагались различно.

На фиг. 1, 2, 3, черт. 3, показано, как разрезывались диски и как назначались диаметры. Первоначально опыты были ведены так, что диск разрезался сразу на число намеченных слоев. Второй ряд опытов характеризовался тем, что вырезанные из диска концентрические кольца я стачивал, или вытачивал, чтобы убедиться заключаются ли в них по вырезке из диска остающиеся внутренние напряжения. Третий ряд опытов был веден с перерезкой по данному радиусу (в большей части опытов между диаметрами № 1 и 2) стенки отдельных концентрических колец.

При этих опытах получались самые большие изменения радиусов. Они иногда были так велики, что превосходили величину удлинений, отвечающих пределу упругости, как например в чугуне, где относительная величина изменений определена в 0,002. При этих опытах было также несколько случаев, при которых, так сказать, наглядно можно было убедиться в поразительном проявлении действия внутренних сил, заключенных в стенке сравнительно тонкого кольца. Так, например, некоторые кольца, при перерезывании их стенок столь сильно сжимались, что резцом нельзя было работать, а приходилось даже, для освобождения его, выпиливать из кольца кусок металла. Было также несколько случаев, когда кольца при перерезке стенки сами собой разрывались в 2 и даже в 3 местах, как то было при опытах со стальными кованными и закаленными снарядами. При этом способе исследования хотя и обнаруживались очень характерные особенности, но я не продолжал его главным образом потому, что кольца, при прорезывании их стенки, сильно деформировались, причем срезы принимали нередко неправильную и волнистую форму, отчего производство измерений усложнялось, а между тем получаемыми результатами нельзя было практически пользоваться по неимению готовой теории, а для составления ее необходимы были новые опыты, которые только отклоняли меня от главной цели.

Окончательно я принял следующий способ исследования. Начинал работу при последовательном срезании концентрических колец снаружи, или вырезанием их с внутренней стороны диска, причем производил измерение всех диаметров как в вырезываемых кольцах, так и в остающихся неразрезанными частях диска.

Работа эта очень медленна и томительна. Достаточно сказать, что при исследовании диска от 11-дюйм. орудийного ствола, разрезанного на 12 слоев, с обмером точек на 4 диаметрах в каждом слое, пришлось сделать более 600 наблюдений, а самый опыт продолжался более двух месяцев, считая промежутки времени, в течение которого диск находился в мастерской для вырезывания колец. Но несмотря на такую медленность хода опыта, этому способу исследования я отдаю предпочтение перед всеми другими способами, так как при нем получается возможность очень точно определять давления на всех наружных и внутренних радиусах слоев; таких полных данных нельзя было иметь ни при одном из прежде описанных способов.

При постепенном снимании колец лучше вести работу начиная вырезку слоев с внутренней стороны, так как при этом получаются более точные результаты, чем при срезании колец снаружи, что зависит от того, что наибольшее число обмеров делается над постепенно увеличивающимися диаметрами.

Всех опытов произведено мною 87; но из них я привожу здесь только наиболее характеристичные. В таблицах помещены лишь

окончательные результаты со всеми данными, необходимыми для вычислений. Я опускаю подготовительные подробности опыта, как-то: показания микрометров, температур и т. п. Все эти цифры ничего не прибавят для изучения вопроса, а увеличат только бесполезно объем моих таблиц. Для желающих же ознакомиться с подробностями и самим ходом работ, я составил полную таблицу (опыт № 79), представляющую собственно извлечение из журнала опытов [7].

Обозначения, принятые в таблицах, понятны сами собой. Для устранения недоразумений замечу только, что в третьей графе таблиц, под рубрикой «происшедшее изменение» показана абсолютная разность между первоначально обмеренным и изменившимся диаметрами. Знаки + выражают, что слой расширился, а —, что он сжался. $\frac{\delta r''}{r''}$ выражает относительную величину происшедшего изменения и сопровождается знаком, противоположным тому, который был поставлен при результатах обмеров; это значит, что фактически в данном слое, когда он не был вырезан из диска, существовало напряжение, противоположное тому, которое было найдено опытом по уничтожении давления на внешних радиусах вырезанного слоя.

Затем мне остается сказать несколько слов о некоторых обстоятельствах, влияющих на точность наблюдений. Так, например, точность обмера много зависит от того, в какой мере тонки и хорошо видимы наблюдаемые точки. Точки эти на дисках обозначались пересечением двух линий, одна из которых проводилась по радиусу, а другая — концентрически с окружностью круга, описанного наружным или внутренним радиусом. Соединить оба условия, чтобы черты были очень тонки и отчетливо видимы, не так легко, как то с первого взгляда может показаться. Если черта толста и хорошо видима, то точки пересечения выходят грубыми, и при установке по ним волосков для наблюдений является некоторая ошибка. Наоборот, очень тонкие черты сливаются с окружающими чертами и их трудно находить. Затем, весьма важно предохранить намеченные точки от порчи их в мастерской, при разрезке диска на концентрические кольца. Случаи порчи бывали нередко, и несколько работ пришлось оставить неоконченными. Иногда такая порча была в сущности ничтожна, но она очень усложняла ход работ, потому что было трудно отыскивать намеченные ранее точки.

III

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО НИМ ПРЕДЕЛА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРА ОТНОСИТЕЛЬНО УСИЛИЙ, ИЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО РАСШИРЕНИЙ

Цель предпринятых опытов состояла главным образом в том, чтобы не только определить величины и род внутренних напряжений, развивающихся в металле при различных условиях его обработки, но вместе с тем, чтобы вывести заключение о сопротивлении цилиндров и таким путем перейти к практическим результатам.

Из предшествующего общего изложения хода опытов видно, что вследствие разрезки диска на концентрические слои и при постепенном утонении его стенки, уничтожались существовавшие в нем давления, — что и выражалось в изменениях радиусов. Перемещение δ по направлению радиуса какой-либо точки, находящейся на расстоянии r_x от оси диска, выражается следующей зависимостью:

$$\delta = \frac{r_x}{3\Sigma} \cdot \frac{P_0 r_0^2 - P' R^2}{R^2 - r_0^2} + \frac{4}{3} \frac{r_0^2 R^2 (P_0 - P')}{r_x \Sigma (R^2 - r_0^2)} \quad [8] \quad \text{I}$$

Здесь P_0 и P' обозначают внутреннее и наружное давления, R и r_0 наружный и внутренний радиусы диска, а Σ коэфициент упругости материала, который мы принимали для стали равным 2000000, а для чугуна — 1000000 *кг* на 1 *см*².

При $P' = 0$, т. е. когда цилиндр подвержен только внутреннему давлению

$$\delta = \frac{P_0}{3\Sigma} \cdot \frac{r_0^2 (r_x^2 + 4R^2)}{r_x (R^2 - r_0^2)} \quad \text{II}$$

При $P_0 = 0$, т. е. когда цилиндр подвержен только наружному давлению

$$\delta = -\frac{P'}{3\Sigma} \cdot \frac{R^2 (r_x^2 + 4r_0^2)}{r_x (R^2 - r_0^2)} \quad \text{III}$$

Эти основные формулы и были применены для вычислений давлений по опытным данным. Чтобы ознакомить с ходом вычислений, возьмем для примера опыт № 65, табл. 14 (см. стр. 200—205).

Когда наружный слой или кольцо № 6 было срезано, то так как наружное давление P' было равно 0, следовательно, изменение радиуса r_6'' произошло от уничтожения внутреннего давления, действовавшего на окружность радиуса r_6, а потому

$$P_6 = \frac{3\Sigma \delta_6 r_6'' (R_6^2 - r_6^2)}{r_6^2 (r_6^2 + 4R_6^2)} \quad \text{(A)}$$

Подставляя из таблицы 14-й соответствующие величины, найдем, что $P_0 = -0{,}0000477\ \Sigma$ или 95,5 атм.

Это срезанное кольцо было затем сточено и его наружный радиус, вместо $R_6 = 273{,}75$ *мм*, сделался $R'_6 = 251{,}75$ *мм*. По изменению δ_6 радиуса r''_6 можно получить второе давление в том же слое на радиус R'_6. Величины P_6 и δ_6 нам известны, а потому

$$P'_6 = P_6 \frac{r_6^2 (r''^2_6 + 4R'^2_6)}{R'^2_6 (r''^2_6 + 4r_6^2)} - 3 \sum \frac{\delta_6 (R'^2_6 - r_6^2)\, r''_6}{R'^2_6 (r''^2_6 + 4r_6^2)}. \qquad \text{(B)}$$

Подставив соответствующие величины и произведя вычисление, найдем, что $P'_6 = -0{,}0000309\ \Sigma$ или 61,8 атм.

Когда кольцо № 6 было срезано, то в оставшейся части диска произошло изменение радиусов r''_5, r''_4, r''_3, r''_2, r''_1. Величины изменений определены опытом. А так как $P_0 = 0$, следовательно, от уничтожения давления на радиусе r_6 явилось некоторое добавочное давление на наружном радиусе R_5 и это давление можно определить так:

$$P'_5 = -3 \sum \frac{\delta_5 r''_x (R_5^2 - r_0^2)}{R_5^2 (r''^2_x + 4r_6^2)}. \qquad \text{(C)}$$

Если бы все обмеры были одинаково точны, или если бы в оставшейся части диска не происходило каких-либо сложных явлений, нам пока неизвестных, то мы могли бы взять δ_5 на любом из радиусов r''_x; но так как происшедшие изменения очень малы, и притом находятся в зависимости от некоторых явлений внутри диска, то мы должны брать для вычисления или некоторую среднюю величину (принимая в соображение ее вероятную точность в зависимости от отношения величин радиусов r''_x), или же брать изменение того радиуса, по которому вычисленное давление ближе всех других к предыдущему давлению P_6. В данном случае, если P'_5 вычислить по r''_1, то оно будет $= -0{,}0000502\ \Sigma$ или 100,4 атмосферы. Впрочем, давление и по средней величине изменений будет довольно близко к P'_6, а именно, оно выходит около 98 атм.

Затем со сплошной части диска (при его наружном и внутреннем радиусах R_5 и r_5) был срезан второй слой, или кольцо № 5. Так как давление P'_5 уже определено, а изменение радиуса r''_5 известно, то

$$P_5 = P'_5 \frac{R_5^2 (r''^2_5 + 4r_5^2)}{r_5^2 (r''^2_5 + 4R_5^2)} + 3 \sum \frac{\delta_5 r''_5 (R_5^2 - r_5^2)}{r_5^2 (r''^2_5 + 4R_5^2)}. \qquad \text{(D)}$$

Причем по вычислению получим: $P_5 = -0{,}0000867\ \Sigma$ или 173,4 атм.

Сделанное кольцо № 5 было сточено, и его наружный радиус $R'_5 = 217{,}1$ *мм*. В этом случае второе давление на означенном радиусе определяется по формуле (B). Продолжая ход вычислений

до конца опыта, и держась вышеприведенных формул, мы определим, руководствуясь опытными данными, давления на 16 радиусах диска. Полученные результаты показаны в нижеследующей таблице.

Радиусы диска в миллиметрах	Давление в атмосферах	Радиусы диска в миллиметрах	Давление в атмосферах
65,4	0	171,25	229,4
76,5	149,4	182,75	193,0
96,1	152,6	201,75	176,6
100,75	125,2	206,0	173,4
111,3	146,0	217,1	170,0
1 2,5	186,0	236	100,4
135,75	256,0	240	95,5
146,25	266,0	251,75	61,8
166,5	240,0	273,75	0

Из рассмотрения приведенной таблицы видно, что полученные при опытах результаты достаточно удовлетворительны, и что если и встречается некоторое уклонение на радиусах r_2 и R_2', то оно не велико и легко может быть исправлено при построении кривой, выражающей закон давления.

При построении диаграмм для дисков, взятых от орудийных стволов, мы приняли за ординаты для вычисленных давлений и определенных опытом изменений радиусов (вследствие разрезки диска на концентрические слои) 1 *мм*=0,00001 Σ или 20 атм. [9], а за абсциссы радиусы 1 *мм* = 2 *мм*, т. е. вычерчивали стенку диска в половину натуральной величины. Для построения же диаграмм к дискам от стальных снарядов стенка диска изображена в натуральную величину, а за ординаты принят 1 *мм* = = 0,00002 Σ *или* 40 *атм.*

Мы привели выше способ вычисления давлений в диске, исследованном при постепенном срезании колец, вместе с измерением изменений радиусов в остающейся его части. Но большая часть наших первоначальных опытов была ведена просто разрезкой диска на кольца и обмером изменений радиусов колец. Для вычисления давлений в этом случае мы можем составить столько же уравнений, сколько было колец, но число входящих в эти уравнения известных величин недостаточно для определения всех давлений. Но при определенном ходе опыта, а также по сравнении с дисками, где было полное число данных, можно получить приблизительные величины означенных давлений. Для таких дисков был принят следующий способ вычислений. Положим, что какой-либо диск был разрезан сразу на 6 колец. По формуле (А) мы определим точное давление P_6 на радиусе r_6. По этому давлению мы определим приблизительно давление на радиусе R_5, поступая

так: от r_6 отложим по оси абсцисс точку на расстоянии двойной ширины прорези (между кольцами № 6 и № 5) и определив графически соответствующую ординату, примем ее за величину давления, действующего на радиусе R_5, а затем, применяя формулу (1) по этому давлению и δ_5, найдем P'_5 и т. д. Поступая таким образом, мы вычислим давления на радиусах в трех наружных слоях. Для трех внутренних слоев вычисление следует вести от слоя № 1, для которого по формуле С можно определить точное давление на радиусе R_1 и т. д.

Способ исследования дисков при постепенном срезании или вырезании слоев дает значительно более данных для вычислений, и по большей точности получаемых результатов заслуживает предпочтения; но зато он крайне утомителен и для выполнения его требуется много времени. При большем числе дисков, подлежащих исследованию, а также при разрезке дисков на большее число слоев, на практике вероятно придется чаще всего прибегать к последнему способу (т е к разрезке дисков сразу на все число намеченных слоев), потому что тогда исследование может быть сделано весьма быстро и притом с точностью, вполне достаточной для обыкновенных практических целей.

Затем мне остается сказать о способах определения сопротивления цилиндров. Для этого необходимо знать напряжение по касательной к каналу. Можно указать несколько способов определения этого напряжения по данным давлениям. Если мы примем часть кривой, определяющей распределение давлений, между радиусами r_0 и R_1 за прямую линию, то по давлению P'_1 мы можем определить напряжение t_0 на r_0. В таком случае мы будем иметь

$$t_0 = \frac{d(Pr)}{dr}; \quad p = a(r - r_0); \quad pr = ar(r - r_0);$$

$$\frac{d(Pr)}{dr} = a(2r - r_0); \quad t_0 = p + ar; \quad p = a(r - r_0)$$

и

$$t_0 = p\frac{2r - r_0}{r - r_0}$$

или

$$t_0 = p\left(1 + \frac{r}{r - r_0}\right) \qquad [10] \quad (E)$$

Применяя этот вывод к опыту № 65 и принимая $r = R'_1$, а $P = 149{,}4$ атм., найдем $T = 801{,}5$ атм., а так как предел упругости стали в диске был 2400 атм., то потеря сопротивления вследствие существования вредных внутренних напряжений будет около 33%. Если мы произведем то же вычисление по радиусу R_1, то получим значительно меньшую величину для напряжения по касательной.

Можно определить также напряжения по касательной по двум точкам кривой в зависимости от двух давлений на радиусах, ближайших к каналу

$$p = a(r - r_0) + b(r - r_0)^2;$$
$$p_1 = a(r_1 - r_0) + b(r_1 - r_0)^2;$$
$$p_2 = a(r_2 - r_0) + b(r_2 - r_0)^2;$$

по определению a и b можно найти t_0

$$t_0 = a(2r - r_0) + b[(r - r_0)^2 + 2r(r - r_0)]$$

и при $r = r_0$; $t_0 = ar_0$

$$t_0 = \frac{p_1 r_0 (r_2 - r_0)}{(r_1 - r_0)(r_2 - r_1)} - \frac{p_2 r_0 (r_1 - r_0)}{(r_2 - r_1)(r_2 - r_1)}. \qquad (F)$$

Обозначая

$$r_1 = R_1'; \quad r_2 = R_1; \quad p_1 = p_1' \text{ и } p_2 = p_1',$$

т. е. подставляя величины, взятые из опыта № 65, получим

$$t_0 = 568 \text{ атм.}$$

Для вычисления сопротивления цилиндров, в которых определены вычислением предварительные внутренние напряжения, мы пользовались преимущественно формулами полковника В. А. Пашкевича (Арт. журн. за 1885 год), как весьма простыми и удобными. Он принимает, что полное относительное удлинение z рассматриваемого слоя, при совместном существовании внутренних напряжений и давления в канале от выстрела есть алгебраическая сумма x и y (x означает относительное удлинение до выстрела произвольно взятого слоя, происходящее от внутренних напряжений; а y — расширение при выстреле того же слоя по тому же направлению, при предположении отсутствия внутренних напряжений). Принимая U равным пределу упругости, определяя x из опытных данных, и зная, что между P_0 и y существует следующая зависимость:

$$y = P_0 \left[\frac{u}{3U} \cdot \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2} + \frac{u}{3U} \cdot \frac{4R^2}{R^2 - r_0^2} \left(\frac{r_0}{r_x} \right)^2 \right], \qquad (G)$$

можно определить P_0. В вышеприводимой формуле R и r_0 — наружный и внутренний радиусы цилиндра; u — относительное удлинение, отвечающее пределу упругости U.

Наконец, мы можем привести еще способ вычисления сопротивления цилиндра по опытным данным, предложенный генерал-лейтенантом А. В. Гадолиным. По его указаниям, для определения предела сопротивления надобно отыскать тот радиус, для которого величина

$$P_0 = \frac{P' R^2 (r^2 + r_0^2) + (R^2 - r_0^2) r^2 \left[U + \frac{d(rp)}{dr} \right]}{r_0^2 (r^2 + R^2)} \qquad (H)$$

получает наименьшее значение — и это значение и будет пределом сопротивления цилиндра относительно усилия.

Для возможности определения наименьшего значения P_0 из уравнения (H) надо знать $\frac{d(rp)}{dr}$ в функции от r. Выше был указан способ определения давлений для ряда радиусов, мало отличающихся один от другого, следовательно, величины rp нам также известны. Назовем $rp = \alpha$ и обозначим, к какому радиусу это α принадлежит. Из таких значений α — три последовательных можно связать уравнением

$$\alpha = A + Br + Cr^2. \qquad \text{(K)}$$

Подставляя соответствующие радиусы и давления и определяя A, B и C, найдем

$$\frac{d(rp)}{dr} = \frac{d(\alpha)}{dr} = B + 2Cr. \qquad \text{(L)}$$

Применяя это вычисление к опыту № 65 и подставляя вместо r радиусы r_0, R_1 и R' вместе с давлениями $\overline{p}_1$, $\overline{p}'$ и p', найдем, что $\frac{d(rp)}{dr} = -1520$ атмосфер.

По этому вычислению потеря сопротивления цилиндра при существовании в нем вредных внутренних напряжений определяется почти в 66% против сопротивления, вычисленного при предположении отсутствия в диске внутренних напряжений.

Но имея в виду, что при некоторых других опытах мы не можем получить столь полных данных, какие были получены в опыте № 65, а следовательно вычисляемое для означенных дисков увеличение или уменьшение сопротивления будет не столь значительно, мы приняли потерю сопротивления диска № 65 только в 47%, т. е. взяли среднюю величину, полученную при вычислении различными способами.

Ознакомив с общими основаниями, принятыми для вычислений, перехожу к изложению результатов произведенных опытов.

IV

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДИСКАХ ОТ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ, ОРУДИЙНЫХ СТВОЛОВ И КОВАННЫХ ЦИЛИНДРОВ

Приступив к опытам более 15 лет тому назад, я начал их с единственной целью определить, существуют ли внутренние напряжения в металлах вообще, какого рода эти напряжения и какова их величина. Я подвергал исследованию различные диски, приобретаемые мною с различных заводов как русских, так и иностранных, не всегда зная или обращая внимание на условия приготовления тех орудий или цилиндров, от которых были отрезываемы диски. Мысль о выводе зависимости внутрен-

них напряжений от условий обработки металла явилась уже впоследствии, а потому частью своих первоначальных опытов я не мог вполне воспользоваться для уяснения указанного вопроса. Затем, я должен заметить также, что хотя мне было прислано довольно много дисков от различных заграничных фирм, специально для исследования внутренних напряжений, но в обмен на сообщенные мною результаты опыта, я не всегда мог получить подробное описание способа приготовления тех цилиндров, к которым принадлежали диски.

При изложении своих опытов я нигде не буду упоминать, какому заводу или фирме принадлежал диск. Я буду обозначать их или теми номерами, которые были на них поставлены, или номерами, значащимися в журнале моих опытов. Для меня каждый экземпляр представлял материал для изучения данного вопроса, а полученные результаты служили средством для оценки способов фабрикации и конструкции орудий, безразлично каким заводом или к какой артиллерии они принадлежали.

От орудий и орудийных стволов было исследовано мною более 30 дисков, но из них я привожу только 8 опытов, как характеризующих главные особенности проявления внутренних напряжений. Полученные результаты помещены в таблицах 1—8 [7], а диаграммы, выражающие найденные опытом изменения радиусов (после разрезки дисков на концентрические слои), и по этим данным вычисленные давления — изображены на черт. 2, фиг. 3—9.

Из рассмотрения приведенных результатов видно, что принятый способ вообще можно признать удовлетворительным, так как при нем с достаточной для практики точностью можно определить как величины внутренних напряжений, так и закон их распределения. Некоторые аномалии и уклонения от правильного распределения цифровых величин хотя и замечаются, но их нетрудно исправить при построении кривой, выражающей зависимость изменений радиусов от расстояний их от оси диска. Уклонения всего чаще замечаются в изменениях радиусов того вырезанного из диска кольца, в котором приходится нейтральный слой. Причину этих уклонений следует отнести к ничтожности происходящих здесь изменений, а следовательно, и к большой вероятности погрешности при наблюдениях. Уклонения заключаются также нередко на внутреннем радиусе r_0 и преимущественно в тех дисках, которые были взяты от цилиндров, канал которых досверливался после отжигания.

По характеру внутренних напряжений исследованные диски распадаются на три разновидности; диски с вредными напряжениями № 1, 73, 264, 345 и 86; с полезными напряжениями № 1561 и со смешанными — № 56 и 57. Мы называем эти последние напряжения смешанными, так как они могут быть или полезными, или вредными в зависимости от того, в какой степени растянут средний слой стенки, и как близок этот растянутый слой к поверхности канала.

Все эти 8 опытов были произведены над дисками от орудий разного времени приготовления. Из них одна прокованная, высверленная и отожженная болванка для казенной части 11 дюйм. пушки и два диска от вчерне высверленного ствола для 30,5-*см* пушки, были приготовлены в течение 1884—85 годов. Что же касается до остальных пяти дисков, то они принадлежали к орудиям, приготовленным в период времени между 1871 и 1879 годами. В приложенных таблицах и графиках приведены результаты испытаний стали от орудий, к которым принадлежали диски, а также показаны ее химические анализы, если таковые были произведены. По испытаниям стали растяжением образцов до разрыва на прессе определен весьма точно предел упругости. Зная этот предел и придерживаясь принятых формул, вычислено предполагаемое (при допущении отсутствия внутренних напряжений в стенке) сопротивление цилиндра действию давлений в канале. Затем приняты в соображение величины и род найденных опытом внутренних напряжений в тех же цилиндрах и вычислено уменьшение или увеличение ожидаемого, или лучше сказать, предполагаемого сопротивления. Таким образом и составлена нижеследующая таблица А.

Таблица А

Калибры орудий	Диски, подвергнутые исследованию	Обозначение фиг., в которых помещены опытные данные	Принятый при вычислениях предел упругости в атмосферах	Сопротивление цилиндра по принятой формуле $r_0 = 3U \frac{R^2 - r_0^2}{4R^2 + r_0^2}$	Сопротивление цилиндров, выведенное в зависимости от внутренних напряжений	Увеличение или уменьшение сопротивления против ожидаемого	Увеличение или уменьшение сопротивления в %
9 дюйм.	№ 264	Черт. 2, фиг. 5	1800	1087	570	—515	—47,5
9 „	№ 345	фиг. 4	1800	853	750	—103	—12
11 „	№ 1	фиг. 3	2200	1313	765	—548	—41,0
11 „	№ 73	фиг. 6	2200 [1]	968	700	—268	—38,3
30,5 *см* (12 дюйм	№ 56 № 57	фиг. 7 —	3000	1700	2040	+340	+20,0
11 „	№ 86	фиг. 8	2300	1856	1050	—806	—43,4
9 „ Чугун	№ 1561	фиг. 9	1850 [2] 1300	1317 981	2634 1962	+1317 +981	+100

[1] Предел упругости стали в цилиндре № 73 принят одинаковым с № 1, так как оба орудия приготовлялись одновременно и на одном и том же заводе.

[2] Предел упругости чугуна вообще определять весьма затруднительно. Верхняя цифра показывает предел упругости при сжатии, а нижняя — при растяжении. Эта последняя цифра вполне согласуется с величинами напряжений, найденными в диске.

Из рассмотрения цифр вышеприведенной таблицы видно, что за исключением 30,5-*см* стальной и 9-дюйм. чугунной пушки № 1561, все остальные орудия содержат вредные напряжения (представляя тип орудий общепринятого способа фабрикации) и обладают значительно меньшим сопротивлением, чем то, для которого они были проектированы. Уменьшение это есть прямое последствие тех вредных внутренних напряжений, которые существуют в металле в зависимости от условий его обработки. При изготовлении 30,5-*см* пушки эти условия, быть может случайно или преднамеренно — нам неизвестно — были изменены, а судя по опытным данным весьма незначительно, но, как бы то ни было, от этого изменения получился некоторый выигрыш в сопротивлении. Но еще более поразительный пример представляет ствол 9-дюйм. чугунной пушки № 1561, сопротивление которого удвоилось вследствие того, что в металле были развиты полезные напряжения при весьма простом изменении условий фабрикации. Но к рассмотрению этого мы еще вернемся.

В стальных орудиях малых и даже средних калибров, при ныне общепринятом способе их приготовления, потеря сопротивления в зависимости от существования вредных внутренних напряжений не может быть велика: во-первых, потому, что металл этих орудий, при сравнительно небольшом наружном диаметре болванок, может быть хорошо прокован и, следовательно, имеет очень высокий предел упругости, а во-вторых, потому, что стенки стволов достаточно тонки — и потому заключающиеся в них внутренние напряжения не могут достигать значительной величины по отношению к высокому пределу упругости стали. Но с увеличением калибра орудий и с возрастанием толщины стен влияние внутренних напряжений растет в геометрической прогрессии, как по своим величинам, так и по отношению их к более низкому пределу упругости во внутренних слоях таких орудий. Поэтому мне кажется, что на прочность громадных современных 80 и 100-тонных пушек едва ли можно уверенно рассчитывать, по крайней мере до тех пор, пока не будет указано, каким образом для увеличения их сопротивления следует пользоваться внутренними силами, которые можно развить в стенках сообразной обработкой металла. Тем не менее существенно важно и необходимо стремиться к этому при изготовлении орудий всех калибров без исключения, так как нет никакого основания удерживать в цилиндре вредные напряжения, если их можно сделать полезными и тем увеличить запас прочности.

До сих пор мы говорили только об орудийных стволах; но в готовом орудии они входят, будучи скреплены кольцами. В приведенной таблице А мы имеем две серии орудий, к которым были применены различные расчеты скрепления кольцами. К одной группе принадлежат 11-дюйм. стволы под № 1 и 73; они были скреплены по точному указанию теории. Стягивание было рассчитано так, чтобы довести сжатие слоя у поверхности канала ствола до

предела упругости, а так как здесь существовало предварительное расширение, то на уничтожение его и пошла часть рассчитанного сжатия. Следовательно, убыль в сопротивлении не была возмещена, и величина потери осталась той же самой, какой была ранее, но только выразилась меньшим процентом по отношению к вновь достигнутому сопротивлению, вследствие скрепления ствола кольцами. Оба эти орудия оказались слабыми, так как дульная часть одного из них была разорвана с первого выстрела, а другое было испорчено после сравнительно недолгой службы. Впрочем, считаю необходимым заметить, что другие пушки того же завода и так же приготовленные признаются хорошими.

К орудиям второй группы принадлежат № 264 и 345. Стволы их были скреплены кольцами, надетыми с несравненно большим стягиванием, чем то допускает теория. Такое сильное стягивание было сделано не преднамеренно, а произошло вследствие случайности.

В формулу для вычисления стягивания входит величина u_0, т. е. относительное удлинение, отвечающее пределу упругости. Величина эта была определена опытом на прессе системы Киркальди с его автоматическим прибором для измерения удлинений. Прибор же этот показывал не только растягивание испытываемого образца под действием к нему приложенных усилий, но и некоторое растяжение тяг пресса, вследствие чего определенные удлинения были значительно более действительных, т. е. найденных другими, более точными способами. Но завод, руководствуясь показаниями своего пресса, принимал величину $u_0 = 0{,}003$, тогда как на самом деле это удлинение, при пределе упругости стали в 1800 атмосфер, было для упомянутых орудий около 0,0009. Следовательно, кольца нагонялись на ствол со стягиванием в 3 слишком раза большим, чем следовало. Часть получаемого при этом сжатия на поверхности канала была полезна, так как шла на уничтожение бывшего, до нагонки колец, расширения, часть оставалась как сжатие, требуемое теорией, и часть — была безусловно вредной, так как переходила за допустимый предел. При таком сильном стягивании — очевидно металл на внутренних радиусах колец расширялся во время выстрела за предел упругости. Но несмотря на все эти уклонения и отступления, пушки означенного завода прекрасно держали пробу, и случаев разрыва орудий в течение долгого периода времени не было, что, без сомнения, должно быть отнесено к прекрасным качествам стали. Факт этот мы приводим единственно ради сохранения истины; но он никак не может служить опровержением нашего основного положения, что если есть возможность и средства увеличить прочность орудий, то ими следует пользоваться. В 11-дюйм. стволе № 86 мы видим, однако, пример, что принятый заводом способ фабрикации оставался в течение 10—12 лет без изменений. Но, быть может, к скреплению этого ствола при-

менили общие теоретические расчеты, отчего, впрочем, потеря его сопротивления не уменьшились.

Что же касается до 30,5-*см* ствола (диски № 56 и 57) то, сравнивая его с орудиями № 1 и 73, мы видим, что на заводе, где они были приготовлены, произошли за последние 10 лет изменения в условиях фабрикации. Ствол этот, очевидно, подвергался охлаждению в масле (чего не заметно при исследовании дисков от прежних пушек) с последующим отжиганием. Охлаждение ствола шло с двух сторон, т. е. с наружной стороны и со стороны канала. Это подтверждается цифрами сопротивления разрыву и пределами упругости в различных слоях стенки, а также результатами исследования внутренних напряжений. Очевидно, нагретый ствол был погружен в масло и оставлен там до полного или же до продолжительного охлаждения. При таком условии развивались внутренние напряжения иного характера, чем в прежних стволах. Эти напряжения можно отнести к разряду полезных, так как фактически, вследствие их существования, сопротивления ствола несколько увеличились [1]. В сущности такой способ обработки есть только шаг вперед, но далеко не рациональное решение вопроса. При охлаждении или закалке с двух сторон получаемое на внешних радиусах сжатие достигается за счет сильного растяжения средних слоев стенки. В некоторых случаях это очень опасно, так как при выстреле разрыв может начаться именно с этих сильно растянутых слоев. Затем последующее отжигание, при несоответственном его применении, может также усилить вредную сторону такого рода распределения внутренних напряжений.

Примером того, насколько выигрывает сопротивление ствола от надлежащего распределения этих напряжений, может служить чугунный 9-дюйм. ствол под № 1561 [2]. В исследованном диске мы имеем напряжения, близкие к идеально-полезным. Уклонения замечаются лишь в двух наружных слоях, где металл находится в слабо сжатом состоянии, что произошло от недостаточно сильного подогрева опок после отливки и в то время, когда через канал пропускали воду. Но это уклонение, повидимому, не имеет существенного значения и нимало не уменьшает прочности ствола.

При обнаруженном опытом распределении внутренних напряжений сопротивление ствола удвоилось против ожидаемого.

---

[1] Но это увеличение сопротивления будет потеряно при скреплении ствола кольцами, надетыми со стягиванием по ныне принятому расчету, т. е. без принятия во внимание существующих в стенке ствола предварительных внутренних напряжений.

[2] Кроме того, мы произвели опыты над дисками от 4—6-дюйм. чугунных стволов, характер напряжений в которых сходен с 9-дюйм. стволом; но означенные диски были разрезаны на небольшое число колец, и потому полученные результаты менее точны и не столь характеристичны, как в приведенном примере.

Именно только одним этим и можно объяснить, почему столь слабый материал, как чугун, может в некоторых случаях выдерживать конкуренцию с очень хорошими сортами пушечной стали. Из таблицы А видно, что ствол этот, по своей действительной прочности, занимает первое место в ряду стальных стволов, даже тех, металл которых обладает весьма высоким пределом упругости. Что действительно ствол этот обладал замечательной прочностью, можно подтвердить тем, что в 1874 году он был подвергнут пробе стрельбой в нескрепленном виде и превосходно выдержал 500 выстрелов зарядами в 38 и 48 фунтов (14,7 и 19,6 *кг*) призматического пороха, при весе снарядов в 300 фунтов (123 *кг*). При этой стрельбе давление на клин было определено в 1100 и 1750 атмосфер. Принимая во внимание, что наружный диаметр ствола в окончательно отделанном виде равнялся 27 дюйм. (713 *мм*), а диаметр каморы был 9,23 дюйм. (237 *мм*), при таких размерах теоретическое сопротивление ствола определялось около 1000 атмосфер, а, следовательно, если ствол безвредно выдерживал давления в канале до 1750 атм., значит его действительное сопротивление было почти вдвое более ожидаемого, а это, в свою очередь, обусловливалось величиной и распределением в нем внутренних напряжений. Мы могли бы указать много примеров поразительной стойкости нескрепленных чугунных орудий. При этом считаем не лишним упомянуть об известных опытах Пализера, который был горячим сторонником этих пушек. Нередко, а в особенности в первое время появления стальных пушек, чугунные орудия давали при стрельбе такие результаты, при которых возможно было надеяться, что они выдержат конкуренцию со сталью. Ухудшение чугунных орудий началось с эпохи применения к ним скрепления, а именно вследствие нагонки колец с излишне сильным стягиванием. Представим себе, что произойдет, если на ствол за № 1561 будут нагнаны кольца так, что слой у канала сожмется до предела упругости, тогда как он еще до нагонки колец был сжат уже до этого предела. Как ни значительно сопротивление чугуна сжатию, тем не менее при таком способе скрепления металл у поверхности канала может быть сильно расстроен. Что это добавочное сжатие доводят скреплением до значительной величины, можно подтвердить обмерами канала после нагонки на ствол колец: так, например, в 9-дюйм. чугунных пушках обмеры показывали, что диаметр канала сжимался до 1,5 точек [11], а в 11-дюйм. пушках — до 2,4 точки, что составляло в относительных величинах 0,0018 и до 0,002, не считая предварительного сжатия, существовавшего в стволе в зависимости от его внутренних напряжений и оставшегося неизвестным. Подобное ошибочное применение скрепления чугунных орудий кольцами повторилось повсеместно, и было, по всей вероятности, причиной уменьшения прочности чугунных пушек, по крайней мере в некоторых отдельных экземплярах или при недостаточно хорошо выбранных чугунах. Между тем эти дешевые орудия могли быть пригодны для многих случаев

обороны. В настоящее время от них в большинстве артиллерий почти совершенно отказались; да и там, где они еще оставлены, в них вставляют стальные внутренние трубы, и тем самым увеличивая их стоимость, уничтожают в чугунном теле тот слой, который доставлял наибольшее сопротивление.

Если, как объяснено выше, ствол с безусловно полезными напряжениями можно испортить, применяя к нему не вполне сообразный расчет скрепления кольцами, то, с другой стороны, не так легко исправить при скреплении ствол, содержащий в своих стенках напряжения вредные. В этом последнем случае придется принимать в соображение несколько обстоятельств. Так, например, ввиду устранения опасности разрыва цилиндра, подвергающегося действию повторительных внешних усилий, необходимо, чтобы под давлением, производимым на ствол кольцами (когда $P_0 = 0$), сжатие по касательной к окружности ни в одном цилиндрическом слое не превосходило предела упругости. Следовательно, необходимо определить тот радиус, для которого это давление получает наименьшую величину. Если мы обратимся к опыту за № 65 (рассмотренному в предшествующей главе), то найдем, что в данном случае этим радиусом будет наружный радиус, так как на нем существует предварительное сжатие — и соответствующее ему сжимающее усилие по касательной составляет 0,233 U. С другой стороны, нам желательно уничтожить скреплением предварительное расширение слоя на радиусе r_0 — и соответствующее ему растягивающее усилие по касательной, равное 0,47 U. Если бы в стенке ствола не было напряжений, то, принимая наружный радиус скрепляющего кольца в 477 *мм*, а наружный и внутренний радиусы ствола в 198 и 75 *мм*, мы определили бы давление кольца на ствол

$$P' = \frac{R'^2 - R^2}{2R'^2} - U = 0{,}418U$$

или 1000 атмосфер. Тогда мы достигли бы сжатия на поверхности канала, равного — U. Но так как нам необходимо еще уничтожить существовавшее расширение, то мы должны нагнать кольцо так, чтобы производимое им давление было в 1,47 раза выше определенного. При таком давлении величина сжатия на наружном радиусе ствола достигнет почти 0,8 U, а прибавляя к этому бывшее предварительное сжатие = 0,233 U, мы перейдем несколько за предел упругости. Обращая затем внимание на то, что произойдет при такой нагонке в кольце, найдем, что при давлении в 1470 атмосфер слой на его внутреннем радиусе еще до выстрела будет растянут до 1,4 U. Следовательно, мы должны значительно увеличить его толщину и приготовить кольцо из стали с весьма высоким пределом упругости. Все вышеприведенные условия и соображения, хотя и поддаются расчету, но такого рода расчеты никакого практического значения иметь не могут, во-первых, потому, что прежде всего необходимо знать, какие внутренние на-

пряжения существуют в стволе, а во-вторых, потому, что несравненно проще и выгоднее готовить стволы или цилиндры с полезными напряжениями.

Если такая мысль будет понята и усвоена заводами, то скрепление, если в том встретится надобность, будет производиться при нагонке колец на стволы без всякого стягивания, или со стягиванием весьма слабым. Такого рода скрепление будет несравненно целесообразнее, чем принятое ныне, когда слои колец еще до выстрела находятся в сильно расширенном состоянии. Польза нагонки колец, надетых со слабым стягиванием, обнаружится в тех случаях, когда самый ствол от стрельбы начнет расширяться тогда эти кольца своим не растроенным металлом усилят сопротивление орудия. Но к вопросу о кольцах я перейду в следующей главе при рассмотрении некоторых из произведенных в этом отношении опытов.

V

ОПЫТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЬЦАХ, УПОТРЕБЛЯЕМЫХ ДЛЯ СКРЕПЛЕНИЯ СТВОЛОВ, В СКРЕПЛЕННЫХ КОЛЬЦАМИ ЦИЛИНДРАХ, ВО ВНУТРЕННИХ ОРУДИЙНЫХ ТРУБАХ И В ПРЕССОВАННОЙ ЛИТОЙ СТАЛЬНОЙ БОЛВАНКЕ

Теория скрепления орудий кольцами разработана до высокой степени совершенства; она дает безусловно верные основания для применения ее к практическим целям. Но на заводское дело, в особенности по приготовлению больших масс металла, нельзя смотреть, как на производство опытов в физической или химической лабораториях, где все может быть точно взвешено и измерено. При постройке и фабрикации пушек, к особенности при валовом их производстве, существует масса допусков и предположений, иногда далеко не согласующихся с чисто теоретическими соображениями. Так, например, разве можно признавать точным для всего тела ствола тот предел упругости, который определен испытанием образца, взятого от одного из его срезов? Если обратить внимание на то, каким образом повсеместно выделываются кольца, употребляемые для скрепления орудий, то нетрудно доказать, что металл в образцах, взятых от срезов (как то обыкновенно делается), обладает совсем иными свойствами, чем в частях ближайших к середине длины кольца. Таким образом, в определении предела упругости стали в стволе и кольцах существует весьма большой произвол и значительное уклонение от действительного их сопротивления. Но допустим, что эти пределы определены с достаточным приближением к истинным. Подобрать для данного ряда кольца с одинаковыми свойствами весьма затруднительно, а при спешности работ даже

невозможно. Поэтому приходится принимать для нагонки колец этого рода какой-либо условный предел упругости и по нему вычислять стягивание, или просто, как то делают на многих заводах, производить условное стягивание, выражая его известным соотношением к диаметру ствола и т. п. Наконец, все эти более или менее гадательные расчеты кончены, остается надеть кольца на ствол; но для того, чтобы получилась определенная сказанным расчетом разность между наружным и внутренним диаметрами ствола и кольца, требуется, чтобы отделка наружной поверхности одного и внутренней поверхности другого была исполнена с математической точностью (до десятых долей точки), и чтобы обмеры этих диаметров были произведены с идеальным совершенством. Для каждого, знакомого с заводским делом, очевидно, что все эти совершенства существуют лишь в области фантазии, и что теоретические расчеты и соображения хотя и принимаются за исходный пункт, но насколько правильно произведено скрепление выпускаемых заводом орудий — это вопрос, решение которого весьма затруднительно. С увеличением числа рядов колец увеличивается и число допусков и предположений; общая сумма ошибок растет, и в какой степени все это выражается в сопротивлении орудия, никто определить не может.

К таким заключениям я пришел на основании весьма продолжительной практики и внимательного изучения орудийного дела. По моему мнению, наиболее совершенным орудием (при соответствующем выборе материала и условиях его обработки) будет то, которое не подвергается скреплению кольцами, или на ствол которого будет надето возможно меньшее число рядов колец, и притом надето или без всякого стягивания, или с самым ничтожным стягиванием. Если мы признаем существующую теорию совершенной и ею руководствуемся при проектировании и постройке орудий, то следует допустить, что ствол или цилиндр с полезными внутренними напряжениями есть идеал, к которому стремятся и которого никогда не достигают в современном составном орудии. Поэтому, если желают иметь вполне надежные и прочные пушки, то необходимо перейти к однородным цилиндрам с полезными внутренними напряжениями. При таких соображениях на нагонку колец следует смотреть как на средство увеличить прочность ствола в тот момент, когда в том окажется особенная надобность, например, при весьма продолжительной стрельбе, при развитии в канале больших давлений и т. п. При таких кольцах разрыв орудия в куски будет невозможен. Но для того, чтобы кольца действительно удовлетворяли указанным целям, необходимо, чтобы они имели внутри стенок полезные внутренние напряжения, — что, впрочем, безусловно необходимо и при ныне принятых условиях постройки орудия, но на что, однако, едва ли на многих заводах обращают должное внимание.

Изложив свой взгляд на общие основания скрепления орудий кольцами, перехожу к рассмотрению тех напряжений, которые

развиваются в металле колец при ныне принятых условиях их фабрикации. Я не буду останавливаться на способах отковки и отделки колец, но скажу только об окончательной операции, которой они подвергаются, а именно, об их отжиге. Отжиг колец производится или с медленным их охлаждением после проковки, или с отжигом после погружения в масло. Я исследовал только несколько колец, отожженных первым из этих способов. Результаты испытания приведены в таблице 10 и 11 [12], а именно: опыты за № 29 и 44. Полученные данные показывают, что оба кольца содержат в стенке вредные напряжения, хотя и незначительные. В кольце под № 29 (табл. 10) величина растяжения по касательной на внутреннем радиусе r_0 достигает 453 атмосфер или 0,155 U, в кольце за № 44 (опыт 11) — 270 атмосфер или 0,08 U. Следовательно, когда оба кольца будут надеты на ствол с теоретически рассчитанным стягиванием, то при выстреле слой металла на их внутренних радиусах должен перейти за предел упругости. Из этого примера видно, в какой степени было бы выгоднее развить в тех же кольцах предварительные полезные напряжения.

Исследования колец, отожженных после закалки в масле, мне сделать не удалось, так как для этого необходимо было получить целое кольцо, а не диск его среза. Следует заметить, что по испытании только одного такого диска нельзя составить правильного заключения о распределении внутренних напряжений, потому что при закалке колец в масле охлаждение идет с четырех сторон: от наружного и внутреннего радиусов и со стороны двух срезов. Для исследования напряжения, а также для испытания образцов следует брать диски, отрезая их на расстоянии по крайней мере одного или двух дюймов от среза. Но судя по аналогии с опытом над дисками за № 56 и 57 (рассмотренными в предшествующей главе), надо полагать, что в кольцах, таким образом обработанных, напряжения получаются смешанного характера, то-есть наружный и внутренний слои будут находиться в сжатом, а средний слой стенки — в расширенном состояниях. Если это подтвердится опытом, то заключение, высказанное по поводу дисков за № 56 и 57, можно считать вполне применимым и к рассматриваемому случаю.

В таблице 12 я привожу опыт № 43 исследования диска, отрезанного от цилиндра, скрепленного кольцом. Диск этот был доставлен мне для определения, с каким стягиванием было надето кольцо на цилиндр, причем никаких других подробностей сообщено не было. Произведенное исследование показало, что кольцо было надето на ствол с незначительным стягиванием; давление, им произведенное, составляло около 436 атмосфер, а следовательно, величина разности между наружным и внутренним диаметрами ствола и кольца была около 2 точек (наружный диаметр ствола, до его скрепления кольцом и до срезывания кольца, был 246 *мм*), что оказалось верным. Произведенный опыт показывает,

каким образом можно с весьма большой точностью определить не только напряжения, происходящие от нагонки колец на ствол, но и внутренние или предварительные напряжения, существовавшие до такой нагонки, как в стволе, так и в металле колец. К сожалению, опыта в большем размере, а именно, при нагонке двух или трех колец на ствол, — мне произвести не удалось.

Следующий опыт, который я включаю в этот отдел, состоял в исследовании внутренних напряжений в одной из труб, вставляемых в орудие. Результаты опыта приведены в таблице 9. Вставка внутренних труб в орудия как для исправления их каналов, попорченных или сильно разгоревшихся от стрельбы, так и при изготовлении новых орудий, практикуется на многих заводах. Эти трубы, будучи выковываемыми из болванок с небольшим наружным диаметром, могут быть лучше обработаны ковкой, и металл их обладает вообще высшим пределом упругости, чем металл центральных частей кованных болванок большого размера. А потому удаление этого центрального слоя высверливанием и вставка вместо него хорошо прокованной трубы — представляется средством очень полезным. Кроме того, в пользу вставки труб приводят еще и то соображение, что металл их лучше противостоит действию разгораний, чем металл, окружающий канал в массивных орудийных стволах. Имея в виду все эти соображения, было желательно определить род и величины внутренних напряжений в трубах. Для опыта был взят диск от трубы, предназначенной для вставки в 6-дюйм. пушку. Труба, после ковки и высверливания канала, была отожжена с охлаждением в масле общепринятым способом. Толщина ее стенки была 1,1 дюйма (28,5 *мм*). Полученные результаты показали, однако, что и в этой трубе с весьма тонкими стенками существуют вредные внутренние напряжения, при которых растяжение по касательной к каналу около 400 атм. или 0,127 *U*. Принимая во внимание весьма высокий предел упругости в металле трубы, около 3250 атмосфер, конечно, по сравнению с ним, величина внутренних напряжений ничтожна, но тем не менее происходящее от того уменьшение сопротивления трубы достигает 12%. Спрашивается, не выгоднее ли было повысить это сопротивление на 25 или 50 процентов — самым ничтожным изменением условий обработки, с целью развить в трубе полезные напряжения?

В заключение этого отдела, я обращу внимание на табл. 18, где приведено исследование внутренних напряжений в некованной болванке, отлитой сплошной и отпрессованной в жидком виде. Вес болванки был 440 пудов (7207 *кг*); под прессом она была сжата на $^1/_8$ часть своей первоначальной высоты. Приведенные в таблице данные показывают, что металл имеет вредные напряжения, впрочем, достигающие небольшой величины. Замечательно то, что предел упругости в литой прессованной стали очень высок, но относительные удлинения при разрыве брусков

малы. Было бы желательно исследовать внутренние напряжения в таких же прессованных болванках после высверливания их канала и проковки на стержне, как то принято на заводе Витворта.

ОПЫТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА

Опыты по определению зависимости внутренних напряжений от условий обработки металла были произведены над 6-дюйм. стволом под № 1581, длиной в 28 калибров, предоставленным в мое распоряжение.

Болванка, из которой выковали ствол, была весом 492 пуда (8058 *кг* или около 8 тонн). Проковка ее была ведена обыкновенным способом и состояла в следующем: болванка, после ее отливки, еще горячая, была доставлена (на другой день) в молотовую и там заложена в мусор, где и остывала, а затем, после ее подогрева дровами на открытом воздухе, была посажена в печь нижним концом вперед. Из печи она была вынута при светло-желтом калении и, будучи пройдена по длине сильными ударами 50-тонного молота, доведена до наружного диаметра в 21,5 дюйма (547 *мм*). Кована на восьмигранник. После второго нагрева проковали ее среднюю часть, отделали замочную часть и обе их округлили. Для третьего нагрева болванку посадили в печь прибыльной частью вперед. Затем ее вынесли под молот при светлооранжевом нагреве, оттянули дульную часть и отрубили прибыль. После этой операции болванка была оставлена на полу мастерской до следующего дня, когда ее снова нагрели в печи и затем, отделав под молотом дульную часть, окончательно довели болванку по всей длине до требуемых размеров, а по окончании ковки заложили в мусор, где она и подвергалась медленному остыванию. Прокованная таким образом болванка поступила на сверлильный станок, на котором был высверлен нагрубо ее канал. В этом виде она и была передана мне для производства исследований.

От металла литой болванки, до ее ковки, были взяты три образца для химического анализа стали, и из трех определений углерода получились следующие результаты: 0,57%; 0,55% и 0,50% (в образце от кованой болванки — 0,65%); Si — 0,20% и Mn — 0,29%.

Порядок хода работ по исследованию механических свойств стали и в ней существовавших внутренних напряжений был следующий.

На чертеже 4, фиг. 1—6 показаны общий вид и размеры ствола, а также относительное положение цилиндров и дисков, которые были взяты для исследований. Из отрезка № I части *A* вырезана пластина *a*, из которой приготовлено 6 опытных образцов, взя-

тых в направлении, параллельном оси ствола. От той же части A, со стороны, обращенной в дулу, отрезан диск b; из него приготовлено 6 опытных образцов, взятых параллельно касательной к каналу, и соответственно тем же радиусам, как и бруски, взятые параллельно оси ствола. Диск C был употреблен для исследования внутренних напряжений.

По отрезке цилиндра A и двух дисков a и b, остальная часть 6-дюйм. ствола была подвергнута принятому на заводе отжиганию в масле [13]. Для этого ствол был нагрет дровами в вертикальной печи и при светлокрасном калении опущен в бак с маслом, где оставался в течение пяти минут, а затем перенесен в печь, вместе с которой и остывал до полного охлаждения.

От отожженного описанным способом ствола был взят цилиндр A и диски a', b' и C', над которыми было произведено все то, что делалось над металлом кованным и неотожженным.

Отрезок № III (из казенной части) был подвергнут тем же исследованиям, как и отрезки № I и II и, кроме того, были вырезаны еще диски D и E; оба для определения изменения внутренних напряжений от нарезки канала и стачивания наружной поверхности ствола.

Отрезок № IV был взят для исследования по окончании особого отжига, которому был подвергнут ствол с целью не только уничтожить существовавшие в металле напряжения, но, главным образом, чтобы развить в нем такие напряжения, какие вообще желательно иметь в орудии. Это было достигнуто простым отжиганием ствола в той же вертикальной печи, но с некоторыми однако же в ней временными приспособлениями, соображенными с условиями наивыгоднейшего достижения требуемой цели.

Результаты всех произведенных исследований, как относительно испытания свойств стали, так и распределения в ней внутренних напряжений, подробно изложены в прилагаемых при сем таблицах [14]. Диаграмма вычисленных давлений и изменения радиусов, после разрезки дисков на концентрические слои, показана на черт. 3, фиг. 4—10.

Рассмотрение полученных результатов

Испытание стали производилось растяжением брусков на обыкновенном рычажном прессе; удлинения же при растягивании, а следовательно, и пределы упругости, определены с помощью катетометров. Те же образцы, которые испытаны на прессе Киркальди с определением удлинений особым прибором, принадлежащим этой системе, означены примечаниями. Для большего удобства сравнения всех полученных результатов означенных испытаний составлена следующая таблица Б.

Из рассмотрения результатов, помещенных в этой таблице, видно:

1) Что образцы, взятые из стенки ствола как параллельно оси орудия, так и параллельно касательной к каналу, вполне

Таблица Б

Обозначение слоев стенки ствола	Опыт № 61. Замочная часть; металл кованный, но неотожженный в масле			Опыт № 65. Замочная часть, металл кованный и отожженный в масле			Опыт № 76. Казенная часть; металл кованный и отожженный в масле			Опыт № 79. Казенная часть; металл как в № 76, но подвергнут особому обжогу		
	Образцы взяты параллельно оси ствола											
	Предел упругости в атмосферах	Сопротивление разрыву в атмосферах	Удлинение при разрыве в %	Предел упругости в атмосферах	Сопротивление разрыву в атмосферах	Удлинение при разрыве в %	Предел упругости в атмосферах	Сопротивление разрыву в атмосферах	Удлинение при разрыве в %	Предел упругости в атмосферах	Сопротивление разрыву в атмосферах	Удлинение при разрыве в %
№ 6	2770	6920	9,0	4055	7137	16,5	4360	7420	13,5	3000 [1]	6400	7,0
№ 5	2606	6760	9,0	2800	6030	11,0	3710	7193	13,5	—	—	—
№ 4	2500	6325	11,2	2340	5700	19,7	2800	6240	12,3	—	—	—
№ 3	2117	6000	13,6	2110	5710	20,5	2600	5913	16,3	2800 [1]	5300	3,0 [2]
№ 2	2105	5900	13,2	2200	5412	17,0	2450	5750	9,7	—	—	—
№ 1	2127	5886	13,2	2800	5280	19,0	3550	6446	14,2	3300 [1]	6090	6,9 [2]
Среднее	2371	6298	11,5	2718	5873	17,3	3245	6494	13,2	3033	5900	5,8
	Образцы взяты параллельно касательной к каналу											
№ 6	2854	6900	7,4	3350	7030	15,0	4150	7460	14,5	2700	6840	14,5
№ 5	2790	6590	6,0	2750	6320	13,0	3754	7180	12,3	2982	6680	11,8
№ 4	2300	6240	10,9	2450	5832	15,0	2787	5875	10,7	—	—	—
№ 3	2100	5614	14,7	2400	5752	19,0	2605	5540	14,3	2500	6370	6,0
№ 2	1940	5740	16,8	2470	5600	18,5	2640	5500	14,0	2930	5870	7,8
№ 1	1940	5740	19,6	2663	5336	20,0	2950	5500	10,0	2800	6030	8,1
Среднее	2320	5958	16,7	2764	5978	16,6	3131	6176	12,6	2782	6358	9,6

[1] Бруски испытаны на прессе системы Киркальди.
[2] В плоскости разрыва были видимы пороки.

хорошо и достаточно рельефно выражают свойства металла в различных концентрических слоях стенки.

2) Что во всех этих слоях сталь обладает различными свойствами: в металле кованном, но не подвергнутом отжиганию в масле, как пределы упругости, так и сопротивления разрыву, идут правильно убывая от наружной поверхности к каналу, а удлинения, наоборот, возрастают. На основании произведенного опыта, можно положительно сказать, что если указанная выше особенность замечается в сравнительно тонкой стенке 6-дюйм. ствола, прокованного под сильным 50-тонным молотом, то она должна быть еще значительнее в стенках стволов для орудий больших калибров, — что, впрочем, и подтверждено другим опытом № 86 над 11-дюйм. стволом.

3) Что отжиг кованных стволов в масле значительно улучшает качества стали, повышая пределы упругости и увеличивая удлинения; но вместе с тем он увеличивает разнообразие металла в различных концентрических слоях стенки ствола. Наибольшее изменение при этом способе обработки свойств стали является во внешних слоях — наружном и с поверхности канала — на котором ясно заметны следы быстрого охлаждения этих поверхностей от соприкосновения в нагретом состоянии с холодным маслом.

4) Что из сравнения результатов, полученных для отожженного металла, взятого из клинового утолщения и из казенной части, видно, что совокупное влияние ковки и отжигания в масле выражается в более сильной степени в тонкой стенке (казенной части), нежели в стенке увеличенной толщины (замочная часть).

5) Что в стволе, подвергнутом, после отжигания в масле, особому специальному отжиганию, — металл при сохранении прежних высоких качеств в слоях у канала получил в остальных концентрических слоях стенки довольно однообразные пределы упругости и сопротивления разрыву; но удлинения при разрыве несколько понизились сравнительно с прежде бывшими.

Таблицы, содержащие результаты определения внутренних напряжений, показывают, что вообще при принятых ныне способах обработки стволов и цилиндров, — напряжения имеют характер вредных, т. е. уменьшающих сопротивление цилиндров действию внешних усилий, — что подтверждают выводы, сделанные при исследовании дисков от других орудийных стволов, рассмотренных в главе IV.

Все описываемые здесь опыты были ведены при последовательном снимании слоев, вследствие чего можно достаточно точно определить давления на внутренних и наружных радиусах колец. Однако полученные этими вычислениями давления указывают, что измерения сплошных частей дисков, по срезании первого наружного или вырезании первого внутреннего кольца, недостаточно точны, что, конечно, должно быть приписано очень небольшой величине изменения радиусов, происходящей от уничтожения давления при срезании кольца, очень тонкого

сравнительно с толщиной всей стенки неразрезанной сплошной части диска. При срезании следующих колец эти изменения становятся значительнее, и вычисляемые давления идут правильно, а потому сказанные и постоянно повторяющиеся уклонения исправлены самым построением кривой давлений по точкам, полученным для остальных слоев диска.

Некоторые из опытов с последовательным срезанием колец были ведены параллельно при срезании колец снаружи и вырезании их со стороны канала, в дисках, взятых рядом один подле другого. При обоих способах исследования получились результаты между собою сходные; но второму способу, т. е. постепенному вырезанию колец изнутри, следует отдать предпочтение как более точному. Приложенные таблицы и построенные диаграммы, хотя и дают возможность составить довольно ясное понятие о величине и характере внутренних напряжений в зависимости от описанных способов обработки ствола, но тем не менее для полноты сравнения полученных результатов необходимо привести их к одной общей единице, а именно, определить сопротивление цилиндров, соответствующих испытанным дискам. Поэтому, приняв в соображение опытные данные, а также результаты, полученные при испытании стали, мы составили нижеследующую таблицу В, подобно тому как это было сделано при описании предшествующих опытов.

Таблица В

Пояснения	Опыт № 61, диск *C*	Опыт № 65, диск *C'*	Опыт № 76, диск *S*	Опыт № 71, диск *D*	Опыт № 70, диск *E*	Опыт № 79, диск *H*	Опыт № 81, диск *L*
1) Определенный по испытанию стали предел упругости в атм.	2000	2400	3000	3000	3000	3000	3000
2) Растяжение или сжатие на радиусе r_0, выраженное в величинах относительного удлинения, отвечающего пределу упругости	0,166 *u*	0,21 *u*	0,285 *u*	0,17 *u*	0,18 *u*	0,9 *u*	0,93 *u*
3) Сопротивление в атмосферах цилиндра при отсутствии внутренних напряжений	1397	1676	1977	1865	1840	1980	1980
4) Сопротивление в атмосферах, принимая в расчет обнаруженные опытом внутренние напряжения	1200	1200	1410	1400	1480	3800	3870
5) Увеличение или уменьшение сопротивления против предполагаемого	—197	—476	—567	—465	—360	+1820	+1890
6) То же выражение в процентах предполагаемого сопротивления . . .	—14,1	—28,4	—28,7	—24,9	—19,5	+90,2	+90,5

Сопоставление цифр, помещенных в вышеприведенной таблице, приводит к следующим выводам.

1) Цилиндр кованный, неотожженный в масле, представляет весьма слабое сопротивление, так как предел упругости металла в слоях у канала очень невысок; но с другой стороны и потеря сопротивления, вследствие вредного распределения внутренних напряжений, ничтожна и величины этих напряжений невелики.

2) Отжиг кованного металла в масле значительно повысил предел упругости во всех слоях, в особенности у канала, и сопротивление цилиндра возросло, но вместе с тем при принятом способе отжига в металле увеличились вредные напряжения, а потому прибавка сопротивления, зависящая от повышения механических свойств стали, была потеряна.

3) То же замечание относится и до более тонкой стенки казенной части ствола.

4) Досверливание и нарезка канала, а равно и стачивание наружной поверхности ствола, как и вообще всякое утончение стенки, способствует уменьшению величины внутренних напряжений, но сама по себе такая механическая работа на станках не может уничтожить или изменить общего характера этих напряжений.

5) Обработка же металла путем его нагревания и последующего охлаждения, приноровленного к развитию в нем полезных внутренних напряжений — может видоизменить вредные напряжения в полезные и таким образом весьма значительно увеличить сопротивление цилиндра [15]. При опытах под № 79 и 81 это сопротивление увеличилось на 90% против предполагаемого.

В дополнение к сказанному, считаю уместным заметить, что опыт по изменению вредных напряжений в полезные был произведен мною без всякой предварительной подготовки, а прямо на основании одних только общих теоретических соображений. В моем распоряжении не было ни печи, вполне хорошо приспособленной, ни мастеров, усвоивших мою идею и ей вполне сочувствующих. Тем не менее опыт дал замечательные результаты, и предположенная цель была вполне достигнута. Определенное вычислением сопротивление цилиндра превзошло то сопротивление, которое было бы достигнуто в цилиндре при тех же размерах, если бы он был составлен из ствола, скрепленного кольцом; а развившиеся в нем напряжения близки к идеально-полезным, т. е. при выстреле все слои его стенки будут достигать одновременно равных расширений и, следовательно, примут одинаковое участие в общем сопротивлении. Я уверен также, что применение того же способа обработки к стальным стволам, несравненно ббльших размеров, должно сопровождаться не менее хорошими результатами. Но, к сожалению, такого опыта мне не удалось произвести и тем подтвердить справедливость моих предположений. Что же касается до сделанного мною предложения приготовить нескрепленную 6-дюйм. пушку и выставить ее на срав-

нительное испытание стрельбой с пушкой того же калибра, но скрепленной кольцами, то оно было отклонено на том основании, что пушки этого калибра вообще прочны, а потому нет надобности изменять что-либо в условиях их приготовления. Кроме того, по мнению лиц, рассматривавших этот вопрос, такой опыт тогда только может привести к решительным заключениям, если он будет произведен над орудием по крайней мере 11-дюйм. калибра.

Приступить к дальнейшему продолжению опытов над стволами и орудиями такого калибра я не мог по причинам, от меня не зависящим, — а потому, — с окончанием вышеописанного исследования, работы пришлось остановить.

Исследование внутренних напряжений в стальных снарядах

По мере развития и усовершенствования выделки броневых плит артиллерия стала требовать от частной промышленности все более и более совершенных снарядов, и вопрос о наилучшем способе их приготовления сделался предметом изучения на многих заводах.

Снаряды из закаленного чугуна, попадавшие при стрельбе в железные плиты по нормали, давали результаты, признанные в свое время удовлетворительными. Но когда появилась мысль, что в действительном бою попадание по нормали есть случай весьма редкий и что при стрельбе по броненосцам снаряды будут почти исключительно попадать косвенно, — изменились и условия их испытания стрельбой. Произведенные в разных артиллериях опыты показали, что снаряды из закаленного чугуна не могут при таких условиях действовать удовлетворительно, и их стали заменять сперва снарядами из литой некованной стали, а затем перешли к стальным кованным и закаленным снарядам. Но едва некоторые — впрочем весьма немногие — заводы достигли приготовления стальных снарядов, достаточно хорошо действовавших при косвенном ударе по железным плитам, как появилась стале-железная броня, для пробивания которой потребовался еще более совершенный снаряд. Наилучший тип этого последнего, который мог бы быть признан вполне удовлетворительным для стрельбы как по нормали, так и под углом, к таким плитам — остается пока еще не выработанным окончательно. С теоретической точки зрения наилучшим снарядом признается тот, который, ударяясь в плиту (какой бы то ни было толщины), не только остается целым, но даже не деформируется, а следовательно, вся его живая сила расходуется на разрушение плиты. С практической же точки зрения, для боя возможно довольствоваться снарядами, которые пробивали бы плиты известной определенной толщины, хотя бы сами при этом разбивались, пролетая через пробоину в кусках.

Требования, которые применяются в различных артиллериях для оценки стальных снарядов, определяются господствующими

в данное время воззрениями. Одни требуют от снаряда только известного пробивающего действия. Другие ставят главным условием, чтобы снаряд не разбивался при ударе в плиту, причем не придают особенного значения глубине его проникания. Снаряд может, однако, остаться целым и быть деформирован [1]. О потере живой силы, употребленной на такое деформирование, всего правильнее судить по глубине проникания его в плиту. Если это углубление мало, то действие снаряда следует признать ничтожным, хотя он не разбился при ударе. С другой стороны снаряд может израсходовать всю живую силу на проникание в плиту и затем быть разбитым при отбрасывании его плитой назад, как то иногда случается при косвенном ударе в плиту большой толщины. Углубление, произведенное таким снарядом, может быть весьма значительным, и его следовало бы признать вполне удовлетворяющим своему назначению, но он будет забракован там, где требуется от снаряда только одна неразбиваемость. При таком различии требований и взглядов, при разнообразии плит, употребляемых для испытания снарядов стрельбой и разнообразии самих условий испытаний — едва ли можно указать один какой-либо общий тип снаряда, одинаково пригодного для прямой и косвенной стрельбы как по железным, так и по стале-железным плитам.

Напомнив в общих чертах положение вопроса о бронепробивающих снарядах, перехожу к опытам по исследованию внутренних напряжений в различные эпохи их приготовления, вместе с кратким изложением достигнутых при стрельбе результатов. Из числа всех произведенных мною опытов я ограничиваюсь описанием только четырех главнейших типов. Результаты исследования пояснены диаграммами на черт. 5, фиг. 1—10.

На черт. 5, фиг. 1 приведен первоначальный тип 34-*см* снаряда из литой некованной стали. Действие некоторых из этих снарядов было признаваемо довольно удовлетворительным при стрельбе по железным плитам, хотя снаряды и не всегда оставались целыми. Для косвенного удара снаряды этого способа приготовления совершенно не были пригодны. Характер напряжения в стенке снаряда вредный, так как наружный слой находится в сильно сжатом, а внутренний в весьма растянутом состояниях. Судя по этому характеру напряжений, способ фабрикации состоял в одной только весьма сильной наружной закалке, без охлаждения металла со стороны внутренней пустоты. Снаряды этого типа нередко давали сквозные трещины и даже лопались при заточке желобка для помещения заднего медного пояска.

В следующем черт. 5, фиг. 2 приведен опыт над снарядом того же завода, но с изменением способа закалки, а именно наружный и внутренний слои стенки находятся в сжатом со-

[1] В пределах, которые для этого иногда назначаются и определяются обмером изменений некоторых частей снаряда после удара в плиту.

стоянии; следовательно, охлаждение было ведено и со стороны внутренней пустоты. Снаряды этого типа, хотя и были приготовлены при совершенно одинаковых условиях (кроме закалки) со снарядами предшествующего типа, давали при стрельбе несравненно лучшие результаты: они не разбивались при прямом ударе в железные плиты, а при заточке желобка для заднего пояска не лопались. Относительно этих снарядов можно сказать только одно, что в их стенке, вследствие закалки с двух сторон, существовал ослабленный слой, находящийся в сильно растянутом состоянии. Косвенного удара по железной броне эти снаряды не выдерживали.

На черт. 5, фиг. 3 и 4 приведены результаты исследования внутренних напряжений в снарядах из литой некованной стали, но другого завода, достигшего лучших результатов, чем предшествующий завод. Снаряд этого типа при стрельбе под углом в 25° к нормали по железной 15½ дюйм. плите (такую толщину он по расчету не может пробить), произвел углубление большее, чем то, которое получалось при стрельбе лучшими из кованных стальных снарядов. Но эти последние не разбивались от удара, между тем как некованный снаряд был найден разбитым. Однако изучение разбитого снаряда, а также произведенного им углубления, показало, что разбитие произошло после совершения полной работы проникания, а именно тогда, когда действием плиты снаряд отбрасывался назад, причем происходил боковой удар, который французы называют coup de fouet, о кромку плиты, и такого удара снаряд не выдержал. Хотя причина разбития снаряда произошла после совершения им полной работы проникания, и с практической точки зрения его было бы возможно признать хорошим, но его забраковали потому, что он не удовлетворял условию неразбиваемости. Характер напряжений в снарядах этого типа смешанный, т. е. закалка ведена с двух сторон — снаружи и со стороны внутренней пустоты. Наиболее ослабленный, т. е. растянутый слой стенки приближен к наружному радиусу, а величина существующего расширения менее значительна, чем в снаряде предшествующего типа.

На черт. 5, фиг. 6 приведен один из первоначальных снарядов литой некованной стали того же завода. У этого снаряда во время хранения в складе отскочила сама собой головная часть. Исследование оставшейся цилиндрической части показало, что внутренние напряжения в наружном слое по четырем обмеренным диаметрам были весьма разнообразны.

На черт. 5, фиг. 7 и 8 показаны результаты исследования кованных стальных снарядов, которые, несмотря на превосходные качества материала (тигельная сталь), оказывались совершенно неудовлетворительными при косвенной стрельбе по железным плитам. Напряжения в этих снарядах безусловно вредные; металл в наружных слоях сильно сжат вследствие энергической закалки и растянут в слое у поверхности пустоты.

На черт. 5, фиг. 9, 10 и 5 приведены результаты исследований в лучших из кованных стальных снарядов. В них при сильной наружной закалке довольно слабая закалка со стороны пустоты; ослабленный слой стенки находится в очень растянутом состоянии. Снаряды этого типа вообще прекрасно действовали при косвенной стрельбе по железным плитам, но разбивались при прямом выстреле по стале-железным плитам.

Рассматривая диаграммы, выражающие распределение внутренних напряжений в стенках снарядов, закалка которых ведена с двух сторон, можно видеть, что закон этого распределения в сущности отличается от распределения безусловно вредных или безусловно полезных напряжений. Во-первых, видно, что при сказанных смешанных напряжениях в стенке существуют два слоя, напряжения которых равны нулю и, во-вторых, что есть слой, где давление равно нулю.

В дополнение к этим общим замечаниям, прилагаю таблицу результатов механических испытаний стали от снарядов каждого из означенных типов (см. табл. Г).

Таблица Г

Обозначение	Снаряды типа Т № 48 и 49, черт. 5 фиг. 1 и 2	Снаряды типа АТ № 73, 85 и 45, черт. 5 фиг. 4, 3 и 6	Снаряды типа О № 38 и 40, черт. 5 фиг. 7 и 8	Снаряды типа К № 30, 36, 53 черт. 5, фиг. 9, 10 и 5
Предел упругости в атмосферах	4000	6124 5780	7230 7760	6100 7740
Сопротивление разрыву в атмосферах .	7100	10950 9154	12530 11420	11250 11560
Удлинение образцов при разрыве в процентах	3	3	5,8 4,8	8,2 6,0

Из сопоставления данных, полученных при исследовании внутренних напряжений, результатов испытаний стали, помещенных в таблице Г, можно, как кажется, прийти к следующим заключениям.

1) При одинаковых качествах стали, выражаемых пределами упругости и сопротивлением разрыву, тот снаряд дает при стрельбе лучшие результаты, в котором внутренние напряжения приближаются к идеально-полезным. Отсюда вытекает то положение, что наиболее совершенным будет тот снаряд, охлаждение которого всецело идет со стороны внутренней его пустоты; тогда наружный слой будет находиться в наименее растянутом состоянии, так как это растяжение относится к сжатию внутреннего слоя обратно пропорционально соответствующим радиусам.

2) Для проникания снаряда в броню необходимо, чтобы головная его часть обладала большей твердостью, чего иначе нельзя достигнуть как сильной закалкой снаружи. При совместном действии энергической наружной и внутренней закалки является внутри стенки ослабленный слой, находящийся в состоянии сильного растяжения, и притом значительно большего, чем то растяжение, которое имеет место при закалке только с одной стороны. Расстояние этого слоя от внутреннего радиуса стенки и величина его растяжения имеют большое влияние на достоинство снаряда. Чем более удален этот слой от внутреннего радиуса стенки, тем ближе будет снаряд подходить к снаряду с идеально-полезными напряжениями. Чем растяжение этого ослабленного слоя будет больше (по отношению к пределу упругости), тем меньше будет сопротивление снаряда действию удара.

3) Если вышеприведенные соображения справедливы, если для сообщения известным частям снаряда большей твердости необходимо вести закалку с двух сторон и потому приходится, так сказать, против желания оставлять в стенке ослабленный слой, то достижение хороших результатов как при закалке, так и при действии снаряда по броне, возможно лишь при очень высоком пределе упругости стали. Отсюда также можно заключить, что такую закалку следует ограничивать лишь теми частями снаряда, где она существенно необходима, как, например, в головной части и в верхней прилегающей к ней цилиндрической части; в других же частях снаряда, т. е. ближайших к дну, закалку следует вести только со стороны внутренней пустоты.

4) Вследствие нерационального применения закалки и вредного характера развившихся оттого внутренних напряжений, снаряды типа О, приготовленные из прекрасной кованной стали, обладающей весьма высоким пределом упругости и сопротивлением разрыву, оказались при стрельбе по броневым плитам хуже, чем снаряды типа АТ из литой некованной стали среднего достоинства.

5) Этот последний тип весьма замечателен в техническом отношении, в особенности если обратить внимание на то, что снаряды были отлиты из беспузыристой стали (следовательно, по химическому составу не вполне соответствующие наиболее выгодным условиям), полученной из печей Сименса-Мартена и при употреблении материалов среднего достоинства. Тем не менее металлу этих снарядов были сообщены, путем соответствующей его обработки (не прибегая к ковке), такие свойства (как-то: предел упругости и сопротивление разрыву), какие весьма редко достигаются даже в очень хороших сортах кованной стали. Отчасти вследствие этого, а главным образом благодаря благоприятному развитию внутренних напряжений — снаряды по величине их углубления при проникании в броню занимают одно из первых мест в ряду испытанных стрельбой снарядов. А между тем,

снаряды эти были признаны негодными по причинам, о которых я сказал в своем месте.

6) В снарядах типа К, признанных по стрельбе безусловно прекрасными, внутренняя закалка, по моему мнению, слаба; наиболее растянутый слой приближен к внутреннему радиусу стенки; такое распределение напряжений едва ли можно признать за наивыгоднейшее, и снаряды эти не выдерживали выстрела по нормали в стале-железную плиту. Замечу также, что в числе снарядов этого типа попадаются от времени до времени снаряды, деформирующиеся при косвенной стрельбе по железным плитам.

7) Форма снаряда, т. е. очертание и длина головной части и ее отношение и переход к стенкам цилиндрической части, влияют не только на степень проникания снаряда в плиту, но и на достижение хороших результатов при закалке. Для каждого изменения этой формы необходимо приискивать соответствующие приемы обработки с целью развить в металле внутренние напряжения, наивозможно ближе подходящие к идеально-полезным. При настоящем же состоянии наших знаний и при недостаточно полной технической обработке вопроса — получение неразбиваемых снарядов есть пока дело случайности.

В заключение я должен сказать, что в последнее время появились снаряды, которые признаются удовлетворительными для стрельбы по нормали в стале-железные плиты. Таких снарядов я не имел возможности исследовать, а потому не могу сказать, в чем заключается их особенность. Но, насколько мне известно, и эти снаряды очень разнообразны, так как они не только иногда разбиваются при стрельбе, но дают поверхностные трещины также и во время хранения в складах.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами приведенных опытов доказано, что во всех без исключения стальных изделиях существуют внутренние напряжения. Напряжения эти, при ныне принятых способах фабрикации орудийных стволов, внутренних орудийных труб, скрепляющих колец и разного рода цилиндров, имеют характер вредных, уменьшающих предполагаемую прочность окончательно готовых предметов. Опыты показали также, что величина и характер внутренних напряжений находятся в прямой зависимости от условий обработки; эти напряжения могут быть видоизменяемы в широких пределах, и техника в состоянии указать для того вполне надежные, верные и весьма простые средства.

Нет никакого основания, ни расчета оставлять в металле вредные напряжения. Каждый завод должен для увеличения сопротивления выделываемых предметов пользоваться силами, заключенными внутри металлических масс и сообразно этому видоизменять существующие или установить новые способы фабрикации.

Приготовление изделий, обладающих требуемой прочностью, есть главнейшая задача каждого производства. Теория давно указала, что наибольшее сопротивление какого-либо цилиндра будет достигнуто, когда все слои его стенки, при действии внешних усилий, например при выстреле, будут одновременно и равномерно расширяться до известного допустимого предела. В скрепленном орудии, как известно, равномерное и одновременное расширение слоев достигается при выстреле на внутренних радиусах ствола и колец; увеличивая число рядов колец, мы вводим большее число слоев, принимающих равное участие в общем сопротивлении. Но достигнуть того, чтобы все слои стенки приняли равное участие в таком сопротивлении, можно только в цилиндре с идеально-полезными напряжениями. Такой ствол будет типом наиболее совершенного орудия. Его не придется одевать кольцами, нагоняемыми с сильным стягиванием. От сложной постройки современных орудий мы перейдем к простому, дешевому и надежному ее виду. Мы вернемся к однородному стволу и тогда сочтем анахронизмом те орудия, которые ныне составляются из множества отдельных частей, при 4 и до 6 рядов колец; такие крайние проявления должны быть чужды позитивной точке зрения, стоящей на почве фактов и строго практических соображений.

В современных орудиях кольца надеваются с сильным стягиванием, а следовательно, металл их еще до выстрела находится в состоянии значительного расширения. При тех допусках и уклонениях, которые неизбежны при валовой фабрикации, нагонка колец со значительным стягиванием может вести иногда к опасным, и почти всегда к очень сомнительным результатам. В самом металле колец могут, как то показали опыты, существовать предварительные вредные внутренние напряжения, что еще более способствует расстройству металла колец при выстреле. Наконец, мы указывали в своем месте на случай нерационального расчета скрепления кольцами чугунных стволов, отлитых с внутренним охлаждением, — такое скрепление по всей вероятности расстраивает металл стволов. Поэтому если мы согласимся признать за тип наиболее совершенного орудия однородный ствол, и если в техническом отношении будет затруднительно получить такой ствол с развитием в нем безусловно полезных напряжений при данной толщине стен, то его можно одеть одним рядом колец, но без стягивания, и притом кольцами, имеющими полезные внутренние напряжения. В таком орудии металл на внутреннем радиусе кольца до выстрела будет находиться в сжатом состоянии, а при выстреле амплитуда расширений этого слоя будет весьма значительна, и металл ни в кольце, ни в самом стволе не будет расстроен. Фабрикация орудий будет удешевлена и упрощена до последней степени; прочность пушек будет вполне обеспечена, и заводам не придется делать (как ныне при скреплении кольцами) разных допущений и предположений для осуществления указанных теорией расчетов.

Ствол составляет существенную часть орудия; его назначение — доставлять наибольшее сопротивление продольному разрыву. Орудие лучше всего устраивать так, чтобы ствол не принимал никакого участия в сопротивлении поперечному отрыву; это должна выполнять особая часть орудия, его кожух, в котором будет помещен запирающий механизм, как то весьма рационально предложено Лонгриджем в проволочных орудиях. Точно так же от кожуха или оболочки нет надобности требовать, чтобы он участвовал в продольном сопротивлении разрыву, а потому он может быть надеваем на ствол с зазором. Третью часть орудия будет составлять цапфельное кольцо или приспособление, его заменяющее.

Способа соединения цапфельного кольца со стволом и кожухом я касаться не буду, так как для достижения этого не может быть практических затруднений.

Орудия малых калибров, по крайней мере до 6 дюйм. включительно, могут состоять только из двух частей: из ствола и надетого на него цапфельного кольца [1]. При сравнительно небольших давлениях, которые получаются при стрельбе из таких орудий, при полной возможности достигнуть высокого предела упругости в металле болванок, из которых готовятся стволы, нет, как кажется, причины вводить особую оболочку для передачи ей участия в сопротивлении поперечному отрыву. В орудиях же больших калибров она будет, без сомнения, полезна.

Из приведенных нами результатов испытания стали видно, что при выделке стволов большого размера весьма затруднительно достигнуть того, чтобы металл в слоях у канала обладал высоким пределом упругости. Быть может, высверливание канала в литых болванках и ковка их под ковальным прессом на холодном стержне, вводимом в высверленный канал, как то принято на одном известном заводе, будет способствовать повышению предела упругости в слоях, прилегающих к каналу ствола; но так как этот способ обработки пока нельзя считать общепринятым, то приходится иметь в виду указанное несовершенство и устранить зависящее от того уменьшение сопротивления стволов для орудий больших калибров. Цель эта достигается ныне вставкой в стволы внутренних труб [2]. Мера в данном случае весьма полезная; но труба будет только тогда отвечать своему назначению, если в ней до выстрела будут существовать полезные внутренние напряжения, на что в настоящее время почти нигде не обращают внимания.

Итак, мы видим, что удешевление и упрощение фабрикаций орудий вполне возможно и достижимо, если только согласятся,

---

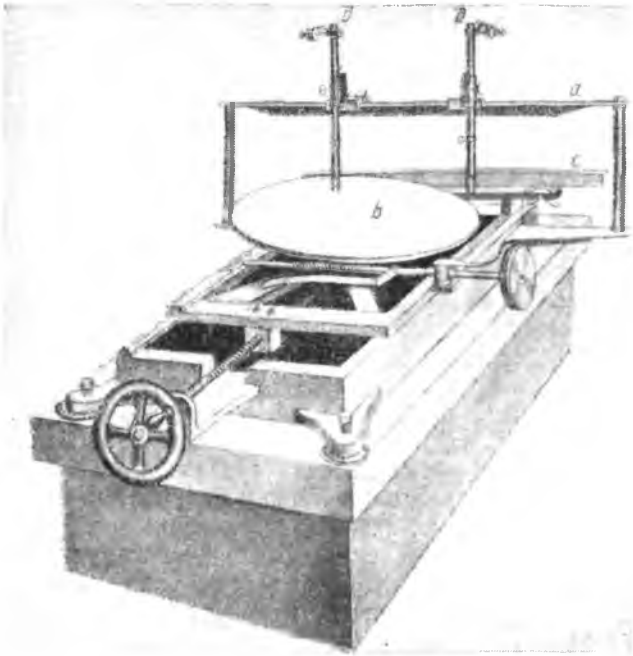
[1] Понятно, что запирающий механизм будет помещен в самом стволе.

[2] Металл внутренних труб лучше противостоит действию выгораний, и исправление каналов орудий, попорченных на службе, давно уже проводится посредством вставки внутренних труб.

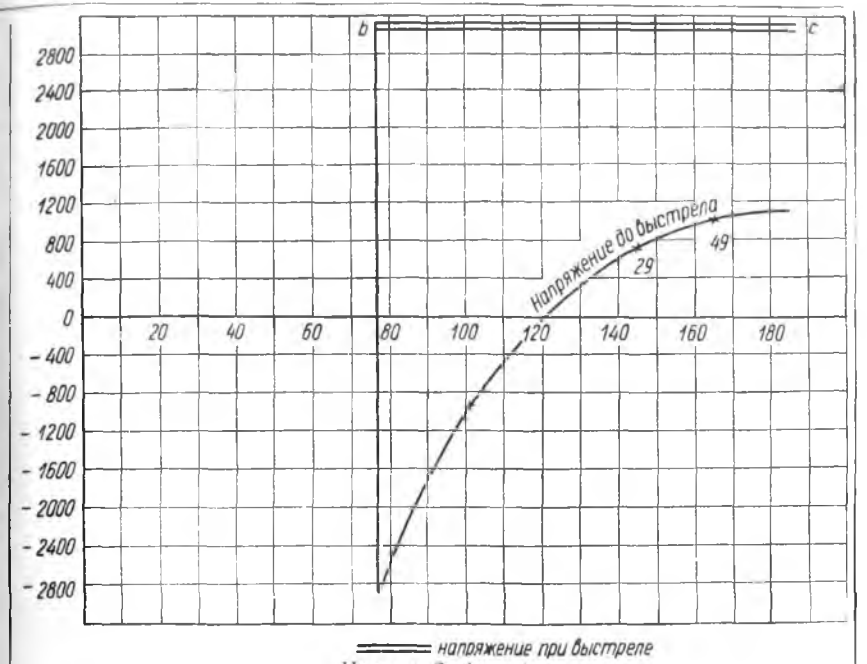
что проводимый мною основной принцип — развитие в металле полезных напряжений — будет признан безусловно верным. Вопрос состоит в том, насколько можно быть уверенным в достижении вполне однообразных напряжений на всей длине ствола, в особенности при его значительном калибре и размерах. Я не могу ответить на этот вопрос указанием на какой-либо прямой опыт, но уверен, что это достижимо, судя по тому, что получено лично мной в 6-дюйм. стволе и что получалось на пушечных заводах в стволах для 9 и 11-дюйм. чугунных пушек. Допуская даже, что при стремлении развить полезные напряжения, мы достигнем в них величин меньших, чем при напряжениях идеальных, то и в таком случае выигрыш в сопротивлении цилиндров будет весьма значителен, а польза несомненна. Стальные орудия, приготовленные даже при таких не вполне совершенных условиях, будут проще, прочнее и дешевле нынешних. Кроме того, для многих случаев обороны, мы можем воспользоваться чугунными пушками, применив к ним более соответствующий способ скрепления кольцами.

Вопрос об изучении внутренних напряжений неминуемо должен привести не только к весьма серьезным изменениям в конструкции орудий, но и к установлению фабрикаций многих предметов на более рациональных началах. При этом, однако, для полного разрешения вопроса придется исследовать одно существенно важное обстоятельство: изменяются ли внутренние напряжения с течением времени? Существует мнение, что они мало по малу уничтожаются. Я не имел возможности произвести такого опыта над дисками, взятыми для исследования после сохранения их в течение долгого времени. Могу сказать только то, что диски за № 79 и 81 были исследованы мною в промежутке времени более одного года — и сколько-нибудь существенного изменения в напряжениях не оказалось. Точно так же диск от чугунной 9-дюйм. пушки был исследован мною почти через 2 года после его отрезки от ствола — отчего напряжения в нем, повидимому, нисколько не уменьшились. Но как бы то ни было, если необходимо определить действие времени на изменение величин внутренних напряжений, то тот же способ исследования следует применить и к напряжениям составных цилиндров, т. е. к стволам, скрепленным кольцами, надетыми с точно известным стягиванием.

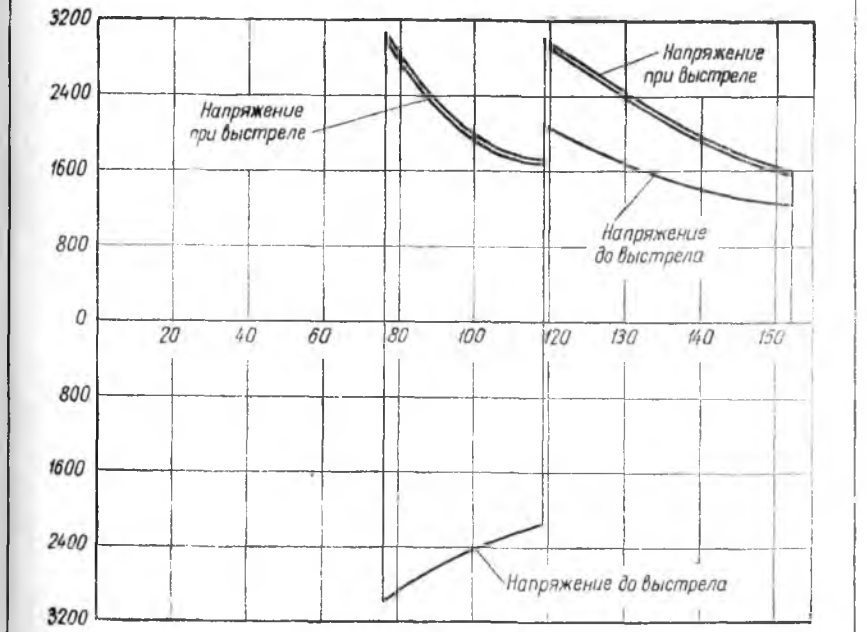
Затем мне остается сказать, что быть может описанный мною способ исследования внутренних напряжений будет сочтен слишком сложным и медленным по применению его для заводских целей, но такая работа необходима лишь при установке фабрикации и в период опытов. С установкой же валового производства на выработанных началах и для контролирования правильности хода его, определение характера и величины получаемых напряжений может быть упрощено до степени тех общих испытаний металла, которые ныне ведутся на заводах.



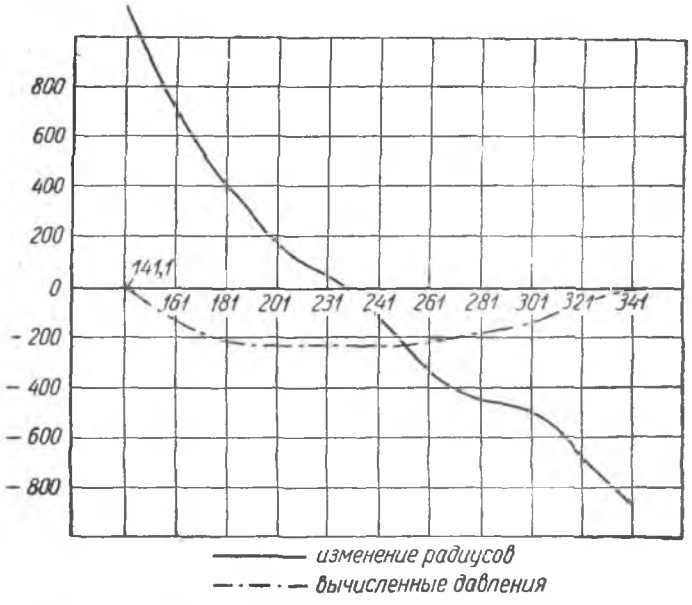
Чертеж 1.



Чертеж 2, фиг. 1.

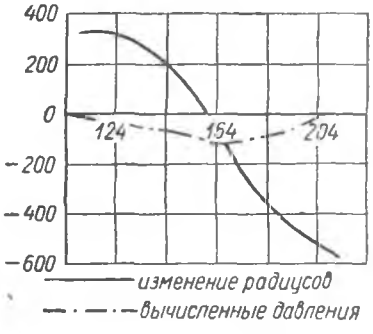


Чертеж 2, фиг. 2.



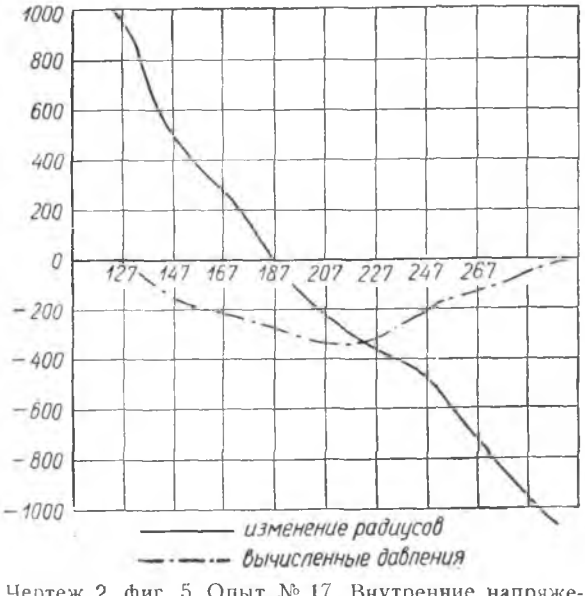
Чертеж 2, фиг. 3. Опыт № 19. Внутренние напряжения в 11-дюйм. (28 *см*) пушке № 1. Диск взят близ средины орудийного ствола.

C = 0,33%; Si = 0,19%.



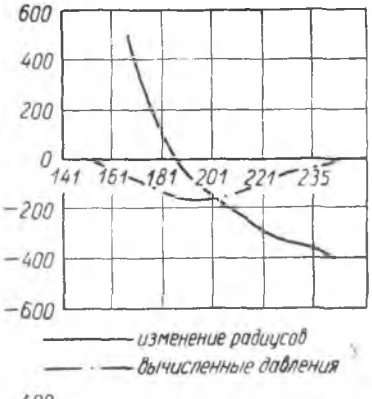
Чертеж 2, фиг. 4. Опыт № 16. Внутренние напряжения в диске, взятом от дульной части 9-дюйм. (22,6 *см*) пушки № 345.

C = 0,67%; Si = 0,21%; Mn = 0,14%.

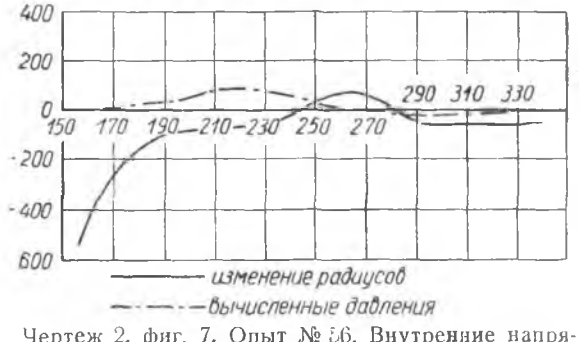


Чертеж 2, фиг. 5. Опыт № 17. Внутренние напряжения в казенной части стальной 9-дюйм. (22,9 *см*) пушки № 261.

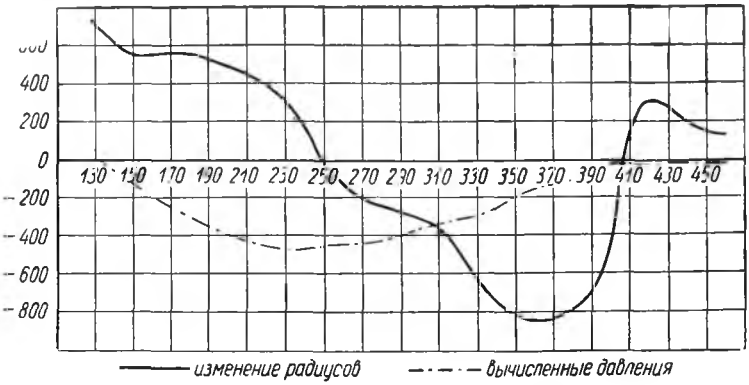
C = 0,47%; Si = 0,10%; Mn = 0,05%.



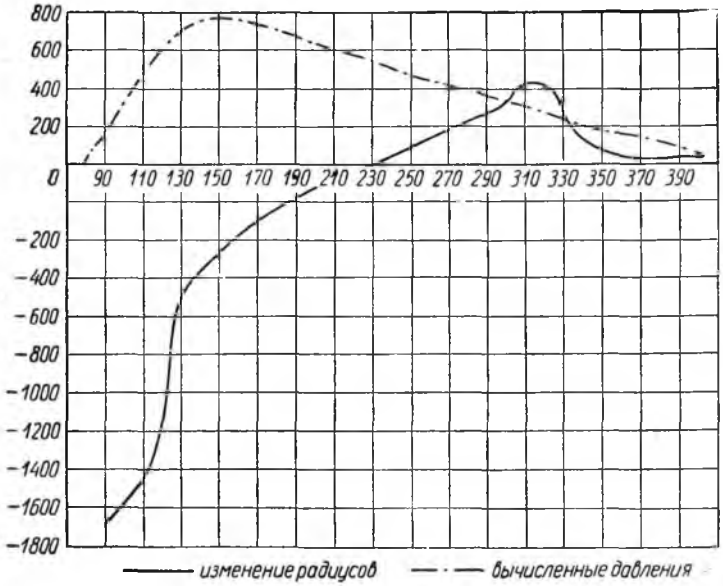
Чертеж 2, фиг. 6. Опыт № 22. Внутренние напряжения в дульном срезе ствола 11 дюйм. (28 *см*) пушки № 73.



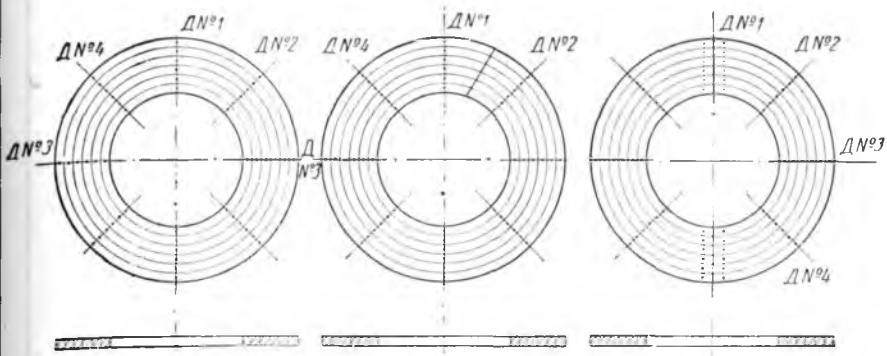
Чертеж 2, фиг. 7. Опыт № 56. Внутренние напряжения в диске, вырезанном из ствола для 30,5-*см* (12 дюйм.) пушки, на расстоянии $^3/_5$ длины ствола (5,49 *м*) от дульного среза.



Чертеж 2. фиг. 8. Опыт № 86. Внутренние напряжения в диске, взятом от замочной части ствола для 11-дюйм. (28 *см*) № 1170 пушки, прокованном, высверленном нагрубо и отожженном.

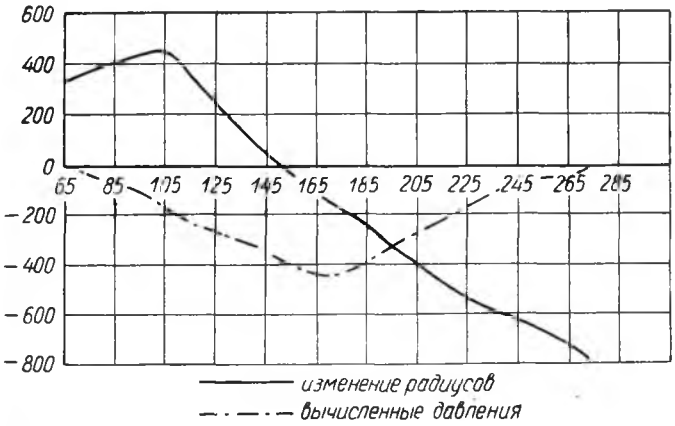


Чертеж 2, фиг. 9. Опыт № 20. Внутренние напряжения в диске, отрезанном от чугунного и невысверленного ствола, отлитого с внутренним охлаждением для 9-дюйм. (23 *см*) пушки № 1561.

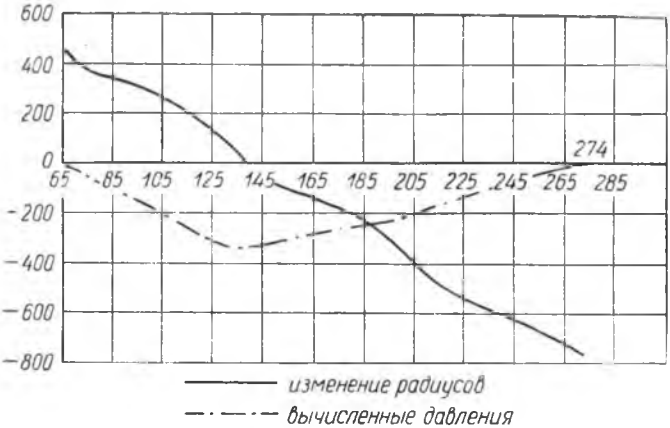


Фиг. 1. Фиг. 2. Фиг. 3.

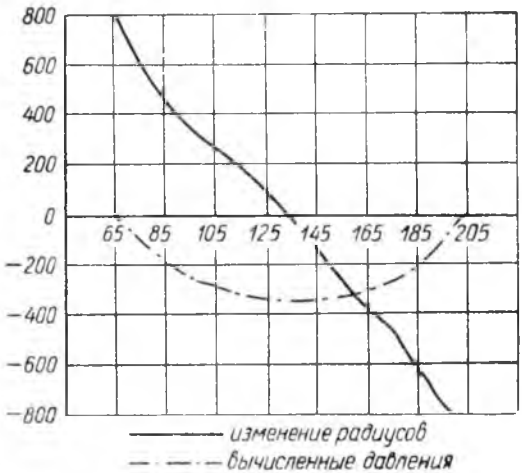
Чертеж 3.



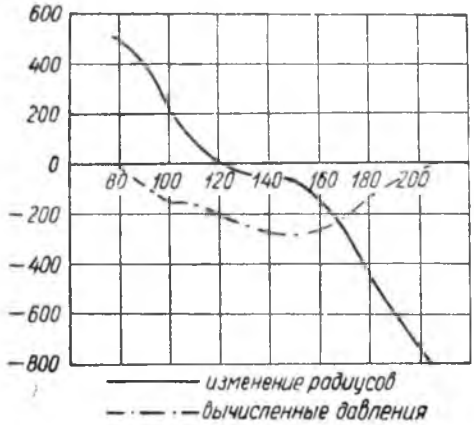
Чертеж 3, фиг. 4. Опыт № 61. Внутренние напряжения в диске C', взятом от замочной части кованного неотожженного ствола 6-дюйм. пушки № 1581.



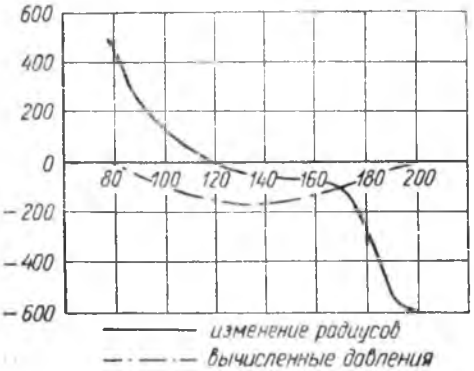
Чертеж 3, фиг. 5. Опыт № 65. Внутренние напряжения в диске *C*, взятом от замочной части ствола 6-дюйм. пушки № 1581 после проковки и обыкновенного отжига в масле.



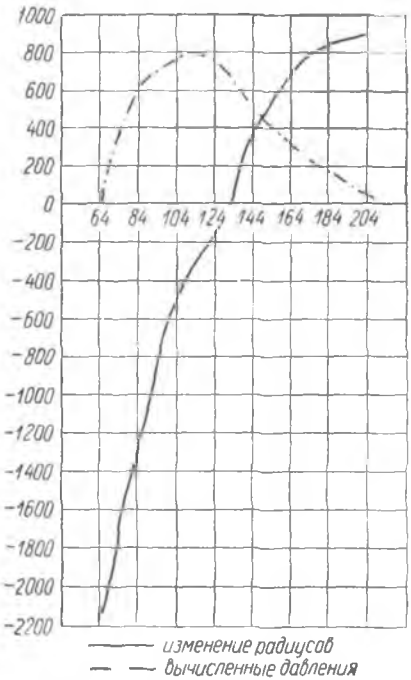
Чертеж 3, фиг. 6. Опыт № 76. Внутренние напряжения в диске *G*, взятом от казенной части 6-дюйм. ствола № 1581, кованного и отожженного в масле.



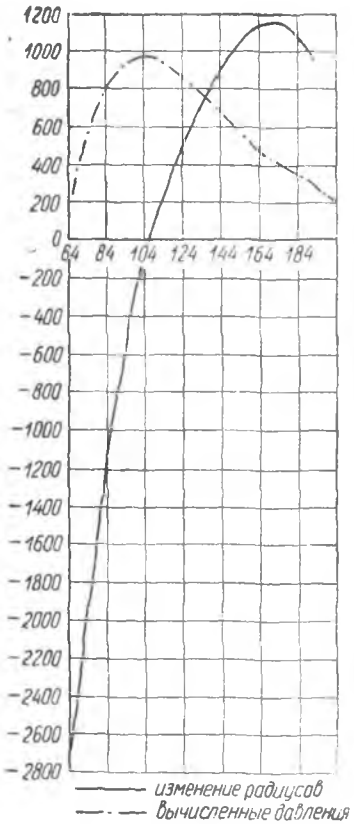
Чертеж 3, фиг. 7. Опыт № 71. Внутренние напряжения в диске *E*, взятом от казенной части ствола для 6-дюйм. пушки № 1581. Канал диска был нарезан, но снаружи диск не был сточен.



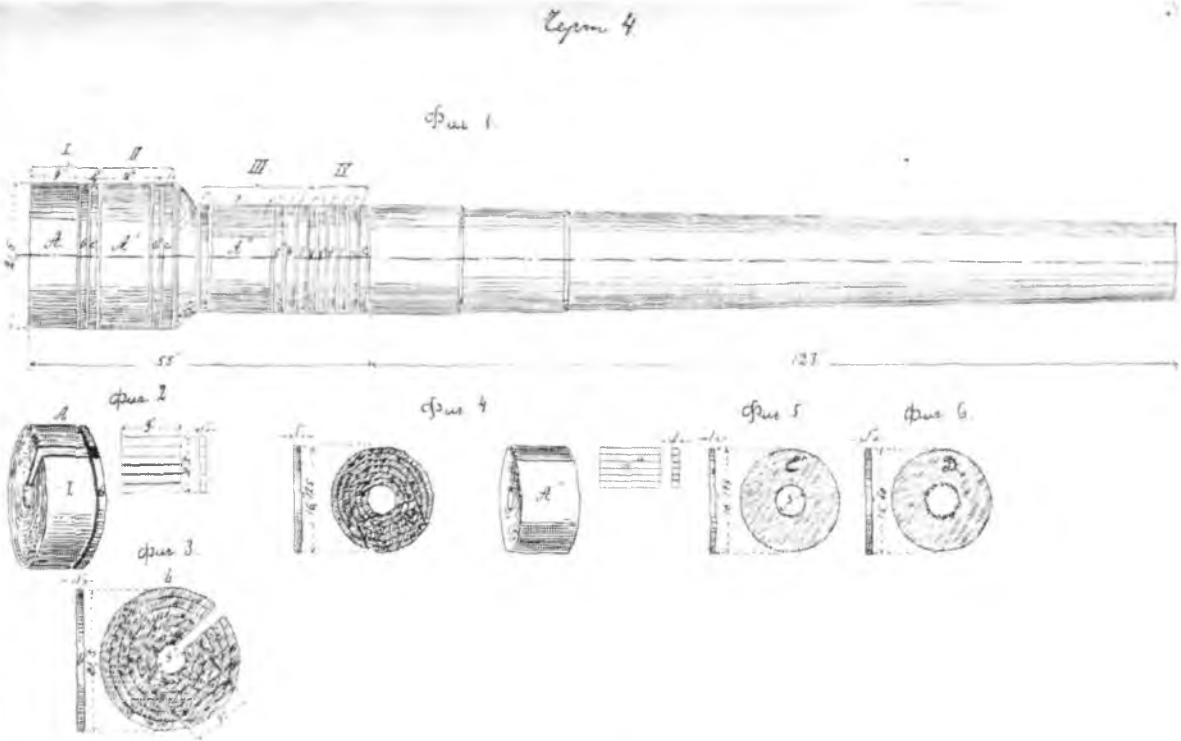
Чертеж 3, фиг. 8. Опыт № 70. Внутренние напряжения в диске *D*, взятом от казенной части 6-дюйм. ствола № 1581; диск был приведен в нормальные размеры готового ствола, т. е. сточен, а канал нарезан.



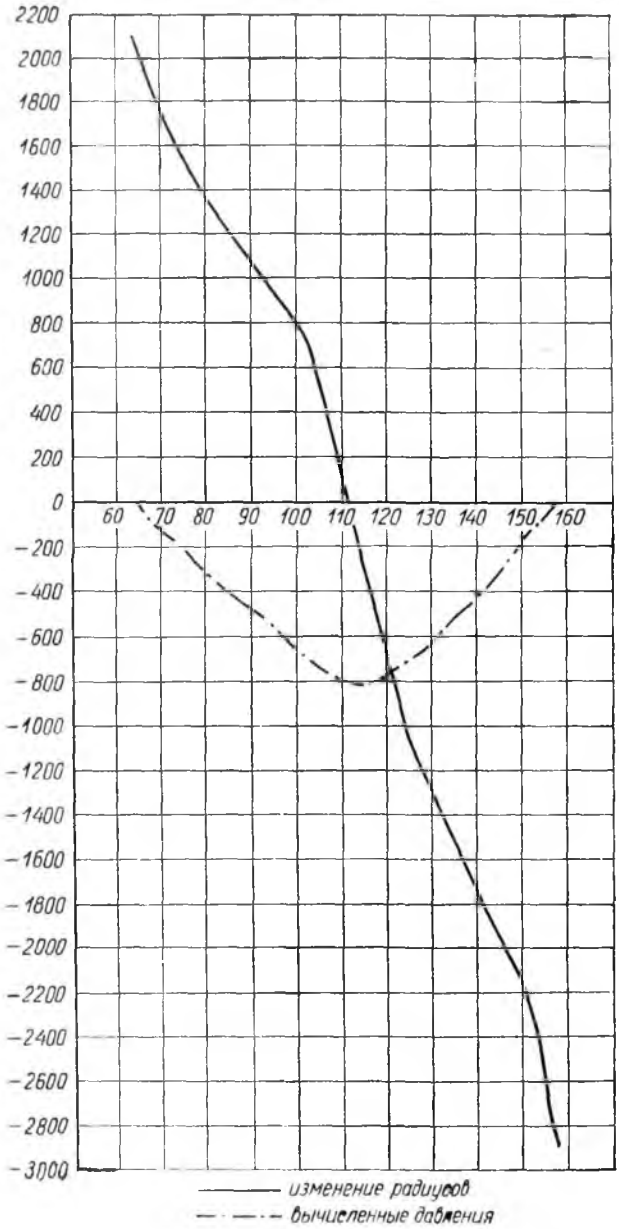
Чертеж 3, фиг. 9. Опыт № 79. Внутренние напряжения в диске *Н*, взятом от 6-дюйм. ствола № 1581, подвергнутом после закалки в масле специальному отжигу для развития в металле напряжений полезных.



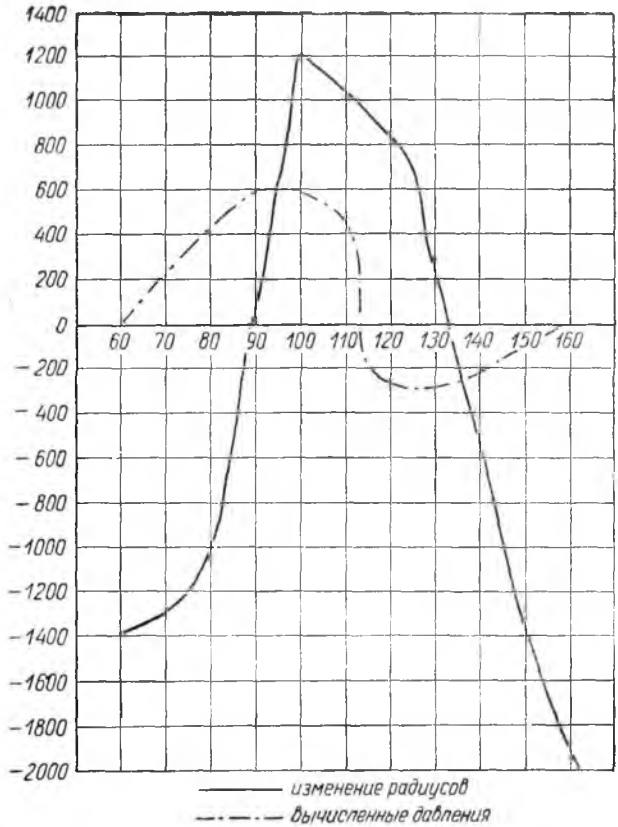
Чертеж 3, фиг. 10. Опыт № 81. Внутренние напряжения в диске *Л* от ствола 6-дюйм. пушки № 1581 после такой же обработки, как и диска *Н* (№ 79). Определение напряжений выполнено с последовательным срезанием колец с наружной стороны диска.



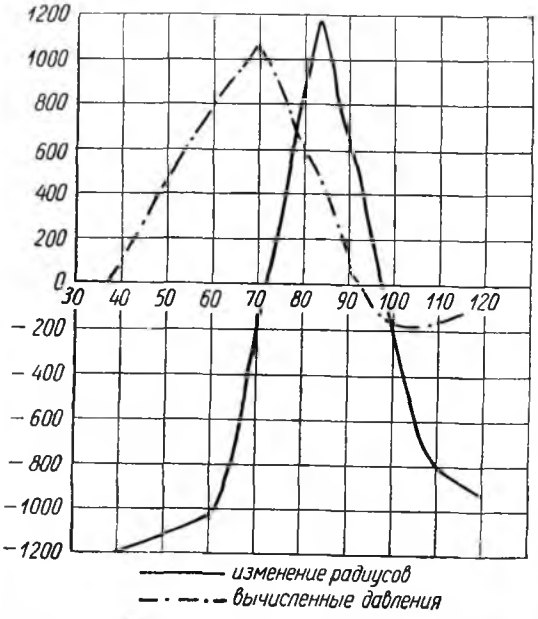
Чертеж 4.



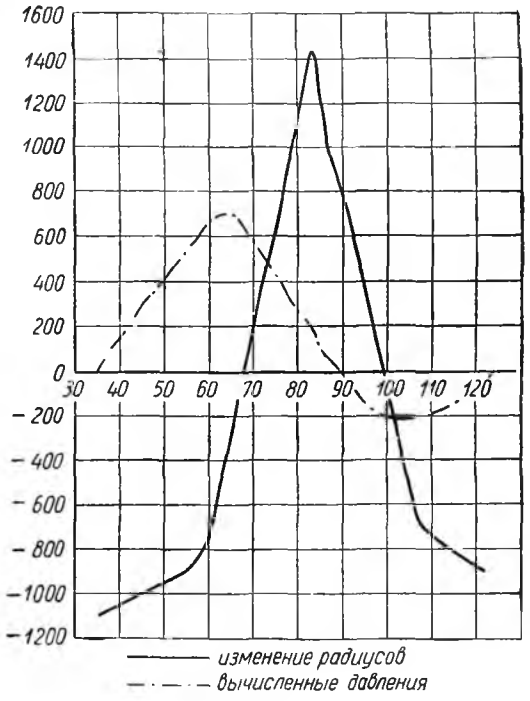
Чертеж 5, фиг. 1. Опыт № 48. Внутренние напряжения в диске, взятом от 13,4-дюйм. (34,0 *см*) стального заряда завода Т (от цилиндрической части при ее переходе к головной части). Снаряд обозначен буквой *А*.



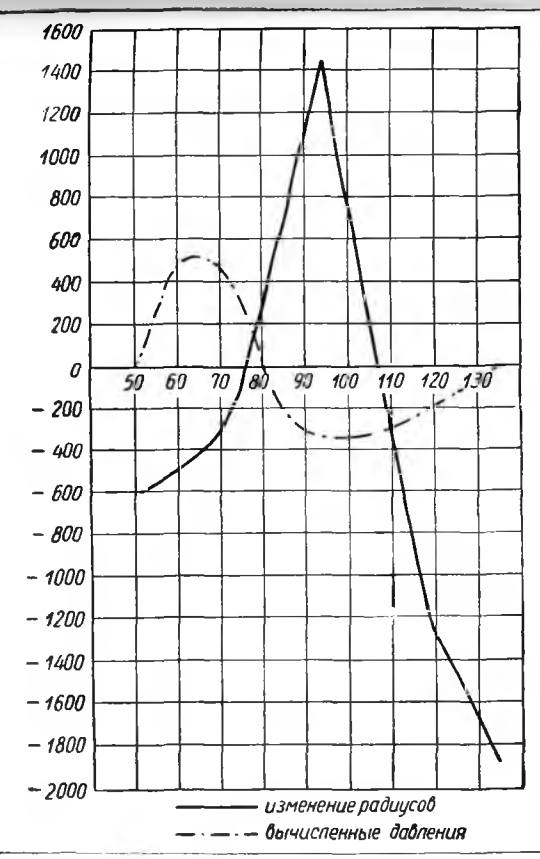
Чертеж 5, фиг. 2. Опыт № 49. Внутренние напряжения в диске, взятом от 13,4-дюйм. (34,0 *см*) стального снаряда завода Т. Снаряд обозначен буквой *В*.



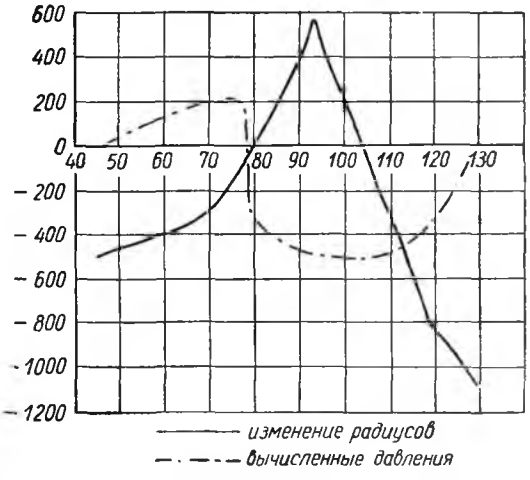
Чертеж 5, фиг. 3. Опыт № 85. Внутренние напряжения в 11-дюйм. (28 *см*) стальном снаряде завода АТ. На снаряде поставлен № 948.



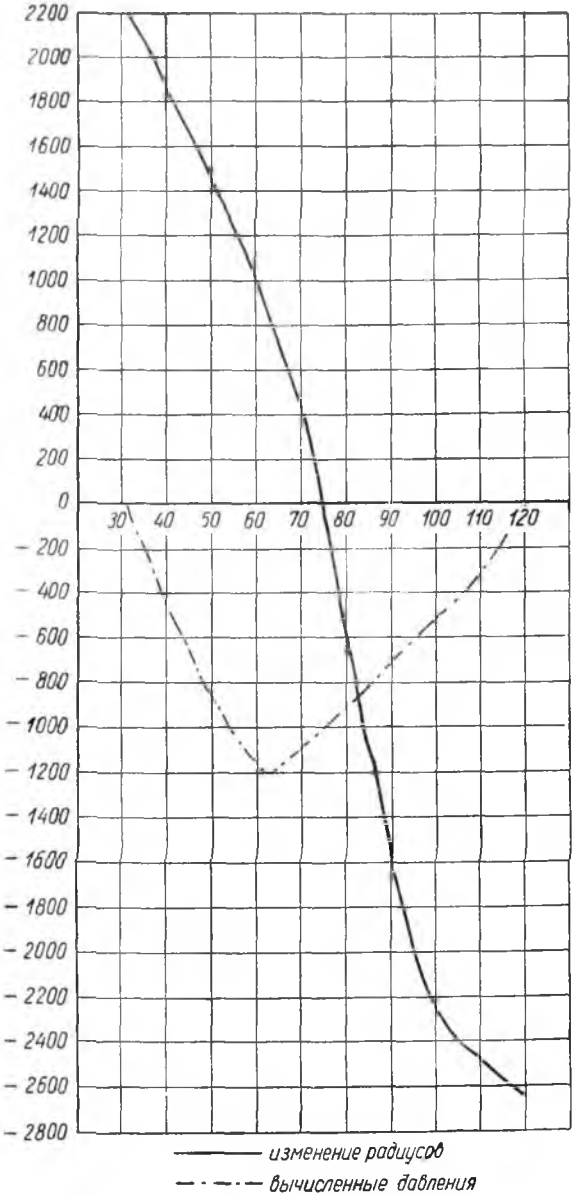
Чертеж 5, фиг. 4. Опыт № 73. Внутренние напряжения в 11-дюйм. (28 *см*) стальном снаряде завода АТ. На снаряде выставлен № 739-IV.



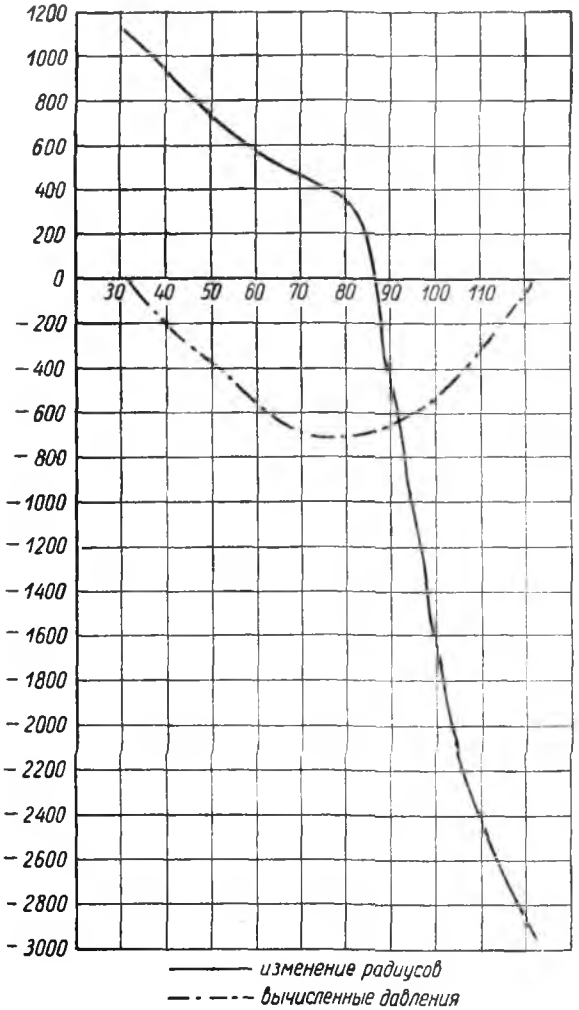
Чертеж 5. фиг. 5 Опыт № 53. Внутренние напряжения в диске от 11-дюйм. (28 *см*) стального снаряда завода К.



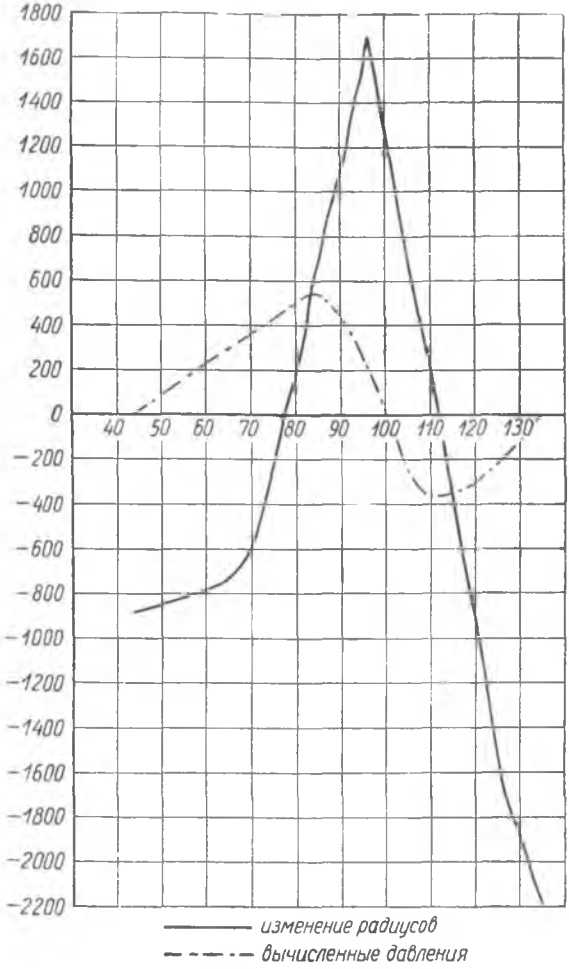
Чертеж 5, фиг. 6. Опыт № 45. Внутренние напряжения в 11-дюйм. (28 *см*) стальном снаряде завода АТ (в снаряде отскочила головная часть при перевозке в склад).



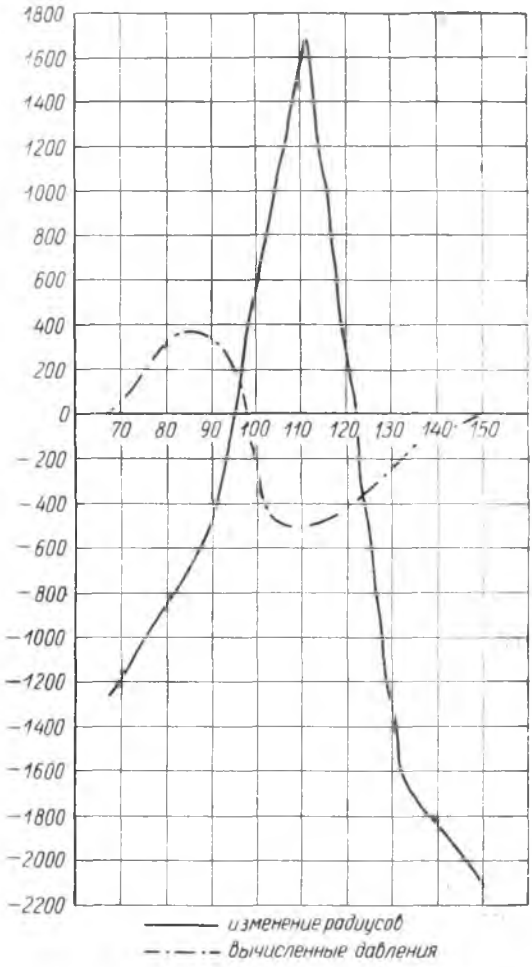
Чертеж 5, фиг. 7. Опыт № 38. Внутренние напряжения в диске от 11-дюйм. (28 *см*) стального снаряда завода О.



Чертеж 5, фиг. 8. Опыт № 40 Внутренние напряжения в диске от 11-дюйм. (28 *см*) стального снаряда завода О.



Чертеж 5, фиг. 9. Опыт № 30. Внутренние напряжения в диске от 12-дюйм. (30,6 *см*) стального снаряда завода К.



Чертеж 5, фиг. 10. Опыт № 36. Внутренние напряжения в диске от 12-дюйм. (30.5 *см*) стального снаряда завода К.

Таблица 9. Опыт № 72

Исследование внутренних напряжений в диске, взятом от трубы, приготовленной для вставки в 6-дюйм. пушку № 1221

Обозначение слоев	Обозначение диаметров	Изменения, происшедшие от разрезки на концентрические слои	Среднее 2δ	Наружные радиусы слоев R	Обмеренные радиусы слоев r''	Внутренние радиусы слоев r	$-\frac{\delta}{r''}$	Результаты испытания стали		
								Предел упругости в атм.	Сопротивление разрыву в атм.	Удлинение при разрыве в проц.
		В миллиметрах								
№ 2	1	+.0051	+.0322	R_2 106,5	r''_2 101,7723	r_2 98,75	−.000160	3250	6800	14,5
	2	+.0461								
	3	+.0440								
	4	+.0336								
№ 1	1	−.0680	−.0337	R_1 96	r'' 92,4740	r_0 77,0	+.000172			
	2	−.0283								
	3	−.0319								
	4	−.0116								

Таблица 10. Опыт № 29

Исследование внутренних напряжений в диске от среза кольца, предназначенного для скрепления орудия

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения, происшедшие от разрезки на концентрические слои	Средние величины изменений 2δ	Наружные радиусы слоев R	Обмеренные радиусы слоев r''	Внутренние радиусы слоев r	$-\frac{\delta}{r''}$	Результаты испытания стали		
								Предел упругости в атм.	Сопротивление разрыву в атм.	Удлинение при разрыве в проц.
		в миллиметрах								
№ 4	1	+.1377	+.3265	R_4 367,5	r''_4 357,4778	r_4 384,0	−.000456	2920	7150	13
	3	+.4988								
	4	+.3521								
№ 3	1	+.4000	+.2964	R_3 344,75	r''_3 337,0339	r_3 328,25	−.000437			
	3	+.1732								
	4	+.3107								
№ 2	1	+.0749	+.0816	R_2 325,67	r''_2 316,6584	r_2 307,75	−.000129			
	3	+.1004								
	4	+.0694								
№ 1	1	−.3483	−.1174	R_1 305,5	r''_1 296,4798	r_0 286,75	+.000198			
	3	+.0742								
	4	−.0781								

Примечание. Обмеры по диаметру № 2 не могли быть произведены, так как часть намеченных точек была испорчена при разрезке диска на концентрические слои.

Таблица 11. Опыт № 44

Исследование внутренних напряжений в диске, взятом от среза кольца, предназначенного для скрепления орудия

Обозначение слоев	Обозначение диаметров	Изменения, происшедшие от разрезки на концентрические слои	Среднее 2δ	Наружные радиусы слоев R	Обмеренные радиусы слоев r''	Внутренние радиусы слоев r	$-\frac{\delta}{r''}$	Результаты испытания стали		
								Предел упругости в атм.	Сопротивление ратрыву в атм.	Удлинение при разрыве в проц.
		В миллиметрах								
№ 4	1	+.1575	+.1701	R_4 735,6	r''_4 716,1892	r_4 696,1	—.000119	3258	7000	11
	2	+.1604								
	3	+.1799								
	4	+.1825								
№ 3	1	+.1101	+.1229	R_3 694,2	r''_3 672,9867	r_3 647,5	—.000091			
	2	+.1042								
	3	+.1008								
	4	+.1768								
№ 2	1	—.0752	—.0583	R_2 644,75	r''_2 631,0246	r_2 611,5	+.000092			
	2	—.1284								
	3	—.0200								
	4	—.0108								
№ 1	1	—.1628	—.1315	R_1 108,75	r''_1 597,0028	r_1 581,0	+.000220			
	2	—.1916								
	3	—.1748								
	4	—.0968								

Таблица 12. Опыт № 43

Исследование внутренних напряжений в цилиндре, скрепленном кольцом

Кольцо срезано со ствола								
Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения, происшедшие после срезывания кольца со ствола	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$	Результаты испытания металла
				Кольцо				
№ 6	1	—.3913	—.4157	R_6 * 317,53	r''_6 300,6196	—	+.000693	
	2	—.4170						
	3	—.4431						
	4	—.4111						
№ 5	1	—.4208	—.4226		r''_5 264,5176	r_5 247,8	+.000800	
	2	—.4395						
	3	—.4416						
	4	—.3887						
				Ствол				
№ 4	1	+.1004	+.1052	R_4 246,6	r''_4 228,7048	—	—.000230	
	2	+.0939						
	3	+.1091						
	4	+.1175						
№ 3	1	+.0959	+.0985		r''_3 192,5178		—.000259	
	2	+.0818						
	3	+.1056						
	4	+.1104						

Таблица 12. Опыт № 43.
(продолжение)

Кольцо срезано со ствола								
Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения, происшедшие после срезывания кольца со ствола	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$	Результаты испытания металла
				Ствол				
№ 2	1 2 3 4	+.0781 +.0958 +.1045 +.1131	+.0976		r_2^* 155,9058		—.000376	
№ 1	1 2 3 4	+.1100 +.1273 +.0909 +.1079	+.1090		r_1'' 120,4353	97,04 **	—.000454	
				Кольцо				
№ 6	1 2 3 4	+.0076 —.0568 —.1079 +.0484	—.0272	R_6 317,53	r_6'' 300,6796	r_6 298,5	+.000045	Предел упругости 2520 атм.
№ 5	1 2 3 4	+.0582 —.0390 +.0078 +.0338	+.0152	R_5 296,25	r_5'' 264,5176	r_5 247,8	—.000021	Сопротивление разрыву 6282 атм. Удлинение 9,7%

Таблица 12. Опыт № 43
(продолжение)

Срезанное кольцо разрезано на концентрические слои								
Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения после разрезки на концентр. слои (против первоначального)	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$	Результаты испытания металла
				Ствол				
№ 4	1 2 3 4	+.0381 +.0575 +.0501 +.0531	+.0490	R_4 245,6	r_4'' 228,7048	r_4 211,0	—.000107	Предел упругости 2370 атм.
№ 3	1 2 3 4	+.0231 +.0272 +.0236 +.0398	+.0284	R_3 208,5	r_3'' 192,5178	r_3 176,25	—.000073	Сопротивление разрыву 5750 атм.
№ 2	1 2 3 4	—.0090 —.0122 —.0049 —.0097	—.0089	R_2 173,75	r_2'' 155,9058	r_2 139,6	—.000029	Удлинение 14,2%
№ 1	1 2 3 4	—.0388 —.0070 —.0071 —.0189	—.0204	R_1 136,25	r_1'' 120,4352	r_1 97,04	—.000085	

Примечания: * Наружный диаметр до срезания кольца был 635,5 *мм*.
** Диаметр канала ствола до срезания кольца был 194 *мм*.

Таблица 14. Опыт № 65

Исследование внутренних напряжений в диске *C'*, взятом от замочной части ствола 6-дюйм. пушки № 1581, после проковки и обыкновенного отжига в масле

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Окончательные изменения после разрезки на концентрические кольца	Среднее 2δ	Наружные радиусы слоев R	Обмеренные радиусы (средние) слоев r''	Внутренние радиусы слоев r	$-\frac{\delta}{r''}$
		в миллиметрах					
№ 6	1	+.1638	+.1549	R_6 273,75	r''_6 245,3210	r_6 240,0	—.000316
	2	+.1510					
	3	+.1364					
	4	+.1683					
№ 5	1	+.1203	+.0921	R_5 263,0	r''_5 210,8634	r_5 206,0	—.000223
	2	+.0731					
	3	+.0744					
	4	+.1007					
№ 4	1	+.0365	+.0308	R_4 201,75	r''_4 175,2207	r_4 171,25	—.000088
	2	+.0261					
	3	+.0224					
	4	+.0382					
№ 3	1	+.0197	+.0035	R_3 166,5	r''_3 140,3726	r_3 135,75	—.000013
	2	—.0037					
	3	—.0006					
	4	—.0014					
№ 2	1	—.0298	—.0278	R_2 132,5	r''_2 105,3114	r_2 100,75	+.000132
	2	—.0282					
	3	—.0138					
	4	—.0393					
№ 1	1	—.0352	—.0278	R_1 96,1	r''_1 70,3999	r_1 64,5	+.000199
	2	—.0160					
	3	—.0337					
	4	—.0263					

Таблица 14. Опыт 65

(продолжение)

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения по снятии слоя № 6	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
			Кольцо № 6 срезано				
№ 5	1	+.0103					
	2	—.0276	—.0092	R_5 236,6	r''_5 210,8634		+.000022
	3	—.0026					
	4	—.0169					
№ 4	1	+.0003					
	2	—.0076	—.0042	—	r''_4 175,2207		+.000012
	3	—.0050					
	4	—.0047					
№ 3	1	+.0122					
	2	—.0107	—.0072	—	r''_3 140,3726		+.000025
	3	—.0166					
	4	—.0138					
№ 2	1	+.0065					
	2	—.0169	—.0028	—	r''_2 105,3114		+.00 013
	3	+.0078					
	4	—.0075					
№ 1	1	—.0177					
	2	—.0039	—.0111	—	r''_1 70,3999	r_0 64,5	+.000080
	3	—.0140					
	4	—.0088					

Таблица 14. Опыт № 65

(продолжение)

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения по снятии 2-х наружных слоев	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
		Кольца 5 и 6 срезаны					
№ 4	1	—.0303	—.0167	R_4 201,75	r''_4 175,2207		+.000048
	2	—.0156					
	3	—.0181					
	4	—.0028					
№ 3	1	—.0109	—.0160	—	r''_3 140,3726		+.000057
	2	—.0167					
	3	—.0210					
	4	—.0151					
№ 2	1	—.0216	—.0126	—	r''_2 105,3114		+.000054
	2	—.0142					
	3	—.0069					
	4	—.0077					
№ 1	1	—.0167	—.0158	—	r''_1 70,3999	r_0 64,5	+.000112
	2	—.0152					
	3	—.0193					
	4	—.0120					

Таблица 14. Опыт № 65
(продолжение)

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения по снятии 3-х наружных слоев	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
		Кольца 4, 5 и 6 срезаны					
№ 3	1	—.0168	—.0252	R_3 166,5	r''_3 140,3726		+.000090
	2	—.0291					
	3	—.0291					
	4	—.0256					
№ 2	1	—.0211	—.0219		r''_2 105,3114		+.000105
	2	—.0276					
	3	—.0182					
	4	—.0205					
№ 1	1	—.0341	—.0303		r''_1 70,3999	r_0 64,5	+.000217
	2	—.0241					
	3	—.0374					
	4	—.0157					
Обозначения слоев	**Обозначения диаметров**	**Изменения по снятии 4-х наружных слоев**	**Среднее 2δ**	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
		Кольца 3, 4, 5 и 6 срезаны					
№ 2	1	—.0146	—.0188	R_2 132,5	r''_2 105,3114		+.000090
	2	—.0248					
	3	—.0116					
	4	—.0240					
№ 1	1	—.0281	—.0248		r''_1 70,3999	r_0 64,5	+.000177
	2	—.0189					
	3	—.0305					
	4	—.0218					

Таблица 14. Опыт № 65

(продолжение)

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения измеренных радиусов	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
После стачивания колец, на которые был разрезан диск							
№ 6	1	+.1668	+.1369	R'_6 251,75	r''_6 245,3210	r_6 240,0	—.000285
	2	+.1207					
	3	+.1150					
	4	+.1451					
№ 5	1	+.0895	+.1645	R'_5 217,1	r''_5 210,8634	r_5 206,0	—.000153
	2	+.0692					
	3	+.0298					
	4	+.0696					
№ 4	1	+.0251	+.0215	R'_4 181,75	r''_4 175,2207	r_4 171,25	—.000063
	2	+.0244					
	3	+.0274					
	4	+.0092					
№ 3	1	+.0305	+.0007	R'_3 146,25	r''_3 140,7736	r_3 135,75	—.000002
	2	+.0015					
	3	—.0223					
	4	—.0077					
№ 2	1	—.0405	—.0311	R'_2 111,3	r''_2 105,3114	r_2 100,75	+.000155
	2	—.0344					
	3	—.0230					
	4	—.0264					
№ 1	1	—.0213	—.0148	R'_1 76,5	r''_1 70,3999	r_1 64,5	+.000105
	2	—.0150					
	3	—.0125					
	4	—.0103					

Таблица 14. Опыт № 65
(продолжение)

Обозначения слоев	Испытания стали		
	Предел упругости в атм.	Сопротивление разрыву в атм.	Удлинение при разрыве в проц.
		По хорде	
№ 6	3850	7030	15,0
		Параллельно оси орудия	
	4055	7134	16,5
		По хорде	
№ 5	2750	6320	13,0
		Параллельно оси орудия	
	2800	6030	11,0
		По хорде	
№ 4	2450	5832	15,0
		Параллельно оси орудия	
	2340	5700	19,7
		По хорде	
№ 3	2400	5752	19,0
		Параллельно оси орудия	
	2110	5170	20,5
		По хорде	
№ 2	2470	5600	18,5
		Параллельно оси орудия	
	2200	5412	17,0
		По хорде	
№ 1	2663	5336	20,0
		Параллельно оси орудия	
	2800	5280	19,0

Таблица 18. Опыт № 32

Исследование внутренних напряжений в диске, отрезанном от литой стальной некованной болванки, отпрессованной в расплавленном состоянии

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения после разрезки диска на концентрические слои в *мм*	Среднее 2δ в *мм*	Наружные радиусы R в *мм*	Обмеренные радиусы r'' в *мм*	Внутренние радиусы r в *мм*	$-\frac{\delta}{r''}$ в *мм*	Испытания стали: Предел упругости в атм.	Испытания стали: Сопротивление разрыву в атм.	Испытания стали: Относительное удлинение при разрыве в проц.
№ 6	1	+.0105	+.0080	R_6 190,85	r''_6 177,9040	r_6 166,0	—.000022	2900	5400	4,2
	2	+.0048								
	3	+.0058								
	4	+.0110								
№ 5	1	+.0057	+.0055	R_5 161,0	r''_5 150,4800	r_5 139,25	—.000018	2800	4600	3,6
	2	+.0064								
	3	+.0054								
	4	+.0056								
№ 4	1	—.0142	—.0078	R_4 121,25	r''_4 124,3541	r_4 113,5	+.000031	2800	3600	1,6
	2	—.0098								
	3	—.0095								
	4	+.0023								

Таблица 18. Опыт № 32
(продолжение)

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Изменения после разрезки диска на концентрические слои в *мм*	Среднее 2δ в *мм*	Наружные радиусы R в *мм*	Обмеренные радиусы r'' в *мм*	Внутренние радиусы r в *мм*	$-\frac{\delta}{r''}$ в *мм*	Испытания стали: Предел упругости в атм.	Испытания стали: Сопротивление разрыву в атм.	Испытания стали: Относительное удлинение при разрыве в проц.
№ 3	1	—.0105	—.0102	R_3 108,75	r''_3 98,5021	r_3 88,0	+.000050			
	2	—.0168								
	3	—.0144								
	4	—.0001								
№ 2	1	—.0087	—.0069	R_2 83,5	r''_2 77,3507	r_2 62,25	+.000063			
	2	—.0078								
	3	—.0063								
	4	—.0047								
№ 1	1	—.0040	—.0107	R_1 57,75	r''_1 46,8326	r_1 33,75	+.000113			
	2	—.0220								
	3	—.0095								
	4	—.0074								

Примечание. Образцы для испытаний были взяты из центральной части стержня, вынутого из литой прессованной болванки. № 6 относится к верхней части стержня; № 5 взят ниже него на 12 дюйм. и № 4 — на 24 дюйма. Диаметр стержня был 3,5 дюйма. Вес болванки 440 пуд.

В исследованном диске был высверлен канал диаметром 67,5 *мм*. От такого высверливания диск расширился, но величина расширения очень мала и не выходит из пределов погрешности наблюдений.

Таблица 19.

Исследование внутренних напряжений в диске *H*, взятом от 6-дюйм. ствола развития в металле напряжений полезных. Опыт произведен с по

(с 20 марта по 13

Первоначальные обмеры				
Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Непосредственное измерение диаметров	Температура в °	Вычисленные при 15° Ц
№ 6	1	384,9749 384,9730	17,85 17,90	384,9849
	2	384,8705	18,0	384,8820
	3	385,5214	18,2	385,5337
	4	386,6465	19,25	386,6628
№ 5	1	338,8895 338,8876	18,2 18,3	338,9006
	2	339,7955 339,7907	17,8 17,9	339,8028
	3	339,3039	18,25	339,3149
	4	339,7913	19,2	339,8056
№ 4	1	293,1422 293,1430	18,5 18,6	293,1530
	2	292,8330 292,8299	17,65 17,7	292,8594
	3	292,9451	18,4	292,9551
	4	294,2416	19,15	294,2538
№ 3	1	246,4620 246,4580	18,9 19,0	246,4698
	2	247,5341 247,5326	17,5	247,5327
	3	247,4392	18,6	247,4481
	4	248,3223	19,1	248,3325
№ 2	1	200,2173 200,2157	19,1 19,2	200,2248
	2	201,8590	17,4	201,8638
	3	202,3408	18,8	202,3485
	4	202,3761	19,15	202,3843
№ 1	1	155,9769	19,6	155,9841
	2	156,7961 156,7957	17,5	156,7994
	3	158,0000	18,85	158,0060
	4	157,3183	19,0	157,3246

Опыт № 79

№ 1581, подвергнутом после закалки в масле специальному отжигу для следовательным вырезыванием колец с внутренней стороны диска

апреля 1885 года)

Кольцо № 1 отделено от остальной части диска								
Непосредственное измерение диаметров	Температура в °	Вычисленные при 15° Ц	Происшедшее изменение	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
384,9399	19,25	384,9562	—.0287		R_6	r''_6		
384,8341	19,4	384,8510	—.0310	—.0351	204,0	192,7579		+.000096
385,4662	20,4	385,4870	—.0467					
386,6281	15,2	386,6289	—.0339					
338,8386	19,1	338,8525	—.0481			r''_5		
339,7445	19,5	339,7598	—.0430	—.0455		169,7279		+.000133
339,2521	20,4	339,2704	—.0445					
339,7580	15,4	339,7594	—.0462					
293,0944	19,0	293,1061	—.0469			r''_4		
292,7721	19,25	292,7857	—.0537	—.0500		146,6501		+.000170
292,8872	20,3	292,2027	—.0524					
294,2052	15,6	294,2070	—.0468					
246,4135	18,05	246,4215	—.0483			r''_3		
247,4847	19,75	247,4952	—.0445	—.0482		123,7238		+.000194
247,3862	20,2	247,3990	—.0491					
248,2794	15,9	248,2876	—.0509					
200,1545	18,6							
200,1568	18,7	200,1630	—.0618			r''_2	r_2	
201,8112	19,85	201,8210	—.0428	—.0462		100,8527	90,125	+.000227
202,2915	20,0	202,3017	—.0468					
202,3488	16,1	202,3510	—.0333					
156,1360	17,6							
156,1428	18,2	156,1439	+.1598		R_1	r'_1	r_0	
156,9230	17,65	156,9271	+.1277	+.1275	86,76	78,5142	64,0	—.000812
158,1137	17,8	158,1183	+.1123					
157,4301	18,0	157,4348	+.1102	Вырезанное кольцо				

Таблица 19.

(продол

Кольцо № 2 отделено от диска										
Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Непосредственное измерение диаметров	Температура в°	Вычисленные при 15° Ц	Происшедшее изменение	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
№ 6	1	384,8904	18,2	384,9023	—.0826					
	2	384,7940	18,3	384,8067	—.0752	—.075?	R_6 204	r''_6 192,7597		+.000192
	3	385,4452	18,8	385,4598	—.0739					
	4	386,5838	18,9	386,5988	—.0640					
№ 5	1	338,7927	18,1	338,8032	—.0974					
	2	339,6986	18,4	339,7102	—.0936	—.0838		r''_5 169,7279		+.000247
	3	339,2285	18,75	339,2412	—.0737					
	4	339,7209	18,95	339,7343	—.0713					
№ 4	1	293,0530	17,95	293,0616	—.0914					
	2	292,7399	18,5	292,7502	—.0892	—.087?		r''_4 146,651		+.000296
	3	292,8600	18,7	292,8708	—.0843					
	4	294,1581	19,0	294,1699	—.0839					
№ 3	1	246,3601	17,85	246,3671	—.1027					
	2	247,4184	18,5	247,4270	—.1127	—.097?		r''_3 123,7238	r_3 112,5	+.000384
	3	247,3540	18,6	247,2629	—.0852					
	4	238,2332	19,05	248,2432	—.0893					
№ 2	1	200,2795	17,1	200,2837	+.0589					
	2	201,9253	17,3	201,9299	+.0661	+.0574	R_2 109,0	r''_2 100,8527	r_2 90,125	—.000284
	3	202,3879	17,45	202,3929	+.0444					
	4	202,4386	17,6	202,4436	+.0593		Вырезанное кольцо			

Опыт № 79

жение)

Кольцо № 3 отделено от диска								
Непосредственное измерение диаметров	Температура t	Вычисленные при 15° Ц	Происшедшее изменение	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
384,8413	18,0	384,8528	—.1321					
384,7502	18,3	384,7629	—.1191	—.1128	R_6 204	r''_6 192,7579		+.000247
385,4025	19,05	385,4181	—.1156					
386,5623	19,15	386,5783	—.0845					
338,7530	17,8	338,7625	—.1381					
339,6651	18,5	339,6770	—.1258	—.1232		r''_5 169,7279		+.000363
339,1776	18,7	339,1907	—.1242					
339,6865	19,3	339,7011	—.1045					
292,9953	17,7	293,0032	—.1498					
292,6864	18,6	292,6969	—.1425	—.1340		r''_4 146,6501	r_4 136,5	+.000460
292,8087	18,7	292,8195	—.1356					
294,1308	19,45	294,1438	—.1160					
246,4106	16,9	246,4153	—.0545					
247,5232	17,1	247,5284	—.0113	—.0238	R_8 133,0	r''_3 123,7238 Вырезанное кольцо	r_3 112,5	+.000096
247,4300	17,2	247,4354	—.0127					
248,3101	17,3	248,3158	—.0167					

Таблица 19. Опыт № 79

(продолжение)

Обозначения слоев	Обозначения диаметров	Непосредственное измерение диаметров	Температура в °	Вычисленные при 15° Ц	Происшедшее изменение	Среднее 2δ	R	r''	r	$-\frac{\delta}{r''}$
Кольцо 4 отделено от диска										
№ 6	1	384,8215	18,1	384,8334	—.1515	—.1610	R_6 204,0	r''_6 192,7579		+.000407
	2	384,6665	18,2	384,6788	—.2032					
	3	385,3291	18,55	385,3421	—.1916					
	4	386,5510	18,6	386,5648	—.0980					
№ 5	1	338,7324	18,0	338,7424	—.1582	—.1695		r''_5 169,7279	r_5 159,5	+.000500
	2	339,5770	18,3	339,5892	—.2136					
	3	339,0982	18,4	339,1097	—.2052					
	4	339,6918	18,75	339,7045	—.1011					
№ 4	1	293,0869	17,25	293,0935	—.0595	—.0653	R_4 155,75	r''_4 146,6501	r_4 136,5	+.000223
	2	292,7880	17,4	292,7950	—.0140					
	3	292,8703	17,7	292,8782	—.0769					
	4	294,1648	17,8	294,1730	—.0808					
Вырезанное кольцо (продолжение)										
Кольца № 6 и 5 отделены одно от другого										
№ 6	1	384,8060	19,8	384,8245	—.1604	—.1898	R_6 204	r''_6 192,7579	r_6 182	+.000439
	2	384,6053	19,75	384,6236	—.2584					
	3	385,2567	19,75	385,2750	—.2587					
	4	386,5630	19,75	386,5813	—.0817					
№ 5	1	338,7196	19,75	338,7355	—.1651	—.1289	R_5 178,0	r''_5 169,7279	r_5 159,5	+.000379
	2	339,6529	19,8	339,6692	—.1336					
	3	339,2056	19,8	339,2219	—.0930					
	4	339,6656	19,8	339,6819	—.1237					

Таблица 19. Опыт № 79

(продолжение)

Испытания стали

Образцы взяты параллельно оси орудия			
Обозначение слоев	Предел упругости в атм.	Сопротивление разрыву в атм.	Удлинение при разрыве в проц.
№ 6	3000 [1]	6400	7,0
	2700 [2]	6840	14,5
№ 5	2982	6980	11,8
	2800 [1]	5300	3,0 [3]
№ 4	2500	6370	6,0
№ 2	2930	5870	7,8
№ 1	3300 [1]	6000	8,1
	2800	6030	

[1] Образцы были испытаны на прессе системы Каркальди, а остальные — на обыкновенном рычажном прессе, и предел упругости в них определен с измерением удлинений катетометрами.

[2] В плоскости разрыва бруска был порок.

[3] В плоскости разрыва бруска была раковина.

ПРИМЕЧАНИЯ РЕДАКЦИИ К СТАТЬЕ Н. В. КАЛАКУЦКОГО „ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЧУГУНЕ И СТАЛИ“

1. Книга Н. В. Калакуцкого „Исследования внутренних напряжений в чугуне и стали“ впервые была напечатана в С.-Петербурге в 1887 г. в типо-литографии А. М. Вольфа. Второе издание вышло в С.-Петербурге в 1888 г. с пометкой: „печатано по распоряжению Горного ученого комитета“. Переводы книги Н. В. Калакуцкого в том же году были изданы во Франции и в Англии. На французском языке работа Калакуцкого была помещена в журнале „Revue d'Artillerie“, январь — февраль 1888 г. Английский перевод был сделан журналом „Engineer“ № 1667—1694 1887/88 г. В Америке работа Калакуцкого была напечатана в виде большого обзора в журнале „Scientific American Supplement“ № 633, февраль 1888 г. Кроме того, в периодической печати русской и заграничной появились статьи, посвященные работе Н. В. Калакуцкого, например, подробная статья напечатана в 1888 г. в журнале „Engineering“, в журнале „Инженер“ № 12, 1888 г. и др.

В данном издании текст воспроизведен полностью. В приложении даны все графики с результатами расчетов Н. В. Калакуцкого. Кроме того, приведены некоторые таблицы с записью деформаций диаметров при вырезке колец из дисков от различных изделий. Часть таблиц, имевшихся в первых двух изданиях, для сокращения объема настоящей книги выпущена (см. ниже прим. [7]).

2. Сохраняя прежние обозначения, правильнее было бы написать:

$$P_0 = U\frac{R - r_0}{r_0}. \tag{1}$$

3. В подлиннике вместо t'_x в этой формуле обозначено t_x, что не согласуется с дальнейшим текстом.

4. $t_0 = -T$ потому, что наибольшие сжимающие внутренние напряжения по Калакуцкому не должны превосходить предел упругости.

Наиболее выгодный случай, когда

$$T = -t_0 = U.$$

5. Из

$$\frac{r_0^2 + R^2}{r_0(R + r_0)} = 2$$

получаем

$$r_0^2 + R^2 - 2Rr_0 = 2r_0^2,$$

откуда

$$\frac{R - r_0}{r_0} = \sqrt{2}.$$

что дает после подстановки в формулу (1)

$$P_0 = T\sqrt{2} = 1{,}41\,T.$$

6. Т. е. 30 *кг/мм*².

7. К тексту приложены подробные таблицы № 14 (опыт № 65) и 19 (опыт № 79), из которых видна методика, примененная Н. В. Калакуцким. Остальные таблицы построены так же, как эти, и в данном издании не помещены за исключением табл. 9—12 и 18, в которых автором даны результаты, не обработанные графически. Выпущенные таблицы содержат только цифровые данные об изменении диаметров после вырезки колец. В таблицах нет величин напряжений. Поэтому эти таблицы не облегчают чтения текста. Гораздо более интересные данные помещены в виде графиков (см. чертежи 2, 3 и 5), где даны эпюры остаточных радиальных напряжений (давлений) и относительные изменения диаметров колец после вырезки их из дисков.

8. Эта формула дает радиальные перемещения точки в пустотелом цилиндре с донышками под влиянием наружного и внутреннего давления. При расчете радиальных и тангенциальных напряжений в диске правильнее пользоваться формулой

$$\delta = (1-\mu)\frac{r_x}{\Sigma}\,\frac{P_0 r_0^2 - P'R^2}{R^2 - r_0^2} + (1+\mu)\frac{r_0^2 R^2 (P_0 - P')}{r_x \Sigma (R^2 - r_0^2)},$$

где μ — коэфициент Пуассона, а все остальные обозначения такие же, как приняты у Н. В. Калакуцкого (см. Тимошенко С. П., Сопротивление материалов, т. II, ОГИЗ, 1946, стр. 220).

9. Изменения радиусов на диаграммах выражены условно в давлениях (напряжениях), которые соответствуют упругим деформациям, полученным при вырезании кольца из диска. Масштаб на диаграммах изменен в $^2/_3$.

10. В подлиннике вместо

$$t_0 = p\,\frac{2r - r_0}{r - r_0} \quad \text{или} \quad t_0 = p\left(1 + \frac{r}{r - r_0}\right)$$

напечатано

$$t_0 = p\,\frac{2r_0 - r_0}{r - r_0} \quad \text{или} \quad p\,\frac{r_0}{r - r_0}$$

11. Точка равна $^1/_{100}$ части дюйма.

12. Автор не приводит эпюры напряжений для колец, подвергнутых отжигу с медленным охлаждением, так как эти напряжения очень незначительны.

13. Термин „отжигание в масле" применялся для обозначения термической обработки, состоявшей из нагрева изделия выше точки *b* Чернова и последующего ускоренного охлаждения в критическом интервале, что создавалось погружением ствола в масло на 2—3 мин., причем температура изделия падала до „красно-бурого каления", т. е. 600—650°. После этого давалось медленное охлаждение (см. Чернов Д. К., Сталелитейное дело, 1898).

14. В данном издании даны подробные таблицы № 14 и 19. Все остальные результаты приводятся в виде диаграмм (черт. 3, фиг. 4—10).

15. Автор не дает указаний, в чем заключался примененный им особый отжиг для изменения вредных напряжений в полезные. Во всяком случае опыты № 79 и 81 (черт. 3, фиг. 9 и 10) показывают распределение напряжений, противоположное по характеру опытам 61, 65, 70, 71 и 76 (см. черт. 3, фиг. 4—8).

Из табл. Б видно, что предел упругости в наружных слоях получился в опыте № 79 заметно меньше, чем в остальных опытах. Поэтому опыт № 79, возможно, производился с более высоким или продолжительным отпуском, чем в опытах № 76, 65 и др. Это могло вызвать перераспределение напряжений, так как предварительное охлаждение в масле углеродистой стали давало только частичную закалку поверхностного слоя, и отпуск вызывал уменьшение объема этого слоя, что могло сказаться на изменении напряжений.

Вероятно также, что автор в опытах № 79 и 81 применял более резкое охлаждение канала ствола после отпуска.

АЛЬФОНС АЛЕКСАНДРОВИЧ РЖЕШОТАРСКИЙ

Альфонс Александрович Ржешотарский (1847—1904 гг.).

А. А. РЖЕШОТАРСКИЙ (1847—1904)

Создание металлографии как науки обязано великим русским ученым — Павлу Петровичу Аносову и Дмитрию Константиновичу Чернову. Дальнейшее развитие этой науки и внедрение ее в практические заводские условия в конце XIX в. тесно связано с именем выдающегося русского ученого — инженера Альфонса Александровича Ржешотарского.

А. А. Ржешотарский родился в г. Радоме 22 октября 1847 г. Там протекали его детские и юношеские годы. В 1867 г. он окончил классическую радомскую гимназию и в том же году поступил на физико-математический факультет Варшавской главной школы, преобразованной в 1870 г. в Варшавский университет. Альфонс Александрович с 3-го курса университета перешел на механическое отделение Петербургского технологического института (ныне Технологический институт им. Ленинградского совета), являвшегося крупнейшей школой по подготовке широко образованных инженеров-машиностроителей. Созданию этой школы в значительной степени способствовал выдающийся русский ученый, один из виднейших организаторов высшего технического образования в России, Иван Алексеевич Вышнеградский. Во время обучения в Технологическом институте А. А. Ржешотарский заинтересовался металлургией и решил по окончании института специализироваться именно в этой области. И действительно, по окончании полного курса Петербургского технологического института в 1875 г. молодой инженер, по личной рекомендации директора института Ивана Алексеевича Вышнеградского, поступил на Путиловский завод для работы в области металлургии.

Начало практической деятельности А. А. Ржешотарского и ее дальнейший расцвет совпали с периодом быстрого развития промышленного капитализма в России после отмены крепостного права. Как указано в „Кратком курсе истории ВКП(б)“, „За 25 лет, с 1865 по 1890 год, количество рабочих на одних только крупных фабриках, заводах и железных дорогах увеличилось с 706 т. до 1.433 тысяч, то-есть более чем вдвое.

Еще быстрее стала развиваться капиталистическая крупная промышленность в России в 90-х годах. К концу 90-х годов количество

рабочих на крупных фабриках и заводах, в горной промышленности, на железных дорогах только по 50 губерниям Европейской России выросло до 2.207 тысяч, а по всей России — до 2.792 тысяч“ [1].

Этот период особенно характеризовался интенсивным строительством железных дорог, широким развитием судостроения, что привело к развитию металлургии и топливной промышленности.

В то время, как правильно указывает А. А. Байков, „металлургическая промышленность переживала крупный переворот. Взамен прежних способов изготовления сварочного металла появились новые способы — бессемеровский и мартеновский, которые дали возможность широкому распространению литому металлу“ [2].

Однако значительному увеличению производства литой стали препятствовали как неизученность ее свойств, так и сложности металлургических процессов. „Эти обстоятельства заставили обратиться к тщательному изучению процессов приготовления литой стали, изучению чисто научного характера, так как благодаря новизне дела эмпирические и чисто практические правила не успели еще выработаться“ [3].

Желая изучить металлургию начиная с самых первых операций, при которых рождается металл, Альфонс Александрович начал свою практическую деятельность на заводе в качестве рабочего на мартеновской печи. Производственная работа А. А. Ржешотарского, несмотря на все ее трудности, имела большое значение, так как, во-первых, давала ему необходимые практические навыки в области изготовления литого металла самым новым в то время методом, а во-вторых, на основании полученных навыков можно было в дальнейшем обратиться к научному изучению мартеновского процесса. И действительно, на этой основе А. А. Ржешотарскому в дальнейшем удалось провести ряд ценных работ в области металлургии.

В то время в России только еще начинала развиваться плавка стали в отражательных печах, хотя научные основы этого процесса уже содержались в работах Павла Петровича Аносова (1837 г.). К тому времени было построено лишь несколько отражательных печей, и среди них была 5-тонная печь Путиловского завода. Эта печь была построена А. А. Износковым в 1872—1873 гг., т. е. через 3 года после пуска им первой печи в России на Сормовском заводе в Нижнем Новгороде, и на ней начал работать А. А. Ржешотарский.

Через 6 мес. работы А. А. Ржешотарский был назначен заведующим мартеновской печью. Он не только продолжал изучать процесс плавки, но интересовался также и опытами по применению мартеновской стали, а также внимательно следил за строительством новой

---

[1] История Всесоюзной Коммунистической партии (большевиков). Краткий курс, Госполитиздат, 1945, стр. 6—7.

[2] Байков А. А., А. А. Ржешотарский, некролог, „Известия СПБ Политехнического института“ т. I, вып. 3—4, 1904, стр. III.

[3] Там же.

большой сталелитейной мастерской, мартеновские печи которой начали строить в 1874 г.

В 1876 г. А. А. Ржешотарский опубликовал свою первую научную статью о мартеновском процессе.

В сентябре 1876 г. он получил приглашение поступить на Обуховский сталелитейный завод (ныне завод „Большевик"). В то время Обуховский завод был центром производства русских стальных пушек, железнодорожных бандажей, осей и т. д. Здесь работал великий русский ученый Дмитрий Константинович Чернов, создавший основы металлургии и вообще науки о металлах и термической обработке, показавший всему миру силу русской науки и техники. Желание работать под руководством Д. К. Чернова и было причиной того, что Альфонс Александрович согласился перейти на Обуховский завод.

И в самом деле, какой русский инженер в то время не захотел бы работать вместе с Д. К. Черновым, являвшимся главой русской школы металлургов?

Металлургия Обуховского сталелитейного завода к моменту поступления на завод А. А. Ржешотарского характеризовалась производством только литой стали, в то время как на других заводах изготовлялась еще сварочная сталь. На Обуховском заводе существовало лишь производство тигельной стали по методу П. П. Аносова и П. М. Обухова, имевшей в то время основное значение для завода и применявшейся для изготовления орудийных стволов, а также производство бессемеровской и мартеновской стали. Производство бессемеровской стали на заводе было начато в 1872 г. с целью удовлетворения заказов на поставку различного рода металлических изделий для железнодорожного транспорта. Следует подчеркнуть, что это производство на заводе стало интенсивно развиваться благодаря работам Дмитрия Константиновича Чернова.

Д. К. Чернов установил „сущность бессемеровского процесса и, на основании наблюдения за его ходом, расчленил его на четыре периода, указав признаки начала и конца каждого из них... При своих исследованиях бессемеровского процесса Д. К. Чернов широко пользовался спектроскопическими наблюдениями и дал целый ряд важных указаний по этому вопросу... Д. К. Чернов не ограничивался только изучением бессемеровского процесса, но полученные результаты применял на практике для улучшения и усовершенствования производственных процессов" [1]. Он также разработал способ русского бессемерования для передела малокремнистых древесноугольных чугунов путем их предварительного нагрева в вагранке или отражательной печи. Кроме того, Д. К. Чернов добился такого повышения качества литой бессемеровской стали, что стало возможным применять ее для самого ответственного назначения.

Можно, таким образом, утверждать, что бессемеровский процесс обязан своим широким применением в промышленности теоретическим и практическим работам Д. К. Чернова.

---

[1] Байков А. А., Собрание трудов, т. II, 1948, стр. 252—253.

Введение мартеновского производства на Обуховском заводе началось с 1871 г. [1], когда на заводе была построена первая 5-тонная печь, которая с августа 1872 г. начала выдавать сталь, предназначавшуюся главным образом для изготовления бандажей, железнодорожных осей и т. д. Увеличение выпуска мартеновской стали началось лишь через 2 года после поступления А. А. Ржешотарского на Обуховский завод, т. е. в 1878 г., когда для удовлетворения потребностей Морского министерства в корабельном и котельном металле были построены две 10-тонные печи. Дальнейшее развитие мартеновского производства было осуществлено уже под руководством А. А. Ржешотарского значительно позже.

Поступив на Обуховский завод, А. А. Ржешотарский занял должность помощника заведующего бессемеровским цехом, которым руководил Дмитрий Константинович Чернов, бывший в то время также помощником начальника завода по металлургии. Сразу же по поступлении на завод А. А. Ржешотарский оказывается ближайшим сотрудником Д. К. Чернова и под его руководством очень скоро осваивает незнакомое ему бессемеровское производство. После оставления Д. К. Черновым бессемеровского цеха он становится заведующим этим цехом.

Спустя 2 года после начала работы в бессемеровском цехе, т. е. в 1878 г., А. А. Ржешотарский публикует вторую свою работу, посвященную бессемеровскому процессу [2]. Здесь А. А. Ржешотарский приводит теоретические основы процесса, а также отдельные практические указания в полном соответствии с данными Д. К. Чернова, учеником которого он являлся. Однако помимо изучения металлургических процессов А. А. Ржешотарского уже в то время интересуют и другие стороны производства. Это видно, например, из другой его работы, посвященной вопросу ломкости железа и стали в горячем состоянии, опубликованной также в 1878 г.

В 1880 г. А. А. Ржешотарский опубликовывает еще одну научную работу, представляющую собой обзор новейших методов исследования литой стали [3]. Уже одно перечисление работ, опубликованных А. А. Ржешотарским в тот период, показывает рост научных и практических знаний, приобретенных им за период работы под руководством Д. К. Чернова. К сожалению, совместная работа Д. К. Чернова и А. А. Ржешотарского оказалась непродолжительной, так как в 1880 г. Д. К. Чернову пришлось уйти с завода вследствие того, что начальник завода А. А. Колокольцев чинил ему препятствия в проведении ряда научных работ.

---

[1] Ржешотарский А. А., Заметка о мартеновском производстве на Обуховском сталепушечном заводе, „Сборник к 25-летию введения мартеновского производства в России", СПБ 1895, стр. 171.

[2] Ржешотарский А. А., Бессемерование и способ его ведения, „Przegląd techniczny", 1878, вып. 1, стр. 7—15, вып. 2, стр. 92—97.

[3] Ржешотарский А. А., Обзор новейших методов исследования литой стали. „Przegląd techniczny", 1880, т. 11 вып. 2/3, стр. 73—99, вып. 5, стр. 264—287, т. 12, вып. 7, стр. 11—30.

В последний год (1880) совместной работы А. А. Ржешотарский под руководством Д. К. Чернова ставит опыты по определению удельного веса жидкой беспузыристой бессемеровской стали. А. А. Ржешотарский по заключению Д. К. Чернова [1] получил цифры, довольно близкие к истинным. Так, например, средний удельный вес жидкой стали он определил в 7,07139 *г/см*³. А. А. Ржешотарский установил удельный вес путем измерения объема 14-пудовой изложницы и определения веса залитой в эту изложницу стали после ее затвердевания. Наряду с определением удельного веса А. А. Ржешотарский вычислил и объемную усадку стали, оказавшуюся равной 6,58%.

После ухода Д. К. Чернова к А. А. Ржешотарскому переходит значительная часть работы по руководству сложным металлургическим производством завода и ведение необходимых научных исследований.

Как указывает А. А. Байков, „две темы являются для него особенно излюбленными, ими он занимается всю жизнь и в развитии каждой из них он достигает крупных результатов. Темы эти — микроструктура стали и ее закалка“ [2]. Еще до начала работ А. А. Ржешотарского в области металлургии стали и ее обработки были сделаны два крупных открытия. Первое из этих открытий — это изучение структуры металла под микроскопом, сделанное великим русским ученым П. П. Аносовым. Эта работа П. П. Аносова и заложила основы той науки, которую мы называем металлографией. Использование микроскопа позволило обнаружить, что сталь имеет неоднородное строение. Эти исследования, выполненные на основе работ П. П. Аносова, также привели к дальнейшему увеличению внимания к данной области науки.

Значение и пользу металлографии для практических целей вслед за П. П. Аносовым и Д. К. Черновым прекрасно оценил выдающийся русский ученый А. А. Ржешотарский.

Другим важным открытием того времени было обнаружение Д. К. Черновым в 1869 г. критических точек стали, которые и дали ключ к объяснению закалки и всей термической обработки стали в целом.

„В то время, как А. А. начал свою практическую деятельность, — пишет А. А. Байков, — значение этих открытий было мало еще оценено и они почти не выходили за пределы кабинетных и лабораторных исследований. Нужно было обладать глубокой научной проницательностью, чтобы оценить по достоинству эти открытия, и А. А. был одним из первых, который это сделал и который всю свою научно-техническую деятельность повел в этом направлении“ [3].

---

[1] Лекции Д. К. Чернова в Михайловской артиллерийской академии, „Сталелитейное дело“, сборник „Д. К. Чернов и наука о металлах“ под ред. Г. З. Нессельштрауса, Металлургиздат, 1950, стр. 499.

[2] Байков А. А., А. А. Ржешотарский, некролог, „Известия СПБ Политехнического института“ т. I, вып. 3—4, 1904, стр. III.

[3] Там же, стр. II—III.

Естественно, что в понимании значения этих открытий А. А. Ржешотарским огромную роль сыграла его совместная деятельность с Д. К. Черновым и глубокое изучение идей Дмитрия Константиновича, которые рождались на основе заводской практики и в свою очередь непосредственно служили практическим заводским задачам.

Сталкиваясь многократно с вопросами закалки стали на заводе, А. А. Ржешотарский совершенно естественно в первую очередь обратился именно к изучению проблемы закалки. Результатом анализа многочисленных литературных данных и накопившихся собственных наблюдений А. А. Ржешотарского и явилась его статья „Различные теории относительно закалки стали“ [1]. Эта работа показывает широкую эрудицию А. А. Ржешотарского, а также характеризует его как ученика и последователя Д. К. Чернова.

Рассматривая многие теории закалки стали, А. А. Ржешотарский указывает: „Д. К. Чернов [2] своими очень интересными исследованиями над структурой стали бросает ясный свет на многие явления, встречающиеся во время закалки.

На основании долгих и тщательных опытов, он первый доказал, что простым нагревом и соответственным охлаждением мы можем придать куску стали желаемое сложение“... [3]

Показывая правильность взглядов Д. К. Чернова, А. А. Ржешотарский весьма последовательно разбивает взгляды многих иностранных ученых, не подкрепляющих своих „теорий“ практическими данными.

Так, например, А. А. Ржешотарский критикует взгляды шведского металлурга Оккермана: „... Таким образом, — пишет А. А. Ржешотарский, — Оккерман приняв раз за основание сильное стягивание и сжимание частиц во время быстрого охлаждения, старается подбором соответствующих доказательств объяснить все явления закалки. Если это предположение имеет место в действительности, тогда сталь после закалки должна представлять более плотную массу, т. е. удельный вес ее должен быть больше незакаленной стали. Многие же, однако, опыты наглядно убеждают нас в противоположном явлении“. И далее: „Оккерман утверждает, что чем тверже сталь и сильнее закалка, тем в большей степени совершается это сжатие. Опыты, однако, прямо показывают, что, наоборот, чем тверже сталь и чем энергичнее закалка, тем увеличение объема становится больше“ [4].

Приводя ряд данных по измерению удельных весов, А. А. Ржешотарский показывает, что удельный объем стали после закалки больше, чем в незакаленном состоянии. Таким образом, теория Оккермана потерпела полный разгром.

В этой же работе интересна и следующая мысль А. А. Ржешотарского: „Чем толще брусок, тем в меньшей степени он принимает

---

[1] „Морской сборник“ № 9, 1881, стр. 31 — 50.
[2] „Записки Русского технического общества“, вып. 7, 1868.
[3] „Морской сборник“ № 9, 1881, стр. 34.
[4] Там же, стр. 40.

закалку, и вследствие этого, в меньшей степени увеличивает свой объем. После отпускания брусок уменьшает свой объем так, что отпущенный до бурого каления, принимает снова тот размер, который имел в сыром состоянии“ [1].

Здесь А. А. Ржешотарский высказывает свои совершенно обоснованные взгляды о влиянии массы изделия на прокаливаемость стали и совершенно правильно оценивает характер изменения объема стали при отпуске.

Интересно высказывание Альфонса Александровича относительно структуры закаленной стали. Так, он, говоря о состоянии железа, указывает, что закалка „. . . придает этому последнему (железу — *ред.*) ненормальные свойства, которые увеличиваются еще больше вследствие насильственного удержания углерода в тесном соединении с железом. Из этого прямо следует, что чем меньше углерода в железе, тем влияние закалки на данный кусок стали будет меньше и, наоборот, с увеличением углерода в стали влияние закалки должно быть все больше и больше“.

И далее: „. . . чем быстрее закален кусок, т. е. чем более насильно задержано ненормальное состояние тела, тем, разумеется, частицы должны находиться в более напряженном состоянии“ [2].

По существу в этих словах А. А. Ржешотарского даны основы строения и свойств закаленной стали. Ведь и сейчас мы по существу считаем, что свойства закаленной стали являются результатом „насильственного удержания углерода в тесном соединении с железом“ и что эффект закалки зависит от содержания углерода. Все эти, равно как и многие другие, его высказывания показывают, что уже через 6 лет после окончания института, он был весьма образованным и талантливым инженером, располагающим определенным опытом, стоящим высоко по своим научным идеям.

Исследуя ряд основных вопросов теории закалки, А. А. Ржешотарский одновременно работал над решением важных производственных задач, связанных с условиями закалки стальных орудий, что являлось логическим продолжением его теоретических работ.

Так, в 1884 г. Морское артиллерийское ведомство потребовало от Обуховского завода изготовить пушки новой конструкции для перевооружения артиллерии. Для этого надо было провести работу по подбору состава стали и методов ее обработки. Это задание было поручено А. А. Ржешотарскому. Основываясь на работах Д. К. Чернова, по существу создавшего русскую стальную пушку, А. А. Ржешотарский провел многочисленные опыты и предложил новую марку стали и режим термической обработки, заключающийся в закалке стальных стволов в масло и отпуске. На основании результатов его работы на Обуховском заводе была построена новая отжигательная мастерская, руководство которой также было возложено на него.

---

[1] „Морской сборник“ № 9, 1881, стр. 40.
[2] Там же, стр. 48.

В этот же период А. А. Ржешотарский, кроме того, занимался вопросами, связанными с развитием мартеновского производства на заводе. Необходимость развития этого производства на заводе вызывалась следующим: „Вследствие усиления нашего флота, потребовались для многих строящихся судов тяжеловесные валы. Чтобы не быть в зависимости от иностранных заводов, Обуховский завод выстроил в 1891 году две 30-ти тонные печи (с кислым подом) и, таким образом, оказалась возможность из двух печей вместе отливать болванки весом слишком в 3500 пудов“ [1].

Большая работа была проведена А. А. Ржешотарским также по налаживанию производства стальной брони для морских военных судов. К 90-м годам прошлого столетия на заводах, занимавшихся производством брони, и в частности, на Адмиралтейских ижорских заводах с 1885 г. изготовлялась лишь так называемая стале-железная броня путем приварки слоя твердой высокоуглеродистой стали (в жидком состоянии) к железной броне. Хотя прочность такой брони *и была выше железной, но все же была недостаточной*. Поэтому в 1892 г. Обуховскому заводу было поручено изготовить целиком стальную броню.

Как указывает А. А. Ржешотарский, „Благодаря такой величине печей (см. выше — *ред.*) и отличным качествам стали, в 1892 г. завод попробовал изготовить стальные броневые плиты, которые по своим испытаниям не уступали самым лучшим заграничным плитам“ [2].

Производство стальной брони на Обуховском заводе с начала до конца было создано А. А. Ржешотарским. Им был выбран и состав соответствующей стали, а также разработан режим термической обработки брони. Альфонс Александрович предложил оригинальный метод закалки броней опрыскиванием, который после его работ получил в России широкое применение.

Очень существенно и то обстоятельство, что А. А. Ржешотарский поставил производство брони на научной основе, что вообще характерно для всей его производственной деятельности. Так, он ввел применение пирометра и микроскопа, которые благодаря его настойчивости стали обычными приборами для наблюдения и регулирования заводских процессов. Вследствие этого, как указывает А. А. Байков, технический уровень производства стальных орудий и брони в России превзошел уровень западноевропейских заводов.

Однако А. А. Ржешотарский не ограничился созданием брони из углеродистой стали и предпринял целый ряд опытов по разработке новых марок стали для того же назначения, но обладающих высокой прочностью при достаточно высокой вязкости.

Для решения этой задачи он занялся изучением легированной стали, с тем чтобы найти состав стали с необходимыми свойствами. Однако это оказалось очень трудной задачей, так как теория леги-

---

[1] Ржешотарский А. А., Заметка о мартеновском производстве на Обуховском сталепушечном заводе, „Сборник к 25-летию введения мартеновского производства в России“, СПБ 1895. стр. 171.

[2] Там же.

рованных сталей, так же как и их производство, была слабо развита, хотя основы металлургии этих сталей уже были даны в трудах П. П. Аносова и Д. К. Чернова.

Вследствие того, что вопрос о влиянии химических элементов на сталь нельзя было считать решенным, А. А. Ржешотарский провел целый ряд исследований в этой области. Интересно заметить, что, рассматривая действие легирующих элементов, Альфонс Александрович уделял очень большое внимание влиянию углерода, так как „...более важным и самостоятельным влиянием на свойства стали отличается углерод. Он сообщает стали способность приобретать большую твердость и упругость помощью закалки и отпуска. Другие примеси могут только усиливать или уменьшать эту способность, но при отсутствии углерода никакая другая примесь не может оказать подобного влияния на сталь“ [1].

Из различных легирующих элементов А. А. Ржешотарский особенно подробно изучал влияние никеля. Так, он указывает, что „прибавка никеля к железу увеличивает предел упругости и сопротивление разрыву, не уменьшая его вязкости“ [2]. „При небольшом содержании углерода в стали он (никель — *ред.*) увеличивает вязкость металла, а после закалки повышается ее упругость, с увеличением же углерода вязкость значительно понижается“ [3]. И далее: „вообще самые лучшие результаты получаются при содержании Ni от 2—4%“ [4]. Эти особенности свойств никелевой стали и явились основанием к созданию никелевой или так называемой сталеникелевой брони [5].

В результате напряженной работы под руководством А. А. Ржешотарского в 1893 г. создается 10-дюймовая броня из никелевой стали для морских военных судов, которая прекрасно выдержала испытания на Охтенском морском полигоне. С этого времени броня из никелевой стали становится одним из важнейших видов продукции Обуховского завода. Для производства этой брони создается специальная термическая мастерская, в которой осуществляются цементация и закалка броневых плит. Технологический процесс термической обработки этих плит был разработан А. А. Ржешотарским, и вся работа термической мастерской шла под его руководством. Эта деятельность А. А. Ржешотарского по созданию производства брони из никелевой стали имела очень важное значение. А. А. Ржешотарскому была присуждена Морским министерством золотая медаль

А. А. Ржешотарский, однако, не ограничился исследованием только никелевой стали, но изучал влияние и других элементов. Так, например, в статье „Литая сталь“ следующим образом описывается роль марганца: „Он (марганец — *ред.*) увеличивает больше сопроти-

---

[1] Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона, т. 17, 1896, стр. 745.

[2] Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона, т. 21, 1897, стр. 96—98, статья „Никель“.

[3] Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона, т. 17, 1896, стр. 765, статья „Литая сталь“.

[4] Там же, стр. 785.

[5] Подробные исследования никелевой стали, выполненные А. А. Ржешотарским, приведены на стр. 265 настоящей книги (*прим. ред.*).

вление упругости, чем сопротивление разрыву. В малоуглеродистой стали марганец увеличивает вязкость, но при значительном содержании он придает стали хрупкость и уменьшает удлинение. Содержание марганца в мягких сортах допускается от 0,5—0,8%; в средних от 0,4 до 0,6 в твердых — не выше 0,3%." „Кремний, — указывает далее А. А. Ржешотарский, — при небольшом же содержании оказывает даже благоприятное влияние на качество литой стали, увеличивая ее прочность без заметного уменьшения вязкости металла. С возрастанием содержания углерода влияние кремния усиливается, сталь делается хрупче и ее ковкость при высокой температуре уменьшается"[1]. И далее: „хром и вольфрам прибавляются для приготовления специальных сортов стали; они придают стали большую твердость, особенно в присутствии углерода"[2].

Начиная с 90-х годов прошлого столетия, А. А. Ржешотарский особенно усиленно занимается изучением микроструктуры стали. „Уже в начале своей деятельности он понимал значение этого вопроса, и в одной из его первых статей приведены рисунки микроструктуры чугунов, выполненные им от руки, карандашом. Эти рисунки, выполнение которых требовало, по его словам, усидчивой двухмесячной работы, настолько хороши, что их почти невозможно отличить от микрофотографий, сделанных чуть ли не 20 лет спустя. Когда методы для изучения микроструктур усовершенствовались и когда к этой цели была применена фотография, металлография начала быстро развиваться. Ржешотарский был одним из пионеров в этой области"[3]. По его инициативе в 1895 г. на Обуховском заводе создается первая в России металлографическая лаборатория, сыгравшая огромную роль в области введения микроскопических методов исследования на русских заводах. Руководя этой лабораторией, А. А. Ржешотарский не ограничивался только выполнением различных текущих контрольных испытаний, но вел в ней и научные исследования. Уже в 1896 г. он опубликовал работу „Микроструктура стали", которая явилась подготовительной к созданию капитального труда в этой области, вышедшего двумя годами позднее. В статье „Микроструктура стали" А. А. Ржешотарский указывает: „Всякий металл (простое тело или металлический сплав) механически не представляет собой вполне однородного тела. Структура твердого тела зависит от условий его образования . . . Главным фактором в этом отношении оказываются: условия, при которых застывало тело, температура нагрева, способ охлаждения и, наконец, механическая обработка. Для исследования данного металла недостаточно знать его химический состав и результаты механических испытаний, но необходимо еще изучить его частичное сложение"[4].

---

[1] Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона, т. 17, 1896, стр. 764, статья „Литая сталь".

[2] Там же, стр. 765.

[3] Байков А. А., А. А. Ржешотарский, некролог, „Известия СПБ Политехнического института" т. I., вып. 3—4, 1904, стр. IV.

[4] Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона, т. 19, 1896, стр. 267—271, статья „Микроструктура стали".

МИКРОСКОПИЧЕСКІЯ

ИЗСЛѢДОВАНІЯ

ЖЕЛѢЗА, СТАЛИ и ЧУГУНА.

Сообщеніе въ собраніи техниковъ Обуховскаго завода 22-го февраля 1898 года

Инженера Технолога

А. А. Ржешотарскаго.

Съ чертежами и фототипіями.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Невская типографія. Шлиссельб. просп., № 15.
1898.

Фиг. 1. Титульный лист книги А. А. Ржешотарского „Микроскопические исследования железа, стали и чугуна".

В этой работе А. А. Ржешотарский наряду с данными своих исследований приводит ряд весьма подробных сведений о методах приготовления образцов для микроскопического исследования, конструкции микроскопов и особенностях основных структурных составляющих стали.

Полное завершение его исследований в области микроструктуры стали и чугуна мы находим в его классическом труде „Микроскопические исследования железа, стали и чугуна". Эта работа А. А. Ржешотарского была издана в 1898 г., причем, как это видно из титульного листа, предварительно была доложена „в собрании техников Обуховского завода". Книга А. А. Ржешотарского была первым систематическим исследованием микроструктуры железа, стали и чугуна в различных состояниях обработки. А. А. Байков указывал, что „... в европейской литературе нет другого столь полного исследования этого вопроса и притом непосредственно примененного к чисто практическим целям, и в этом отношении исследование это навсегда останется классическим ..." [1].

Это сочинение А. А. Ржешотарского представляет собой ценность не только благодаря важным научным данным, отдельным теоретическим соображениям, высказанным автором, или хорошо выполненным микрофотографиям, приведенным в отдельном атласе, но и благодаря большой практической значимости. В то время на металлургических и машиностроительных заводах еще не было специальных металлографических лабораторий, так как к металлографическому методу испытаний часто относились с большим недоверием и еще не все оценили его практическое значение. Кроме того, введение этого метода задерживалось также и потому, что многие инженеры и техники не знали, как пользоваться металлографическим методом, практически сделать микрошлиф, выявить микроструктуру и как оценить наблюдаемую структуру.

Именно для того, чтобы широко внедрить металлографию в заводскую практику, помочь развитию русской промышленности, ввести необходимые металловедческие научные основы, необходимо было написать книгу, в которой строго последовательно и систематично были бы изложены все практические основы металлографии, а также ее возможности в решении заводских и научных задач. Эта задача блестяще решена А. А. Ржешотарским в книге „Микроскопические исследования железа, стали и чугуна". Поэтому значение этой книги было исключительно велико, и она сыграла очень большую роль в развитии русской металлопромышленности. Книга А. А. Ржешотарского написана на высоком научном уровне ясным и доступным языком.

В начале книги А. А. Ржешотарский дает определение стали. Он указывает, что „углеродистое железо или сталь не представляет собой какого-нибудь вполне определенного и однородного химичесокого соединения, а только сплав чистого железа с углеродом" [2].

---

[1] Байков А. А., А. А. Ржешотарский, некролог, „Известия СПБ Политехнического института" т. I, вып. 3—4, 1904, стр. V.

[2] Стр. 240 настоящей книги.

АТЛАСЪ

МИКРОСКОПИЧЕСКИХЪ ИЗСЛѢДОВАНІЙ

ЖЕЛѢЗА, СТАЛИ и ЧУГУНА.

Сообщение въ собраніи техниковъ Обуховскаго завода 22-го февраля 1898 года

Инженера Технолога

А. А. Ржешотарскаго.

15 таблицъ съ 80 фотографіями

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Невская типографія Шлиссельбургскій проспектъ, № 15.

1898.

Фиг. 2. Титульный лист книги А. А. Ржешотарского „Атлас микроскопических исследований железа, стали и чугуна“.

Очень ясно также описывается процесс кристаллизации, зональная ликвация и, наконец, „частичная ликвация“, т. е. то явление, которое мы сейчас называем внутридендритной или внутрикристаллической ликвацией.

Далее А. А. Ржешотарский ясно показывает, что химический анализ и механические свойства без изучения микроструктуры не позволяют полностью исследовать металл, — отсюда и огромная роль металлографии.

Первая часть книги посвящена технике приготовления шлифов. Здесь содержится самое детальное описание как операции вырезки образцов для исследования процессов шлифования и полирования, так и методов приготовления необходимых абразивных материалов. Весьма подробно описаны и способы травления и особенно операции по подготовке шлифов. Следует заметить, что на протяжении всей этой части книги наряду с литературными данными приводятся и многочисленные практические замечания, основанные на собственном опыте. Так, например, говоря о сухой полировке, А. А. Ржешотарский указывает: „. . . у меня при сухой полировке получались довольно крупные царапины (на шлифе—*ред.*) и поэтому рекомендовать этот способ я не осмеливаюсь“ [1]. Говоря о применявшейся в то время полировке металлов с маслом, А. А. Ржешотарский указывает, что „образцы, полируемые с маслом, очень трудно промываются и вследствие этого чаще всего невозможно получить равномерно вытравленной поверхности. Поэтому, наученный опытом, советую никогда не прибегать к этому средству при полировке“ [2].

Приводя данные по операции травления микрошлифов, он указывает, что эффект травления происходит от „неодинакового действия кислоты на различные составные элементы стали, выделившиеся во время нагревания или охлаждения металла“. Указывая многие составы реактивов, применяемых для травления, А. А. Ржешотарский замечает: „Сорби предлагает погружать образец на 2 секунды в 25% раствор (азотной кислоты — *ред.*) . . . я чаще всего применяю 2% раствор для более твердых сортов и 4% для мягких сортов стали, погружая образчик на 10—15 секунд“ [3].

Таким образом, наиболее широко применяемые в практике современных металлографических лабораторий 2- и 4%-ный растворы азотной кислоты были предложены А. А. Ржешотарским, и нам кажется, что этот реактив правильно было бы называть именем русского ученого А. А. Ржешотарского.

Следует отметить, что хотя с момента выхода в свет этой книги прошло более 50 лет, часть ее, посвященная технике приготовления микрошлифов, в отдельных своих разделах, представляет большой интерес и для современных металлографических лабораторий. Еще

---

[1] Ржешотарский А. А., Микроскопические исследования железа, стали и чугуна, СПБ 1898, стр. 21.
[2] Там же, стр. 25.
[3] Там же, стр. 27.

больший интерес представляет вторая часть книги, напечатанная в настоящем сборнике с небольшими сокращениями.

Здесь А. А. Ржешотарский приводит основные соображения о возможных взаимоотношениях железа и углерода в стали и учение Д. К. Чернова о критических точках. Он указывает: „Сравнивая выводы Осмонда с теорией Д. К. Чернова, приходим к заключению, что точка A_3 Осмонда тождественна точке *b*, точка же A_1 — точке *a*, которые 30 лет тому назад определил наш известный металлург Дмитрий Константинович. Вся разница заключается только в том, что благодаря имеющимся в настоящее время точным пирометрам, Осмонд имел возможность выразить их в градусах, между тем как Дмитрий Константинович определил свои точки прямо цветами каления“ [1].

В этих словах А. А. Ржешотарского проявляется его патриотизм, желание доказать приоритет русской науки, опередившей работы заграничных ученых более чем на 30 лет и создавшей научные основы процессов обработки и теорию строения стали.

Далее А. А. Ржешотарский описывает различные структурные составляющие железо углеродистых сплавов. Очень интересна применяемая автором терминология. Вместо термина „феррит“ он пользуется русским термином „железит“. Зерна железита (феррита) по его данным в зависимости от состава стали температуры нагрева и условий обработки могут иметь разную форму и размеры.

Также интересен и термин „сталит“ (или углеродистое железо), который А. А. Ржешотарский употребляет вместо „перлит“. Если введение термина „перлит“ связано с особой окраской поверхности микрошлифа при травлении, то термин „сталит“ характеризует изменение свойств сплава. Если в сплаве больше „сталита“ (по А. А. Ржешотарскому), то естественно ожидать большей прочности и твердости этого сплава. С этой точки зрения термин „сталит“, незаслуженно забытый, несомненно, имеет права научного гражданства.

Говоря о структуре закаленной стали, А. А. Ржешотарский указывает, что при нагреве выше точки *b* Д. К Чернова „железиты“ (т. е. феррит) отсутствуют, и они не наблюдаются и после охлаждения. Здесь „они (железиты — *ред.*) находятся в виде особого соединения с углеродом“.

Структуру закаленной стали А. А. Ржешотарский называет „закалит“, а не мартенсит, как сейчас ее обычно называют. В закалите, по его мнению, нет свободного цементита, и углерод находится в нем в растворенном состоянии. Вопреки существовавшему в то время мнечию, что в низкоуглеродистой стали не может быть достигнута структура закаленной стали, А. А. Ржешотарский получил „закалит“ в стали с 0,2% углерода. Сейчас уже точно установлено, что мартенсит (закалит) может быть получен и в низкоуглеродистой стали, но при достаточно большой скорости охлаждения. Также вопреки мнению английского ученого Санитера о том, что небольшие добавки

[1] Стр. 242 настоящей книги.

алюминия приводят к потере свойства стали закаливаться, А. А. Ржешотарский приводит микрофотографии, показывающие несостоятельность этого мнения. Современные данные по этому вопросу полностью подтверждают опыты А. А. Ржешотарского.

В результате сопоставления многих иностранных наименований, характеризующих структуру стали, А. А. Ржешотарский указывает: „Может быть со стороны читателей будет мне сделан упрек за введение новых названий, но пока не установится в этом отношении окончательная номенклатура, по моему мнению, более целесообразно и гораздо удобнее дать, вместо отвлеченных такие названия, которые прямо характеризуют данную составную часть и влияние ее на свойства стали.

Таким образом, будем называть:

1) Железитом — практически чистое железо, выделяющееся из углеродистого железа в различной пропорции и группировке в зависимости от сорта стали и разных условий нагрева и остывания.

2) Сталитом — неопределенного состава соединение углерода с железом, количественное выделение которого прямо характеризует сорт углеродистого железа, т. е. стали в отожженном виде [1].

3) Цементитом — определенного состава карбид — вещество, господствующее главным образом в цементной стали [2].

4) Закалитом — главную составную часть закаленной стали“ [3].

Так же как и А. А. Ржешотарский мы считаем, что вместо многих наименований, имеющих чисто отвлеченное значение, необходимо дать такие названия, которые прямо характеризуют данную структурную составляющую и влияние ее на свойства металла. В самом деле, насколько яснее было бы представление о свойствах стали, если ввести названия — закалит и сталит — вместо мартенсита и перлита.

Также невольно возникает вопрос, почему мы до сих пор должны пользоваться названием „мартенсит“ в честь Мартенса, если теория закалки по существу создана русским ученым Д. К. Черновым? И с этой точки зрения введение русского наименования „закалит“ вполне логично.

Далее А. А. Ржешотарский приводит ряд наблюдений за изменениями микроструктуры стали как при быстром охлаждении ее с температуры выше точки *b* Д. К. Чернова, так и при нагреве при повышающихся температурах.

А. А. Ржешотарский четко устанавливает, что „изменения частичного сложения стали при нагреве вполне обратны тем, которые

---

[1] Содержание углерода в сталите (перлите) зависит от скорости охлаждения. Поэтому указание А. А. Ржешотарского о неопределенности состава сталита является вполне правильным и впоследствии полностью подтвердилось. (*Прим. ред.*).

[2] Под термином „цементная сталь“ следует подразумевать заэвтектоидную сталь. (*Прим. ред.*).

[3] Стр. 249 настоящей книги.

происходят при медленном остывании"[1]. Очень интересно и высказывание Альфонса Александровича относительно превращения стали при низкотемпературном отпуске: „Как известно, закаленная сталь меняет уже свойства после отпуска ее до 200°, поэтому трудно допустить, чтобы с переменой свойств не изменялось частичное сложение (микроструктура — *ред.*)" [2]. В настоящее время полностью подтверждено предвидение А. А. Ржешотарского о том, что уже при отпуске на 200° в закаленной стали происходит структурные изменения.

Изучая вопрос о влиянии температуры отжига, Альфонс Александрович показывает, что наиболее высокая вязкость достигается в среднеуглеродистой стали при минимальном размере зерна перлита (сталита), т. е. при температуре отжига, соответствующей точке *b* Д. К. Чернова, тогда как дальнейшее повышение температуры приводит к росту зерна и снижает прочность и вязкость стали. Изучая структуру литой стали как углеродистой, так и никелевой, Альфонс Александрович показывает, что только отжиг выше точки *b* Д. К. Чернова полностью изменяет ее структуру и придает высокие механические свойства. Также очень наглядно показано влияние изменения содержания углерода на структуру литой и пудлинговой стали, и поэтому автор заключает, что „При некоторой опытности по данному снимку можно бы даже определить с небольшой ошибкой, сколько углерода заключается в данном образце стали" [3]. А. А. Ржешотарский в этих словах впервые выражает мысль о возможности количественных расчетов по структуре стали. Далее так же кратко, но ясно показаны структуры серых и белых чугунов и указаны особенности их строения.

Переходя к практическому применению микроскопического анализа, Альфонс Александрович показывает его значение при определении причин пониженных свойств и преждевременного разрушения металла.

В заключение он подчеркивает большую научную и практическую ценность микроанализа и указывает: „ . . . микроскопический анализ может быть отличным контролем при производстве стали, а для приемщиков послужит указанием настоящих качеств металла — качеств, которых не всегда в состоянии определить один химический анализ и механические испытания" [4].

Эта работа А. А. Ржешотарского была высоко оценена, и в 1898 г. Русское техническое общество присудило ему золотую медаль. За блестяще выполненные микрофотографии на Варшавской выставке ему также была присуждена золотая медаль.

„Микроскопические исследования железа, стали и чугуна" действительно можно считать выдающимся произведением не только

---

[1] Стр. 257 настоящей книги.
[2] Стр. 256 настоящей книги.
[3] Стр. 264 настоящей книги.
[4] Там же.

в отношении глубины творческого замысла и научной ценности выводов, но и благодаря той изумительной технике микроанализа, какая была достигнута им при очень низком качестве микроскопов того времени. Огромная ценность этого сочинения состоит прежде всего в том, что оно послужило толчком к широкому развитию металлографии и введению ее в заводскую практику.

В 1899 г. А. А. Ржешотарский был назначен главным металлургом Обуховского завода и эту должность занимал до конца жизни.

В последние годы он занимался рядом важных вопросов. Из них в первую очередь надо отметить изучение основного и кислого мартеновского процесса.

В результате работ А. А. Ржешотарского качество мартеновской стали повысилось столь значительно, что из нее можно было изготовлять кроме брони (из углеродистой или никелевой стали) многие другие ответственные изделия. По этой причине в 1895 г. А. А. Ржешотарский выступил за применение мартеновской стали для производства орудийных стволов, которые на Обуховском заводе все еще изготовлялись из дорогой тигельной стали и предпринял дальнейшие исследования мартеновского процесса, которые, однако, так и остались незаконченными.

В 1901 г. исполнилось 25 лет работы А. А. Ржешотарского на Обуховском заводе. За этот большой срок, работая вначале под руководством Д. К. Чернова, а затем самостоятельно, он стал одним из самых крупных специалистов в области металлургии специальных видов производства, а также в области металлографии. Его высокие личные качества, доброта и отзывчивость, постоянный и живой интерес к делу, проникновение в самую сущность явлений привели к тому, что 25-летие его работы превратилось в чествование не только работниками завода, но и широкой русской технической общественностью.

В „Вестнике Общества технологов" в статье, посвященной А. А. Ржешотарскому, указывалось, что „18 сентября с г. Обуховский сталелитейный завод чествовал одного из самых выдающихся своих членов — своего главного металлурга Альфонса Александровича Ржешотарского по поводу 25-летия его деятельности на этом заводе, замечательной по своим заслугам как по отношению к заводу, так и науке.

Работы А. А. Ржешотарского в исследовании стали настолько обширны и ценны, что русская техника должна гордиться, считая в своих рядах такого деятеля" [1].

Это чествование А. А. Ржешотарского не было простой формальностью, потому что „...не было человека, имевшего счастье служить и работать вместе с А. А., который бы не уважал и не любил этого высоко-гуманного человека" [2]. И действительно, взаимоотношения Альфонса Александровича как с рабочими, так и с техническими

---

[1] „Вестник Общества технологов" № 10, 1901, стр. 443—445.
[2] „Вестник Общества технологов" № 3, 1904, стр. 98.

сотрудниками завода были очень хорошими. На заводе Альфонс Александрович был одним из организаторов многочисленных широких технических собраний, на которых докладывались и обсуждались различные научные и производственные вопросы.

Достаточно указать, что в течение полутора лет сам Альфонс Александрович сделал 11 докладов по разным вопросам металлургии и металлографии. С момента организации на заводе металлографической лаборатории, руководимой А. А. Ржешотарским, Обуховский завод стал научно-производственным центром, куда со всех сторон России обращались за помощью в решении различных технических вопросов и за советами в организации и налаживании металлографических лабораторий. Недаром Александр Александрович Байков называл Обуховский завод „академией металлургических знаний“ [1]. Большие научные знания, а также практические заслуги Альфонса Александровича в создании вооружения для русской армии и особенно для русского флота сделали его имя широко известным среди русских военных, технических и научных работников.

В 1901 г. А. А. Ржешотарский был приглашен деканом металлургического факультета Петербургского политехнического института, но он отказался от этой должности, так как для этого ему надо было уйти с Обуховского завода, с которым он сроднился. Однако в 1902 г. он принял новое предложение Политехнического института и занял кафедру металлургии, не прекращая работы на заводе, которая становилась все более и более разносторонней [2].

Как указывает А. А. Байков, Альфонс Александрович Ржешотарский со всей энергией взялся за организацию новой кафедры. Он составлял программы, учебные планы, занимался созданием лаборатории и т. д.

„Здесь, как указывает В. В. Данилевский, — он заложил ту основу, на которой в дальнейшем расцвело творчество его ученика А. А. Байкова, чьи выдающиеся труды по теории металлургических процессов были отмечены в наши дни присвоением ему звания Героя социалистического труда“ [3].

К сожалению, разносторонняя практическая и научная деятельность А. А. Ржешотарского быстро оборвалась. В конце 1903 г. он заболел, но, будучи очень требовательным к себе, продолжал работать и вести занятия. Однако вскоре он уже не мог работать и в ночь с 15 (2) на 16 (3) января 1904 г. скончался.

Как правильно писал А. А. Байков в некрологе об А. А. Ржешотарском „В лице А. А. наука и техника потеряли выдающегося представителя, общество — честного и бескорыстного деятеля, друзья

---

[1] Н. П. Щапов. О работах А. А. Байкова в области транспортного машиностроения, „Известия О. Т. Н. АН СССР“ № 10, 1950, стр. 1515.

[2] Интересно отметить для характеристики научных интересов А. А. Ржешотарского, что в самые последние годы жизни он занимался разработкой немагнитной стали, не влияющей на компасную стрелку, для обшивки рубок военных судов.

[3] Данилевский В. В., Русская техника, Лениздат, 1949, стр. 107.

и знакомые — прекрасного и гуманного человека, светлый образ которого всегда будет жить в их сердце".

Создание русских орудийных и броневых сталей, превосходящих заграничные стали, введение в производство научных методов контроля с помощью микроскопа и пирометра, разработка практических и научных основ металлографии, приведшие к широкому развитию этой науки на заводах, большая роль в создании школы русских металлургов — все это связано с деятельностью выдающегося русского ученого — инженера А. А. Ржешотарского. Его работы явились значительным вкладом в развитие отечественной науки и техники.

СПИСОК ТРУДОВ А. А. РЖЕШОТАРСКОГО

1. Ржешотарский А. А., Заметка о мартеновском производстве на Обуховском сталепушечном заводе, „Сборник к 25-летию введения мартеновского производства в России“, СПБ 1898, стр. 171—172.

2. Ржешотарский А. А., Микроскопические исследования железа, стали и чугуна. Сообщение в собрании техников Обуховского завода 22 февраля 1898 г., СПБ 1898, 115 стр., 12 черт. в тексте, приложение: атлас 15 табл. с 90 фототипиями.

3. Ржешотарский А. А., Различные теории относительно закалки стали, „Морской сборник“ № 9, 1881, стр. 31—50.

4. Ржешотарский А., Бессемерование и способ его ведения „Przegląd techniczny“ 1878, вып. 1, стр. 7—15 (продолжение); вып. 2, стр. 92—97.

5. Ржешотарский А., Ломкость железа и стали в горячем состоянии (1878). (Упоминание об этой статье имеется в некрологе о Ржешотарском без указания места ее напечатания).

6. Ржешотарский А., О производстве стали мартеновским способом. (1876). (Упоминание об этой статье имеется в некрологе о Ржешотарском без указания места ее напечатания).

7. Ржешотарский А., Обзор новейших способов исследования литой стали „Przegląd techniczny“, 1880, т. 11, вып. 2/3, стр. 73—99; вып. 5, стр. 264—287; т. 12, вып. 7, стр. 11—30.

8. Ржешотарский А., Применение фотографии при микроскопическом исследовании стали, „Swiato“ № 5, 1899, стр. 205—219.

9. Ржешотарский А. А., О синеломкости стали, „Варшавский технический журнал“, 1881 (есть упоминание в „Вестнике Общества технологов“, № 10, 1901).

10. Ржешотарский А. А., Металлургия стали, 1884 (есть упоминание в некрологе, написанном А. А. Байковым).

11. Статьи в Энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефрона, изд. 1892—1898 гг., статьи: „Литая сталь“, „Микроструктура стали“, „Классификация железных продуктов“, „Никель“ и др.

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗА, СТАЛИ И ЧУГУНА [1]

Л. А. РЖЕШОТАРСКИЙ

Как известно, углеродистое железо или сталь не представляет собой какого-нибудь вполне определенного и однородного химического соединения, а только сплав чистого железа с углеродом, отчасти с углеродистым железом и еще с другими посторонними примесями.

Наподобие других сплавов сталь при затвердевании, т. е. при переходе из жидкого состояния в твердое, имеет стремление распадаться на свои составные части. Из жидкой массы сперва выделяются и выкристаллизовываются более тугоплавкие соединения, например: чистое или, по крайней мере, малоуглеродистое железо; вслед за тем менее тугоплавкие, т. е. более углеродистое железо и т. д., и, наконец, застывают самые легкоплавкие, т. е. сильно углеродистое железо. Таким образом стальная болванка не представляет однородного тела, и в той ее части, где металл застыл последним, находятся более твердые места, которые сильно отличаются по своему химическому составу от окружающей массы металла.

Результаты химических анализов, взятых из разных мест болванки, дают нам наглядную картину этой сегрегации, которая совершается во время застывания стали в изложнице. Даже невооруженным глазом можно заметить на поверхности продольного разреза болванки более матовые или же, наоборот, более блестящие пятна, представляющие собой другой состав металла.

Это свойство, известное под названием ликвации, присуще вообще литой стали. Однако в зависимости от тех или других обстоятельств, как например: от большего или меньшего количества примесей в железе, от условий остывания металла и, наконец, от величины и формы застывающей болванки, степень этой ликвации бывает различна. Но раз она совершилась, то уже этой неоднородности ничем поправить невозможно. Ни ковка, ни отжиг, ни закалка переменить ее не в состоянии.

Кроме этой общей ликвации в стали происходит еще частичная ликвация, которая имеет громадное влияние на свойство и характер металла, несмотря на то, что заметить ее невооруженным глазом и даже определить химическим анализом почти невозможно.

Только один микроскоп в состоянии обнаружить присутствие ее.

Если быстро охладим в воде кусок раскаленной стали и затем отполируем и вытравим его в кислоте, то под микроскопом, даже при линейном увеличении в 100 раз, на поверхности шлифа не замечаем никакого рисунка. Но если этот кусок вторично нагреем до темнокрасного каления и позволим ему медленно остыть, то на вновь отполированном и вытравленном шлифе увидим красивый рисунок, состоящий из серебристо-белых зигзагов, полос и пятен, вкрапленных в более темную массу, окрашенную разноцветной побежалостью.

В зависимости от условий нагрева и остывания куска стали, упомянутый узор будет переменяться вследствие различной группировки элементов строения; но так как эти преобразования, не изменяя химического состава, вызывают перемену механических свойств стали, то для полного исследования металла недостаточно ограничиться знанием химического анализа и механических испытаний, но необходимо изучить еще и его частичное сложение.

Исследования структуры металлов под микроскопом создали новую отрасль науки, известной под названием металлографии, главный успех которой пока заключается в исследовании структуры железных продуктов.

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ

Прежде чем познакомиться с этим новым миром, видимым через стекло микроскопа, мне кажется не лишним будет упомянуть, хотя бы в кратких словах, о некоторых исследованиях и гипотезах ученых-металлургов относительно структуры стали. Они пролыют свет на то или другое явление, происходящее во внутреннем строении металла, и дадут нам возможность яснее себе усвоить те изменения, которые, как увидим, претерпевает металл в различных своих состояниях.

Исследования многих ученых доказали, что в стали находятся два резко отличающиеся по свойствам соединения углерода.

а) Первая разновидность — это углерод, находящийся в определенном химическом соединении с железом, — соединении Fe_3C. Этот углерод сперва назван был цементирующим углеродом, а в настоящее время известен под названием углерода отжига, потому что он главным образом находится в отожженной стали.

б) Вторая разновидность углерода еще до сих пор вполне не определена, но, по всей вероятности, он растворен равномерно в железе или выделен в особое состояние молекулярного сгущения, но ни в каком случае не представляет определенного химического соединения с железом. Этот углерод находится в закаленной стали и носит название углерода закала.

В 1868 году профессор Д. К. Чернов на основании своих исследований доказал:

1) Что каждый сорт стали имеет свою критическую температуру, выше которой он должен быть нагрет, для получения закалки. Эту температуру Д. К. Чернов назвал точкой *a*. Сталь, нагретая ниже точки *a*, не принимает закалки.

2) Для каждого сорта стали существует еще вторая критическая температура, ниже которой нагретая и затем охлажденная сталь не изменяет своей структуры. Эту температуру он назвал точкой *b*. Но раз мы при нагреве стали дошли до этой температуры, металл переходит из кристаллического состояния в аморфное (воскообразное) [2], которое она сохраняет при дальнейшем нагреве до некоторой температуры *k*, близкой к температуре *c* плавления стали.

При медленном охлаждении стали, нагретой до температуры высшей точки *b*, происходит снова кристаллизация стали, и она будет проявляться тем сильнее, чем больше будем удаляться при нагреве за точку *b* и чем медленнее будет остывание до точки *b*, ниже которой дальнейшей перемены в структуре уже не последует. Быстрое же охлаждение будет препятствовать этой кристаллизации; и поэтому для получения мелкозернистого (аморфного) сложения необходимо кусок раскаленной стали быстро охладить до температуры ниже точки *b*.

Таким образом, 30 лет тому назад Д. К. Чернов уже ясно определил точкой *b* ту критическую температуру, при которой в стали совершаются молекулярные превращения.

Сравнивая выводы Осмонда с теорией Д. К. Чернова, приходим к заключению, что точка A_3 Осмонда тождественна точке *b*, точка же A_1 — точке *a*, которые 30 лет тому назад определил наш известный металлург Дмитрий Константинович. Вся разница заключается только в том, что благодаря имеющимся в настоящее время точным пирометрам Осмонд имел возможность выразить их в градусах, между тем как Дмитрий Константинович определил свои точки прямо цветами каления.

Хотя наблюдения с пирометром при нагревании или остывании стали, кроме того химический анализ и механические испытания, дают нам фактические указания на существование различных пертурбаций, но многие факты и явления оставались бы темными и совершенно непонятными, если бы не микроскоп, который до некоторой степени раскрыл занавес и дал нам наглядную картину всех изменений, происходящих в стали.

В зависимости от химического состава и условий обработки в стали происходит частичная ликвация составных элементов в той или другой форме и степени; благодаря этому мы можем судить о способе обращения с данным сортом стали, способе, который был применен при ее обработке.

Посредством микроскопа удалось различить несколько видоизменений железа, из которых каждое в отдельности или совокуп-

ное их отношение обусловливает собой ту или другую калориферическую обработку.

I. *Железит* (феррит) представляет собой более или менее чистое железо, выделяющееся при нагревании или остывании из общей массы углеродистого железа.

Главной отличительной чертой железита есть его мягкость, вследствие чего при окончательной полировке он истирается гораздо легче всех других составных частей, и на готовом шлифе получаются заметные, даже под лупой, углубления, которые представляют красивый рельеф. При вытравке в слабых растворах кислоты на него не действуют; железит остается белым с серебристым блеском. Тинктура иода, бромная вода, салициловая кислота, а также сильно разбавленная азотная кислота (1 : 100) после минутного погружения не оказывают заметного влияния; более сильные растворы окрашивают его в желтоватый или коричневатый цвет и, наконец, травящая полировка с лакричной настойкой не производит на него никакого действия.

Железит под микроскопом при линейном увеличении даже в 800 раз не дает ясного понятия о своем кристаллическом строении. Его форма изменяется в зависимости от общего содержания углерода в металле, от количества посторонних примесей, как например: кремния, марганца, никеля, а в данном сорте стали от температуры нагрева и условий остывания. В мягком железе или в очень основной стали форма железита подходит к пентагональному додекаэдру. Однако же и здесь очертания многоугольников крайне неправильны и напоминают своей формой очертания трещин, образующихся при сушке ила или глины.

Величина зерна железита прямо зависит от температуры нагрева и способа охлаждения. Чем выше температура нагрева, чем она продолжительнее и чем медленнее совершалось охлаждение, тем больше зерно железита. При медленном охлаждении от температур нагрева, немного превышающих точку *b* (по шкале Чернова), получаются более правильные зерна, чем после нагрева до высших температур. При очень высоких температурах, выше 1100°, многоугольные зерна принимают продолговатую форму.

Посторонние примеси имеют то же влияние на очертание зерен железита.

Черная сетка, разграничивающая между собой зерна железита, состоит из особого углеродистого вещества, про которое будет упомянуто ниже. По мере увеличения количества углерода в стали, площадь, занимаемая этим углеродистым железом (сталитом)[1], увеличивается, и зерна железита принимают более неправильную форму и разную группировку.

В мягких сортах стали зерна железита располагаются в виде мозаики, составляющей звездообразные узоры — фиг. 45 (уве-

[1] Сталитом А. А. Ржешотарский называет структурную составляющую, соответствующую перлиту по современной терминологии. (*Ред*).

лич. 100); в полутвердых сортах они группируются в виде ломаных линий и сеткообразных полосок, разграничивающих зерна углеродистого железа—фиг. 46 и 47 (увелич. 100), и по мере увеличения углерода в стали эти белые полоски железита, составляя более правильную сетку, становятся все тоньше и тоньше.

В закаленной стали не замечается свободно выделившихся железитов; они находятся там в виде особого соединения с углеродом, про которое упомянем ниже. Но так как быстрое охлаждение фиксирует то состояние металла, которое он имел в момент охлаждения, то надо предполагать, что углеродистая сталь, нагретая выше точки *b*, не заключает в себе железа в свободном состоянии, но вся масса состоит из углеродистого железа. Во время медленного остывания из углеродистой массы выделяются железиты, причем количество и относительная их группировка зависят от общего содержания углерода в металле и от условий его охлаждения. Чем медленнее совершалось остывание и чем мягче сталь, тем больше было времени и свободы для такого выделения и тем в более значительной степени образовались его скопления. Наоборот, при быстром охлаждении нехватало времени для такой сегрегации.

Фиг. 30 и 31 представляют структуру стали, взятой из центрального слоя болванки, которая была отлита в изложницу с глиняной набойкой, где остывание происходило очень медленно. При таких условиях железиты без всяких препятствий свободно выделились и расположились на периферии зерен углеродистого железа.

Похожее явление мы видим при медленном охлаждении куска стали, нагретого до высокой температуры, как показывает фиг. 34. Здесь, разумеется, величина зерен углеродистого железа и толщина оболочек, состоящих из железитов, гораздо меньше, потому что нагрев куска стали был сравнительно не очень высок (900°), и остывание в сравнении с центральной частью болванки совершалось гораздо быстрее. Но если бы мы этот кусок нагрели до точки плавления и если бы он охлаждался так же, как металл болванки, то получили бы структуру, подходящую к фиг. 30.

Ковка или прокатка влияют на изменение формы и группировки зерен железита: первая раздробляет их и рассеивает в беспорядке в теле углеродистого железа — фиг. 1, прокатка же вытягивает их в виде волокон, как указывает фиг. 2, где изображена мягкая броневая сталь, прокатанная под вальцами. Необходимо, однако, заметить, что группировка железитов в этих последних случаях будет меняться в зависимости от той температуры, при которой была окончена ковка или вальцовка.

II. Вторая составная часть *сталит* (перлит) представляет собой углеродистое железо до сих пор еще не определенного состава.

Это вещество легко окрашивается травящей полировкой или вытравкой в кислотах, и под микроскопом замечаются пятна

или целые поверхности яркорадужных цветов, напоминающие перелив цветов перламутра, вследствие чего он получил первоначальное название перлит. Особенно в хорошо отожженных средней твердости сортах стали при немного косом освещении вся поверхность поля зрения упестрена, как в калейдоскопе, узорами с желтоватым, синим, голубым и даже зеленым оттенком. При вертикальном освещении они тускнеют и принимают темный или совершенно черный цвет.

В железе или в очень мягких сортах стали сталит располагается в виде тонких сеткообразных ниток или полосок, разграничивающих многогранные зерна железита, и в этом случае сталит представляется в виде оболочки ядра железита.

В полутвердых сортах хорошо отожженной стали (фиг. 1) сталит, наоборот, выступает в виде многогранных зерен, окаймленных оболочкой железита.

В сером чугуне сталит группируется в виде елкообразных, разрывчатых кристаллов, подобных тем, которые часто встречаем в усадочных раковинах чугунных или стальных отливок. Фиг. 78 представляет снимок (увеличение в 100 раз) рафинированного в бессемеровской реторте чугуна. Здесь отлично видно, как в жидком чугуне выкристаллизовались в различных направлениях елочные кристаллы, пока не застыла остальная масса, состоящая из более легкоплавких соединений.

Структура сталита (видимая только при больших увеличениях) напоминает слои дерева (фиг. 3, увеличение 600 и фиг. 4, увеличение 600), т. е. состоит из параллельных волокон или чешуек попеременно то твердых, то мягких, и таким образом кажется, что сталит состоит как бы из двух разнородных тел, различающихся между собой не только по твердости, но и по степени окрашивания.

Так как в отожженной стали, структура которой состоит из вышеупомянутых волокон, химический анализ всегда находит большее или меньшее количество карбида железа Fe_3C, известного под названием цементита (смотри ниже), поэтому явилось предположение, что твердые пластинки сталита состоят из цементита, мягкие же — из железита. В последнее время химические анализы, произведенные некоторыми учеными, прямо доказывают, что карбид, извлеченный из волокон сталита, ничем не различается от карбида твердых пластинок цементита.

Но, с другой стороны, известно, что железит и, как увидим ниже, цементит не окрашиваются ни кислотами, ни травящей полировкой, между тем волокна описываемого сталита при самых слабых кислотах или непродолжительном действии травящей полировки принимают сильную окраску. Поэтому Осмонд считает это вещество самостоятельным элементом структуры стали — элементом, в котором цементит может находиться как примесь в до того раздробленном состоянии, что присутствия его нельзя различить даже при увеличениях в 1000 раз.

Нам в данном случае не столько важно знать его химический состав, сколько его строение, по которому можно характеризовать состояние металла.

III. *Цементит.* Эта составная часть структуры стали представляет собой углеродистое железо, которое удалось отделить целиком, анализировать его состав и определить формулой Fe_3C, где железо в некоторых частных случаях, как, например, в специальных сортах стали, может быть отчасти замещено марганцем или хромом.

Это углеродистое соединение находится главным образом в цементной стали в виде больших скоплений, видимых даже под обыкновенной лупой, поэтому его и назвали цементитом.

В мягких и полутвердых сортах стали, приблизительно до 0,6% углерода, вследствие сильной раздробленности присутствие цементита трудно замечается. В твердых инструментальных и хорошо отожженных сортах цементит более виден, хотя тоже в довольно раздробленном состоянии, и только большие увеличения могут показать его присутствие.

На фиг. 5 и 6 видно строение цементита в твердой тигельной стали при линейном увеличении в 600 раз. Он состоит из очень твердых, выпуклых, белых, блестящих, прямолинейных или чуть извилистых полосок, вкрапленных в тело сталита. Длина, толщина и относительное расстояние друг от друга этих полосок зависят от содержания углерода и других примесей в стали.

В закаленной стали они пропадают совершенно, т. е. переходят в закалиты, в вещество, характеризующее закаленную сталь, про которое сейчас упомянем. При отпуске закаленной инструментальной стали до синего цвета, т. е. до 330—350°, их совсем не заметно. Они выступают только при высших температурах отпуска и то в очень тонко раздробленном состоянии, а при температуре рекалесценции начинается их сильное выделение.

Отличительное свойство цементита — это его твердость, которая равняется твердости полевого шпата (№ 6 по шкале Мооса). Благодаря этой твердости цементит при полировке образует всегда на шлифах возвышения, в противоположность железиту, который по своей легкости истирается скорее и дает на шлифе углубления.

Цементит не окрашивается ни травящей полировкой, ни вытравкой в кислотах. Он сопротивляется травящим реагентам в более сильной степени, чем железит, но несмотря на это, различить их между собой легко по заметной разнице в твердости.

Лучше всего изучить его строение в цементной стали, где он образует целые скопления в виде прямолинейных полос (фиг. 7, увелич. 100), находящиеся между которыми сталит заключает в себе бесчисленное множество мелко раздробленных волокон цементита. Эта фигура представляет снимок микроструктуры шлифа самой наружной корки хорошо отцементованной полосы с содержанием углерода 1,5%.

Белые блестящие полоски цементита, образовавшегося вследствие насыщения железа твердым углеродом во время цементации, расположились в наружных слоях отцементованного куска параллельными прослойками в виде твердых жилок, видимых на шлифе даже с помощью лупы. Такая форма цементитов соответствует, как кажется, самому сильному насыщению железа углеродом; по мере же удаления от наружной корки с уменьшением степени цементации форма и группировка цементитов изменяется. Прямолинейные жилки утоняются и соединяются между собой поперечными полосками, образуя, таким образом, довольно правильную четырехугольную сетку, как указано на фиг. 8. Химический анализ приблизительно показал содержание углерода в этом слое 1,3%. На расстоянии нескольких миллиметров еще дальше от наружной корки сетка делается прерывчатой, и цементиты выступают в виде искривленных полосок или зигзагов.

На фиг. 9 представлен шлиф цементной стали с запутавшимся шлаком.

Очень характерно и красиво распределены цементиты в зеркальном чугуне; в нем они располагаются в виде пластов, пересекающихся между собой и ограничивающих целые массы металла, который состоит из сталитов и раздробленных цементитов—фиг. 81.

IV. Четвертую составную часть стали я назвал *закалитом*, потому что он представляет главную и почти единственную массу закаленной стали. Осмонд называет этот элемент структуры стали мартенситом.

Раньше, пока нельзя было применять больших увеличений для исследования стали, предполагалось, что хорошо закаленная сталь представляется почти аморфной. В настоящее же время по исследованиям Осмонда оказалось, что закаленная сталь имеет вполне определенное особого характера кристаллическое сложение. На хорошо отполированных шлифах закаленной стали после травящей полировки Осмонду удалось различить, при увеличениях около 800 раз, характеристические группы прямолинейных иголок, параллельных между собой и пересекающихся в одной плоскости. Эти иголки разделены чаще всего рыхлым пространством, нередко располагаются параллельно трем сторонам равнобедренного треугольника и пересекаются между собой; фиг. 10 представляет снимок такого строения при увеличении в 800 раз.

Закалит очень легко отличить от других составных элементов по игольчатому сложению и по окрашиванию его в желтый или коричневый цвет при травящей полировке, а также при вытравке в кислотах.

По Осмонду закалит не есть какое-нибудь определенное соединение железа с углеродом, а представляет особое кристаллическое состояние железа под влиянием углерода закала. Это соединение очень непрочно и при отпуске закаленной стали легко разлагается на железит, сталит и цементит.

Кроме неразрешенного еще спорного вопроса относительно состава сталита, многие металлурги оспаривают существование закалита (мартенсита) как элемента структуры закаленной стали в виде игольчатых кристаллов. Закалит, по мнению Осмонда, это аллотропическое состояние железа.

Английский металлург Санитер[1] для исследования структуры стали в раскаленном состоянии и в закаленном виде вытравлял полированные шлифы при яркокрасном калении. Для этой цели он нагревал до желаемой температуры отполированные образчики в расплавленном в платиновом тигле хлористом кальции, затем после быстрого охлаждения тигля в холодной жидкости и растворения хлористого кальция в воде промывал образцы в алкоголе и получал таким образом отлично вытравленные шлифы, которые исследовал под микроскопом.

Из своих опытов, которые он проделал над образцами с различным содержанием углерода, Санитер получил следующие результаты. Игольчатые треугольные кристаллы ясно заметны в твердой стали, содержащей около 1% углерода; при содержании 0,6% углерода они видны в более слабой степени и едва только заметны при 0,43% С, в мягкой же стали, около 0,1% С, игольчатое сложение совсем отсутствует. На основании этих результатов Санитер заключает, что игольчатая структура не представляет твердой аллотропической формы железа, потому что она должна быть тогда не только в твердой стали, но и во всякой закаленной, даже в стали содержанием 0,1% С, между тем эта последняя имеет как показал опыт, совершенно другое сложение.

По моему мнению этот факт не может еще служить опровержением теории аллотропического состояния железа, потому что здесь могли быть не соблюдены все осторожности относительно скорости охлаждения и достаточной степени нагрева. Известно, что при обыкновенных практических приемах железо не принимает закалки, однако же в настоящее время применением электрического тока для накаливания самой мягкой проволоки, погруженной в охлаждающую жидкость, достигают полной закалки.

Из моей практики могу сказать, что закаленная в холодной воде после нагрева до 950° сталь с 0,2% С приняла полную закалку, и строение ее состояло из игольчатых кристаллов. То же самое смею оспаривать факт, что сталь с прибавкой самого ничтожного количества алюминия якобы теряет свойство принимать игольчатое сложение в закаленном виде. Фиг. 11 прямо противоречит высказанному Санитером мнению. Этот снимок представляет структуру закаленной мартеновской стали с 0,37% С и с прибавкой алюминия.

К ярым антимартенсистам принадлежит тоже Арнольд[2]. На основании своих опытов он пришел к заключению, что за-

[1] «Горный журнал», январь, 1898.
[2] Minutes of proceedings of the Institution of Civil Engineers, v. XXIII, 1898.

каленная сталь представляет собой вполне определенное соединение железа с углеродом, которое выражает формулой $Fe_{24}C$ и называет его субкарбидом. По его мнению, это некристаллическое вещество обладает большой твердостью и постоянным магнетизмом; легко растворяется в слабых кислотах и разлагается при 400° С на Fe_3C и железо.

Он утверждает, что сталь, содержащая 0,89% углерода, состоит из одних только субкарбидов; такое состояние он называет точкой насыщения. При более высоких содержаниях углерода излишек над 0,89 находится в виде карбидов Fe_3C.

Очень интересные по этому поводу прения ученых-металлургов в собрании Института механиков в Лондоне доказывают несостоятельность теории Арнольда, а опровержения его относительно теории Осмонда являются чисто голословными, так как своих заключений он не подтвердил ни одним снимком закаленной стали.

Из всего вышесказанного мы видим, что вопрос относительно главных элементов структуры стали далеко еще не решен и придется много приложить усидчивого труда и знаний, пока будут выяснены все тайны железного мира. Не исследованы еще различные соединения, в которые вступает железо с углеродом под влиянием калориферических условий и посторонних примесей. Вследствие этого появляются у разных личностей всевозможные комбинации и названия, так что начинающие заниматься металлографией находят по этому вопросу такой хаос в литературе, в котором трудно разобраться.

Чтобы немножко облегчить эти затруднения, я сгруппировал в нижеследующей таблице разные названия, данные различными авторами одному и тому же элементу.

Может быть со стороны читателей будет мне сделан упрек за введение новых названий, но пока не установится в этом отношении окончательная номенклатура, по моему мнению, более целесообразно и гораздо удобнее дать, вместо отвлеченных, такие названия, которые прямо характеризуют данную составную часть и влияние ее на свойства стали.

Таким образом, будем называть:

1) Ж е л е з и т о м — практически чистое железо, выделяющееся из углеродистого железа в различной пропорции и группировке в зависимости от сорта стали и разных условий нагрева и остывания.

2) С т а л и т о м — неопределенного состава соединение углерода с железом, количественное выделение которого прямо характеризует сорт углеродистого железа, т. е. стали в отожженном виде.

3) Ц е м е н т и т о м — определенного состава карбид Fe_3C — вещество, господствующее главным образом в цементной стали.

4) З а к а л и т о м — главную составную часть закаленной стали.

Таблица I

	Осмонд	Гоу	Веддинг	Сорби	Арнольд	Автор	Состав
1	Ferrite	Ferrite	Homogenes. Eisen weicher als Krystalleisen	Ferrite	Ferrite (pure iron)	Железит	Более или менее чистое железо
2	Sorbite	Pearlite	Krystalleisen	Pearlite	The pearly Constituent	Сталит	Мягкое углеродистое железо гипотетического состава
3	Cementite	Cementite	Homogenes. Eisen härter als Krystalleisen	Cementite	Cristallized Normal Carbid	Цементит	Твердое углеродистое железо определенного состава Fe_3C
4	Martensite	Hardenite	—	Hardenite	Sub-Carbid	Закалит	Твердое углеродистое железо гипотетического состава
5	Troostite	—	—	—		—	Переходное состояние от твердого углеродистого железа к мягкому железу

Несмотря на упомянутые раньше характеристические черты каждой из этих составных частей, начинающие могут встретить при определении их некоторые затруднения, особенно если образец неаккуратно вытравлен, или для травления данного сорта стали взята кислота несоответствующей крепости, поэтому не лишним будет дать еще некоторые указания.

Все составные части можно разделить на две главные группы:

1) Элементы, которые не окрашиваются при вытравке кислотами и травящей полировкой; к ним принадлежат *железит и цементит.*

2) Элементы, которые окрашиваются при вышеупомянутых условиях, а именно, *сталит и закалит.*

Вследствие одинакового почти сопротивления действию кислот очень легко можно смешать железит с цементитом. При обыкновенных сортах не сильно углеродистой стали (до 0,7% С) цементит нетрудно различить по его характерному сложению (фиг. 16, увеличение 500) в виде тонких извилистых белых жилок, вкрапленных и рассеянных в теле сталита. В более твердых сортах стали, особенно в цементной, нередко встречаются цементиты такой же формы, как и железиты, что видно на фигурах 7 и 8. Однако же, благодаря их различной твердости, железиты будут всегда представляться в виде углублений, цементиты же — в виде выпуклостей.

При употреблении азотной кислоты для вытравки более мягких сортов кованной или литой некованной стали часто случается, что и железиты местами, а иногда и весь шлиф, покрываются сплошной побежалостью, так что нельзя отличить железиты от остальных частей. В таких случаях следует снова отполировать шлиф дочиста и попробовать действие других реактивов, как например: тинктуры иода или бромной воды, а еще успешнее посредством травящей полировки с лакричной настойкой.

Что касается II-й группы, то иногда закалиты принимают окраску, совершенно идентичную со сталитом, производят те же самые явления радужной побежалости и имеют волокна той же самой величины. Но иголки закалита всегда прямолинейны, сталита же — извилисты и напоминают слои дерева.

Разумеется, все это можно различить, тщательно рассматривая шлифы при больших увеличениях микроскопа. Малые же увеличения (около 100 раз) дают нам понятие только об общем расположении составных частей, главным образом о количественном выделении железитов и о их взаимной группировке в массе углеродистого железа; но мы не увидим — состоит ли это последнее из одних сталитов или цементитов, или из тех и других вместе, а может быть в нем заключаются и все составные части.

Между тем, как, с одной стороны, группировка и количество выделившихся составных частей и взаимное их расположение характеризует различные сорта стали наподобие того, как соот-

ношение и группировка кварца, слюды и полевого шпата характеризует различные горные породы, так и, с другой стороны, выделение какого-нибудь из этих элементов или исчезновение одного из них, вследствие разложения его на другие составные части, зависит прямо от данных условий калориферической (термической — *ред.*) обработки, т. е. от степени нагрева и способа охлаждения, которые являются главной причиной перемены свойств металла. Поэтому изучение этой зависимости представляет одну из очень важных задач металлургии.

Чтобы узнать эту зависимость, надо нам сперва познакомиться с общим законом сегрегации составных элементов стали во время ее остывания, т. е. исследовать термические условия выделения того или другого элемента, количество и относительную группировку этих выделений.

Для этой цели я взял отрезок из орудийной кованной тигельной стали с содержанием углерода 0,59%, кремния 0,15%, марганца 0,3%, из которого было изготовлено несколько цилиндрических брусков ($^1/_2 \times 4''$) для испытания на прессе. На конце головки каждый брусок имел небольшой хвостик, который и служил для исследований под микроскопом.

Семь таких образцов с хвостиками были положены в муфельную печь, и когда их температура нагрева достигла 950°, образец № 1 был закален в масле. Затем, постепенно понижая температуру печи, закаливались бруски № 2 при 850°, № 3 при 750°, № 4 — при 710°, № 5 — при 680°, № 6 — при 580° и, наконец, брусок № 7 оставлен в муфеле медленно остывать без охлаждения в масле.

После закалки у брусков были отрезаны хвостики, которые были отполированы и вытравлены в азотной кислоте (2 : 100) для исследования перемены микроструктуры, а бруски, испытанные на растяжение, дали следующие результаты:

Таблица II

№ бруска	Предел упругости в атмосферах	Сопротивление разрыву в атмосферах	Удлинение в %
1	—	12 800	3,2
2	8200	12 000	2,3
3	7800	10 100	3,6
4	7200	10 000	5,8
5	5100	8 900	6,1
6	2900	6 000	14,1
7	2800	5 900	17,8

Принимая во внимание диаграмму критических точек и припоминая все упомянутое относительно этих температур, можем приблизительно принять для этого сорта стали верхнюю остановку A_3, т. е. критическую температуру *b* между 720 и 700°, нижнюю же A_1—между 615 и 595° [3].

Таким образом, брусок № 1 был закален (950°) многим выше точки молекулярного превращения железа β в α [4]. Без сомнения при этой температуре все железо превратилось в β и в таком состоянии было задержано быстрым охлаждением бруска в масле. Брусок, как показывают испытания на разрыв и проба напильником, действительно получил полную закалку.

Брусок № 2 медленно остыл в муфеле на 100°, так что закалка его последовала при температуре 850°, т. е. выше точки b, поэтому все железо должно еще находиться в состоянии β. И действительно, брусок обнаружил свойства полной закалки.

Брусок № 3 закален после понижения температуры на 200°, как раз при начале остановки A_3. Здесь должно было уже совершиться некоторое незначительное превращение железа β в α, и потому испытания дают некоторую разницу в твердости.

Брусок № 4 закален после понижения температуры на 240°, т. е. как раз в самый критический момент при 710°. Несмотря на это, образец принял еще закалку, но по испытании на растяжение оказался немного мягче предыдущих.

Брусок № 5 закален, когда он остыл ниже точки b, т. е. после превращения железа β в α. При этом опыте часть железа осталась еще в состоянии β, и образец после охлаждения обнаружил признаки закалки.

Брусок № 6 закален после понижения температуры до 580°, т. е. после перехода за точку рекалесценции a, когда все превращение уже произошло; поэтому, заключая в себе железо в мягком состоянии α, он не получил закалки и дал почти такие же результаты на растяжение, как и образец № 7, который был оставлен в муфеле без охлаждения в масле.

На фиг. 10 изображен снимок со шлифа бруска № 1 при линейном увеличении в 800 раз. Здесь все поле зрения состоит из игольчатых кристаллов, т. е. закалитов, которые характеризуют собой закаленную сталь, т. е. железо в состоянии β. Группы параллельных иголок расположились в различных направлениях и кое-где пересекаются между собой.

Фиг. 12 (увелич. 500 раз) представляет сложение бруска № 2; здесь местами оказываются как бы слабые спайности между отдельными группами игольчатых кристаллов, которые есть не что иное, как начало разграничений отдельных зерен, образовавшихся во время медленного остывания. К сожалению, фотография, а тем более фототипия не могла воспроизвести ясно этого явления.

Фиг. 13 представляет снимок шлифа бруска № 3 при увеличении в 100 раз. Фиг. 14 — увелич. в 500 раз. Этот снимок дает нам ясное изображение начала контуров отдельных зерен, в узлах сочленений которых замечаются белые полоски выделившихся железитов. Вся остальная масса (при больших увеличениях) состоит из одних закалитов, которых при увеличении в 200 раз нельзя различить.

Микроструктура бруска № 4 изображена на фиг. 15 (увелич. в 500 раз). Брусок был закален при максимуме остановки A_3, т. е. в точке b молекулярного превращения. Здесь уже видим полную группировку зерен, состоящих большей частью еще из закалитов, хотя местами эти последние разложились в волокна сталитов. Зерна связаны между собой белого цвета блестящим веществом железитов, которые при этой критической температуре в довольно значительном количестве выделились и разместились кругом зерен.

Структура бруска № 5, закаленного при 680°, представлена на фиг. 16 (увелич. в 500 раз); почти все зерна состоят из сталитов, в теле которых местами ясно заметны жилки цементитов. Белая сетка железитов заметна еще более, чем в предыдущем снимке, вследствие дальнейшего выделения их.

Наконец, микроструктура образца № 6, закаленного ниже точки a, изображена на фиг. 17 (увелич. в 100 раз). Разложение закалитов [5] полное, и многогранные зерна составляют одни сталиты, между волокнами которых вкраплены кое-где частички цементита. Железиты разместились в виде красивых сеток, разветвления которых входят внутрь зерен сталита. Этот рисунок представляет характерный вид отожженной стали, совершенно похожий на снимок фиг. 18 (увеличение 100) отожженного бруска № 7.

Из этой серии снимков можно вывести следующие заключения.

При остывании стали от яркокрасного каления (950°) до критической температуры b (по шкале Чернова) не происходит заметной перемены в микроструктуре стали; все сложение состоит из твердых кристаллов железа β, т. е. из закалитов. Но несмотря на однородность состава углеродистой массы, игольчатые кристаллы уже организуют некоторого рода отдельные группы с заметными линиями спайностей, представляющими разъединения массы на отдельные зерна. Повторенные в этом же роде опыты показывают, что чем выше была конечная температура нагрева и чем медленнее и дольше остывал брусок, тем рельефнее и объемистее обнаруживается эта организация. Когда при остывании брусок достигнул начала критической температуры, начинается разложение закалитов, и масса углеродистого зерна выделяет из себя железиты, которые располагаются между зернами.

С дальнейшим охлаждением разложение закалитов усиливается во все время критического периода и максимум этого разложения, кажется, соответствует максимуму остановки A_3. Из закалитов в каждом зерне образуются другие углеродистые соединения с выделением более чистого железа. При дальнейшем остывании между A_3 и A_1 процесс разложения немножко замедляется, но он опять усиливается при рекалесценции a, ниже которой совершенно прекращается.

Из опытов над мягкой сталью Гоу и Совер [1] нашли, что при переходе через остановку A_3 около 68% закалита переходит в железит.

Разумеется, разложения такого большого количества закалитов (68%) в железиты можно ожидать только при очень медленном переходе через остановку A_3 и при очень мягких сортах стали, с какой имел дело Гоу. Немного другое явление получилось при вышеупомянутом моем опыте, что надо приписать более твердой стали (0,59% С) и сравнительно не очень медленному остыванию моих брусков вследствие постоянного открывания муфеля при вынимании брусков для закалки. Кроме того, посторонние примеси имеют сильное влияние на разложение закалитов и вследствие этого мешают нам ознакомиться с явлениями, которые происходят в критические моменты.

Для полного решения этого вопроса придется еще сделать очень много тщательных опытов над брусками с различным содержанием углерода и с различными содержаниями по очереди всех других посторонних примесей, а также исследовать влияние скорости остывания. Однако же, несмотря на это, из сравнения небольшого количества моих опытов над брусками стали средней твердости с опытами Гоу и Совера над мягкой сталью, можно вывести следующие заключения: чем меньше углерода в стали, тем большее количество закалитов разлагается в железиты при остановке A_3; но зато тем меньше сталитов образуется из закалитов при остановке A_1; наоборот, в более твердых сортах стали при переходе через остановку A_3 количество разложившихся закалитов в железиты уменьшается, но зато в остановке A_1 увеличивается разложение в сталиты. Этими-то явлениями и объясняется продолжительность остановки A_3 и почти отсутствие остановки A_1 в малоуглеродистом железе; в сильно углеродистом остановка A_3 едва заметна, между тем A_1 очень продолжительна.

Итак, значение остановки A_3 заключается главным образом в разложении закалитов в железиты, а остановки A_1 — в образовании сталитов из остального количества закалитов.

Большая или меньшая скорость охлаждения влияет на количественное разложение закалитов в той или другой критической точке, вследствие чего разложение иногда продолжается и в промежутке между A_3 и A_1, а также некоторое количество закалитов может остаться в неразложенном состоянии и ниже точки A_1.

Ознакомившись в общих чертах с явлениями, которые имеют место при остывании стали, посмотрим теперь как относятся составные элементы между собой при повышающихся температурах, т. е. при нагреве брусков.

Для этой цели я взял оставшийся кусок от предыдущего опыта, из которого изготовлено еще 5 брусков с хвостиками и, чтобы

---

[1] «Engineering» v. LXI, 1896, стр. 758.

иметь одинаковое однородное сложение стали, все бруски были вместе отожжены при 730° с медленным охлаждением, затем:

Брусок № 8 был оставлен без дальнейшей обработки
„ № 9 вторично нагрет до 550° и закален в масле
„ № 10 „ „ „ 640° „ „ „ „
„ № 11 „ „ „ 750° „ „ „ „
„ № 12 „ „ „ 850° „ „ „ „

Результаты испытаний на растяжение представлены в следующей таблице.

Таблица III

№ бруска	Предел упругости в атмосферах	Сопротивление разрыву в атмосферах	Удлинение в %	Способ обработки[1]	№ фиг.
8	2700	5 900	19,8	Отожжен при 730°	19
9	3000	6 200	18,1	Закален „ 550°	20
10	5900	7 800	8,1	„ „ 640°	21
11	7900	11 100	5,2	„ „ 750°	22
12	—	12 300	3,8	„ „ 850°	23

Из сравнения этой таблицы испытаний с предыдущей видим, что в последнем опыте эффект закалки оказался сильнее, хотя температуры, при которых совершалась закалка соответственных брусков, были почти одни и те же, только в первом случае закалка совершалась при нисходящих температурах, во втором же при восходящих.

Подобным образом, как раньше, из хвостиков от каждого образца были приготовлены шлифы и вытравлены в азотной кислоте (2 : 100). Структуры этих брусков представлены на фигурах от 19 до 23.

Из них видно, что структура бруска № 9 — фиг. 20, почти ничем не отличается от структуры бруска № 8 — фиг. 19 (оба снимка при увеличении 100). Значит, что при нагревании стали до температур ниже точки рекалесценции A_1, не происходит в сложении ее видимой перемены. Однако это постоянство структуры надо считать только кажущимся вследствие еще недостатка средств для более точных наблюдений. Как известно, закаленная сталь меняет уже свойства после отпуска ее до 200°, поэтому трудно допустить, чтобы с переменой свойств не изменялось частичное сложение. Но во всяком случае эти перемены так ничтожны, что даже большие увеличения микроскопа не дают нам о них ясного понятия.

[1] Истинная температура была в действительности выше указанной. (*Ред.*)

Другое дело, если при нагреве перейдем точку рекалесценции A_1, как показывает фиг. 21 (ув. 100), изображающая собой структуру бруска № 10, закаленного при температуре 640°. Здесь уже в теле сталита произошли большие перемены: волокнистое сложение его стушевалось и местами перешло в игольчатые кристаллы, которых, к сожалению. по их неясности нельзя воспроизвести фотографией. Кроме того, из последнего снимка мы видим, что железиты вместо сплошных сеток, как на фиг. 20, образуют только отдельные пятна и прерывчатые полоски, расположение которых указывает еще на существование разграничений зерен массы. Вероятно, часть этих железитов всосалась и растворилась в углеродистом железе, или точнее сказать, обуглеродилась углеродом разлагающихся сталитов.

Фиг. 22 (ув. 100) представляет структуру бруска № 11, закаленного при 750°, т. е. выше точки A_3. При этих условиях железиты совсем пропали, и если местами видны еще их остатки, то это можно приписать только довольно быстрому нагреву, вследствие чего некоторая часть их не успела разложиться. Вся остальная масса состоит уже из закалитов.

Сравнивая фиг. 22 с фиг. 13, которая дает нам структуру бруска № 3, закаленного при этой же температуре, но при других условиях нагрева, мы замечаем большую разницу в сложении, а также и в свойствах самого металла. Этот пример отлично объясняет нам причины встречаемого часто более или менее крупнозернистого сложения в закаленной стали.

Фиг. 23 изображает структуру бруска № 12, закаленного при 850°. Вся масса бруска состоит из игольчатых кристаллов, т. е. одних закалитов, подобным образом, как и на фиг. 12, с той только разницей, что на снимке фиг. 23 нет очертаний зерен, которые в бруске № 2 успели образоваться во время его остывания от 950—850°.

Из рассмотрения последних 5 снимков можно заключить, что изменения частичного сложения стали при нагреве вполне обратны тем, которые происходят при медленном остывании. В остановке A_1 сталиты и цементиты переходят в другое углеродистое соединение, и при этом разложении отчасти обуглерживается свободное железо, вследствие чего часть железитов пропадает. Главное же преобразование железитов совершается во время остановки A_3. Надо заметить, что все эти преобразования гораздо менее заметны при нагреве стали, чем при остывании.

Познакомившись в общих чертах с теми переменами, которые происходят в структуре стали во время ее нагрева и охлаждения, нам будет легко объяснить себе действие отпуска или же отжига на перемену строения и свойства металла.

Чтобы получить более рельефную разницу в структуре под влиянием отпуска, мы для опыта возьмем тоже полутвердую кованную сталь с содержанием 0,56% углерода, 0,48% марганца и 0,15% кремния.

Пять брусочков (от № 13 до № 17), изготовленных из этой стали, я закалил при температуре 800° и затем:

Брусок № 13 оставлен без отпуска
„ № 14 отпущен до 550°
„ № 15 „ „ 600°
„ № 16 „ „ 680—690°
„ № 17 „ „ 750—760°
„ № 18 „ „ 800°

Результаты механических испытаний помещены в таблице IV.

Таблица IV

№ образцов	Предел упругости	Сопротивление разрыву	Удлинение в %	Площадь зерна в $мм^2$ $\times 10^4$	Способ обработки [1]	№ фиг.
	в атмосферах					
13	7000	10 700	3,1	—	Без отпуска	24
14	6300	8 000	8,1	—	Отпущен до 550°	25
15	5000	7 600	9,8	—	„ „ 600°	26
16	3900	7 000	18,1	30	„ „ 690°	27
17	3200	6 200	17,0	99,5	„ „ 760°	28
18	2900	5 900	14,9	407,2	„ „ 800°	29

Перемена структуры стали этих брусков видна на фиг. от 24 до 29.

Структура бруска № 13 (фиг. 24, увелич. в 500 раз) состоит только из игольчатых кристаллов, пересекающихся в различных направлениях. Структура бруска № 14 представлена на фиг. 25 при линейном увеличении в 100 раз; поэтому нельзя различить игольчатого сложения, но при увеличении в 500 раз это сложение почти ничем не отличается от сложения, изображенного на фиг. 24, потому что вторичный нагрев бруска № 14 не был доведен еще до остановки A_1.

Следующий брусок № 15 после отпуска до 600°, т. е. до начала критической температуры A_1, представляет уже довольно значительную перемену в сложении металла, как видно из фиг. 26 (увеличение в 100 раз). Часть железитов уже выделилась, и при увеличении в 500 раз можно заметить, что вся остальная масса не состоит уже из одних закалитов, но местами образовались из них сталиты.

Брусок № 16 после отпуска [6] до начала остановки A_3 представляет уже другую картину. Сопротивление и упругость сильно упали, но зато удлинение увеличилось вдвое. Микроструктура его состоит из мелких зерен сталита, а железиты сгруппировались в виде мелкой сетки — фиг. 27. Площадь зерна сталита равна 30 : 10 000 $мм^2$.

При отпуске бруска № 17 мы уже перешли за остановку A_3. Поэтому замечаем более обильное выделение железитов — фиг. 28.

[1] Истинная температура была выше указанной (*Ред.*)

Зерно сталита растет и достигает величины 99,5 *мм*² (при квадратном увеличении в 10000 раз), но вместе с тем удлинение падает.

Наконец последний брусок № 18 после отпуска до 800° получает крупнозернистое сложение, в котором средняя площадь зерна сталита достигла 407,2 *мм*² (фиг. 29, увеличение в 100 раз), т. е. увеличилась более чем в 5 раз, против зерна в бруске № 16, и вследствие того вязкость металла сильно уменьшилась.

На основании последних 6 снимков приходим к следующим выводам: во-первых, отпуск стали до рекалесценции A_1 не производит заметной перемены в структуре [7]; во-вторых, наибольшей вязкости сталь достигает при минимуме зерна сталита (что происходит около 700°, т. е. при остановке A_3) и в третьих, при дальнейшем повышении температуры отпуска, вместе с увеличением зерна сталита прочность и вязкость сильно падают.

Теперь проследим влияние отжига на перемену структуры стали.

Для более наглядного представления возьмем сперва литую некованную сталь. С этой целью из диска, отрезанного от литой, некованной, мартеновской болванки с содержанием углерода 0,69% и марганца 0,48%, было приготовлено (из центральных слоев болванки) несколько брусков с хвостиками.

Брусок № 19 испытан в необработанном виде
" № 20 отожжен вместе с хвостиком до 550°
" № 21 " " " " " 680—690°
" № 22 " " " " " 750—760°
" № 23 " " " " " 900°

Механические испытания представлены в таблице V.

Таблица V

№ образцов	Предел упругости	Сопротивление разрыву	Удлинение в %	Способ обработки	№ фиг.
	в атмосферах				
19	2300	4000	2,4	В необработ. виде	30
20	2400	5400	4,7	Отожжен до 550°	31
21	2500	5600	10,4	" " 680—690°	32
22	2600	5700	13,0	" " 750—760°	33
23	2400	5200	11,3	" " 900°	34

На фиг. 30 (увеличение в 100 раз) изображена микроструктура бруска № 19, т. е. сложение, которое имела сталь в центральных слоях болванки. Вследствие очень медленного остывания металла в этом месте, зерна его достигли такой величины, что ни одно не помещается в поле зрения микроскопа, и здесь представлен только один узел сочленений нескольких зерен. Средняя площадь каждого зерна равняется около 10000 *мм*² (при линейном увеличении в 100 раз). В промежутках между плоскостями,

ограничивающими зерна, разместились в большом количестве железиты. Такая группировка и выделение железитов, разумеется, не могли совершиться во время затвердевания стали в болванке; это продукт вторичной перегруппировки или, так сказать, рекристаллизации, которая произошла при гораздо низших температурах; поэтому этот снимок дает только понятие об условиях остывания стали, но никак не о способе ее затвердевания.

Нет сомнения, что при переходе жидкой стали в твердое состояние сперва должны были выкристаллизоваться более тугоплавкие соединения т. е. железиты, и они при этом ни в каком случае не могли образовать оболочек, разграничивающих зерна углеродистого железа, которое по своей легкоплавкости застывает позже.

Следующий брусок № 20 был нагрет до 550° и затем медленно остывал в муфельной печи. Так как температура его нагрева не достигла еще точки ракалесценции A_1, то в структуре его не должно было произойти большой перемены, в чем действительно убеждаемся из фиг. 31. Однако же сопротивление разрыву, предел упругости и удлинение показывают уже увеличение междучастичного сцепления стали.

Третий брусок из этой партии № 21 был нагрет до температуры 680—690°, т. е. приблизительно до начала второй остановки A_3 и медленно охлажден. Здесь, как показывает фиг. 32 видим заметное изменение структуры; зернистое сложение пропало, железиты растворились в углеродистом железе, но местами произошло еще неполное раздробление сплошных полос железитов, потому что мы не перешли еще критической температуры A_3, при которой совершается полное аллотропическое превращение железа. Этот случай ясно указывает, что при отжиге литых вещей надо нагревать сталь выше этой температуры.

Четвертый образец № 22 отожжен при 750—760°. Микроснимок фиг. 33 представляет уже полную перемену сложения стали, совершившуюся во время перехода через всю остановку A_3. Здесь железиты сгруппировались в виде сетки, которая окружает зерна сталитов; средняя площадь зерна равна 63,8 *мм*²: 10 000. Это есть настоящая температура нагрева стальных отливок при отжиге.

Наконец, пятый брусок № 23 был нагрет до 900° и медленно охлажден в муфеле. Механические свойства стали заметно понизились, и строение превратилось в крупнозернистое, как показывает фиг. 34, где средняя площадь зерна сталита достигла 620 *мм*²: 10 000, т. е. увеличилась в 10 раз против зерна предыдущего бруска.

Последние 5 снимков дают нам ясное понятие о перемене структуры литой некованной стали в зависимости от степени отжига. Как из предыдущих фактов, так и из этого последнего опыта видно, что нагрев ниже точки A_1 не производит заметной

перемены строения стали. При дальнейшем повышении температуры отжига структура литой стали изменяется, и вместе с тем увеличивается упругость, сопротивление разрыву и удлинение. Эти величины достигают своего максимума при отжиге до температуры A_3 (точка *b* Д. К. Чернова), что связано также с минимумом зерна сталита. Но для получения таких результатов необходимо продержать сталь при этой температуре несколько часов, чтобы дать время для совершения всех преобразований, а главным образом для распадения и растворения в углеродистой массе таких толстых прослоек железитов, какие видны между зернами сталитов на фиг. 30. Разумеется, для большей уверенности в совершении этих явлений на практике чаще всего температуру отжига для литых вещей доводят немного выше конца остановки A_3 (фиг. 33). Но во всяком случае нельзя много переходить за этот предел, чтобы не вызвать чересчур большой грануляции, как показывает фиг. 34.

Структура литой некованной стали зависит от условий ее остывания как во время, так и после ее затвердевания. Поэтому в одном и том же поперечном сечении болванки сталь имеет различное строение. Наружные слои, как остывающие скорее внутренних, будут иметь более мелкозернистое сложение, чем последние. При быстром остывании стали, отлитой в небольшие изложницы, около наружной корки болванки образуются удлиненные призматические кристаллы, направление которых нормально к поверхностям охлаждения. По мере удаления слоев от наружной поверхности эти кристаллы укорачиваются и, наконец, в центральных частях болванки принимают форму довольно правильных многогранников, как это видно на фиг. 35 и 36, представляющих собой сложение поперечного сечения некованной мартеновской болванки квадратного сечения (сторона квадрата — 10″).

Фиг. 35 (увеличение в 60 раз) показывает микроструктуру шлифа стали, взятой у самой поверхности болванки. Фиг. 36 показывает структуру (увеличение 60) у центра болванки.

Несмотря на небольшое увеличение призматические зерна у наружной поверхности достигли такой величины, что не помещаются в поле зрения микроскопа.

Отжигом до температуры A_3 можно совершенно уничтожить эту призматическую грануляцию, как показывает фиг. 37. Этот снимок изображает сложение наружных слоев этой же болванки уже отожженной до 730°. Структура приняла вид хорошо отожженной стали без следов продолговатых кристаллов. Но иногда некоторые неблагоприятные обстоятельства так сильно развивают призматическую грануляцию в поверхностных слоях болванки, что даже отжиг не в состоянии переменить этого сложения (фиг. 38).

Посмотрим теперь, как изменяется структура литой стали от действия ковки.

Из диска некованной болванки (диаметром 24″) тигельной стали с содержанием углерода 0,65% вырезано 2 образца, из кото-

рых № 24 оставлен без дальнейшей обработки (фиг. 39, увеличение 100); второй же образец № 25 отожжен до 780° (фиг. 40).

После проковки болванки до 9″ отрезали диск, из которого было приготовлено 2 образца: один № 26 из центра диска, другой № 27 от наружной поверхности.

Механические испытания представлены в следующей таблице VI.

Таблица VI

№ образца	Предел упругости	Сопротивление разрыву	Удлинение в %	Способ обработки	№ фиг.
	в атмосферах				
24	2300	5200	5,8	В сыром виде	39
25	2800	5800	14,8	Отожженный до 780°	40
26	2900	5800	16,1	Кованный центральн.	41
27	3200	6000	17,8	Кованный наружн.	42

Сравнивая структуру некованного отожженного бруска фиг. 40 со структурой кованного — фиг. 41, мы видим, что сложение их почти одно и то же, кроме того, и механические испытания почти одинаковы. Но так как остывание отожженного бруска происходило медленнее и спокойнее, то железиты образовали более правильную сетку, между тем, как в кованном они раздроблены и разбросаны в беспорядке. Структура бруска фиг. 42 от наружной поверхности кованной болванки более мелкозерниста, чем от внутренней — фиг. 41, потому что при конце ковки наружные слои болванки имели температуру гораздо ниже, чем внутренние и, вероятно, около A_1; вследствие этого дальнейшие частичные преобразования металла после окончания ковки прекратились.

Для примера представим еще разницу в сложении литой некованной и прокованной стали с содержанием углерода 0,49%. Структура первой изображена на фиг. 43 (увеличение 100 раз); второй же — на фиг. 44.

Познакомившись в общих чертах с явлениями, происходящими в сложении стали во время ее медленного и быстрого остывания, а также во время нагрева до различных температур, посмотрим теперь, как изменяется микроструктура стали от содержания углерода.

Для этой цели я подобрал несколько кусков кованной стали с различным содержанием углерода. Из них были выточены (для испытания на прессе) цилиндрические бруски с хвостиками. Все бруски вместе были положены в муфельную печь и отожжены до 780°, т. е. выше точки *b*. Результаты механических испытаний представлены в таблице VII.

Таблица VII

№ образца	C в %	Mn в %	Предел упругости	Сопротивление разрыву	Удлинение в %	№ фиг.
			в атмосферах			
28	0,25	0,48	2000	4000	29,1	—
29	0,37	0,35	2300	4800	26,9	—
30	0,45	0,30	2500	4900	24,8	45
31	0,53	0,40	2600	5900	20,4	—
32	0,60	0,41	2800	6000	18,6	46
33	0,72	0,42	3000	6200	18,1	47

При C = 0,25% все поле зрения заполнено почти исключительно одними железитами, которые разъединены между собой тонкими волокнами сталита.

С увеличением углерода на 0,1% (до 0,37% — *ред.*) общая площадь железитов уменьшается и, наоборот, увеличивается площадь сталитов. То же самое явление видим и при дальнейшем увеличении углерода на 0,1% (C = 0,45%) — фиг. 45.

В стали с 0,6% C сталиты образовали отдельные зерна, окруженные оболочками железитов, которые на шлифе представляют сплошную многоугольную сетку (фиг. 46), наконец, при содержании 0,72% C сталиты представляются в виде больших правильных многоугольников, окаймленных тоненькой оболочкой железита (фиг. 47).

После сравнения этих последних (результатов — *ред.*) мы можем сделать следующие заключения: с увеличением содержания углерода количество сталита постепенно растет, а вместе с тем увеличиваются предел упругости и сопротивление разрыву, но удлинение падает; железиты в мягких сортах стали группируются в виде многогранных зерен, форма которых тем правильнее, чем мягче сталь. В более же твердых сортах стали, начиная с 0,5% углерода, железит образует сетку, разделяющую зерна сталита. Наконец, при одной и той же температуре отжига величина зерна сталита зависит от твердости стали.

Площадь поперечных сечений зерен сталита, начиная с 0,5% C, легко измеряется посредством планиметра. Для этой цели лучше всего перенести контуры нескольких зерен на вощеную бумагу, измерить общую площадь посредством планиметра и, разделяя результат на число зерен, получим среднюю площадь зерна.

В более мягких сортах стали производить эти измерения гораздо затруднительнее, потому что для определения площади, занимаемой сталитами, надо из общей площади зерен вычесть площадь, занимаемую железитами, или же наоборот.

Для проверки только что упомянутых выводов проследим

еще микроструктуру пудлинговой стали с различным содержанием углерода.

Фиг. 48	содержание	углерода	от	0,1% до 0,2%
„ 49	„	„	„	0,2% „ 0,3%
„ 50	„	„		около 0,4%
„ 51	„	„	„	0,5% до 0,6%
„ 52	„	„	„	0,6% „ 0,7%
„ 53	„	„	„	0,7% „ 0,8%

Эти снимки в зависимости от твердости стали представляют то же самое распределение железитов и сталитов, как и предыдущие. На фиг. 50 железиты приняли вид продолговатых полосок под влиянием действия вальцовки. На фиг. же 53 они разместились в виде мраморных узоров, а между ними видны, даже при увеличении в 100 раз, цементиты в раздробленном состоянии.

Из нескольких этих примеров видно уже довольно ясно, как изменяется структура стали от содержания углерода. При некоторой опытности по данному снимку можно бы даже определить с небольшой ошибкой, сколько углерода заключается в данном образце стали. Но однако я далек от мысли считать представленный ряд снимков достаточным для приблизительного хотя бы определения содержания углерода. Для лучшего сравнения здесь взяты были образцы с различным содержанием углерода, но почти с одними и теми же количествами других примесей; кроме того, они все отжигались вместе при одних условиях. Другое дело, если возьмем кусок стали с неизвестным нам способом обработки, т. е. если не знаем, закален ли он или отпущен и при каких температурах, а это, как уже известно, сильно влияет на количество выделившихся железитов и сталитов и относительную их группировку. Поэтому, чтобы можно было микроскопическим анализом пользоваться для определения содержания углерода, надо бы сперва рассмотреть под микроскопом целый ряд образцов с разным содержанием углерода, обработанных при различных условиях нагрева и охлаждения.

Составить такую шкалу не представляло бы еще больших затруднений и это отчасти уже осуществлено, но к несчастью она очень неполна и неточна, потому что на практике встречаемся с некоторыми непреодолимыми препятствиями, а именно посторонние примеси в стали сильно влияют на ее микроструктуру. Добавлю, что, к большому сожалению, этот вопрос как чисто лабораторный труд, которым надо бы специально заняться, не по силам для тех металлургов, на которых лежат еще и другие заводские обязанности.

Несмотря на то, что некоторые металлурги усердно работают над определением, посредством микроскопа, влияния различных посторонних примесей на сложение стали, однако, не имея еще достаточных и верных данных для вывода более положительных заключений, я ограничусь пока углеродом и указанием на влияние никеля и серы.

Раньше мы видели, что в литой некованной болванке, отлитой из обыкновенной стали, при ее остывании железиты выделяются и распределяются в виде довольно однородной сетки (фиг. 30), которая окружает зерна углеродистого железа. То же самое явление замечается и при остывании стали с примесью никеля, только здесь выделившиеся железиты принимают другой вид.

Так например, на фиг. 54, представляющей структуру никелевой некованной стали с содержанием 0,25% C и 2% Ni, мы видим, что железитовые оболочки своими разветвлениями, как бы гвоздями, соединяют между собой зерна сталита.

Чем большее количество никеля находится в стали, тем сильнее увеличивается эта связь между отдельными зернами, в которые тем глубже проникают разветвления железитов, как показывает структура некованной никелевой стали с содержанием 3% Ni и 0,3% C (фиг. 55).

На фиг. 56 мы видим еще более сильное влияние 4% Ni, разветвления железитов разделили здесь зерна сталитов на мелкие части. Вид этих последних и их относительная твердость указывают, что железиты не состоят из чистого железа, а представляют соединения с никелем. Спайность между лучами и зернами небольшая; при линейном увеличении в 100 раз замечаются уже слабые места разделения зерен. Эта сталь очень тверда и хрупка.

Чтобы ближе познакомиться со структурой никелевой стали, посмотрим как изменяется ее сложение под действием ковки, нагрева и закалки.

Из никелевой (с 3% Ni) болванки, структуру которой мы видели на фиг. 55, откован брусок и из него изготовлено 7 образцов. Образец № 34 оставлен без дальнейшей обработки, остальные же шесть (от № 35 до № 40) были нагреты до температуры 780°, затем закалены в воде и отпущены до различных температур. Механические испытания этих образцов помещены в следующей таблице VIII.

Таблица VIII

№ образца	Предел упругости	Сопротивление разрыву	Удлинение в %	Способ обработки	№ фиг.
	в атмосферах				
34	2700	5200	16,8	Кованный	57
35	6000	7200	14,8	Зак. при 780 отп. до 550°	58
36	5200	6800	15,1	„ „ 780 „ „ 600°	59
37	4800	6400	15,8	„ „ 780 „ „ 680°	60
38	3600	5500	19,1	„ „ 780 „ „ 710°	61
39	3000	5400	22,2	„ „ 780 „ „ 750°	62
40	2500	4800	15,3	„ „ 780 „ „ 800°	63

Микроструктура кованного образца представлена на фиг. 57. Сравнивая ее с фиг. 45, которая изображает сложение такой же

твердости (по углероду) стали обыкновенной, мы видим заметную разницу. В обыкновенной стали зерна железита более правильной формы, в последнем же случае они удлинены и бесформенны.

Фиг. 58 (увелич. в 100 раз) изображает микроструктуру бруска № 35, закаленного при 780° и отпущенного до 550°. При более значительном увеличении можно видеть, что строение закалитов немного отличается от строения закалитов обыкновенной стали, они тоже игольчатого сложения, только иголки гораздо короче и толще. Местами встречаются (включения — *ред.*) железитов, которые не успели еще (выделиться — *ред.*) при отпуске до 550°, т. е. эта температура еще недостаточна для полного разложения в такой мягкой стали.

Брусок № 36 был закален при 780° и отпущен до 600°. Здесь уже часть выделившихся железитов (фиг. 59) ясно заметна, вследствие чего предел упругости сильно понизился. Вследствие увеличения температуры отпуска до 680° в бруске № 37 эти явления оказываются еще более резкими, как видно на фиг. 60.

Брусок № 38 закален при 780° и отпущен до 710°, т. е. до максимума остановки A_3. Структура этого бруска совершенно изменилась в сравнении с предыдущими; почти все закалиты перешли в железиты, которые разбросаны в полном беспорядке, как бы пучки сена на фоне сталитов (фиг. 61).

На фигуре 62, изображающей структуру бруска № 39, отпущенного до 750°, все железиты сформировались в виде сетки с сильно развитыми отростками, входящими во внутрь зерен сталита.

Наконец, последний образец, отпущенный до 800°, представляет уже все свойства сильно отожженной стали. Предел упругости, сопротивление разрыву и вязкость металла понизились, вследствие увеличения зерен сталита, средняя площадь которых достигла 800 *мм*² (при увеличении в 100 раз, фиг. 63).

Рассматривая изменения в строении никелевой стали этих последних 7 снимков, мы приходим к тому же заключению, которое вывели раньше из различного отпуска образцов закаленной обыкновенной стали; но в обыкновенной стали железиты образуют многогранную сетку только в сортах, содержащих не менее 0,5% углерода, тогда как даже при 0,2% С никелевая сталь дает уже такую же сетку. Это обстоятельство наводит на мысль, что сеткообразные железиты состоят не из чистого железа, а в зависимости от сорта стали представляют более или менее богатое углеродом соединение; в частных же случаях они представляют соединение железа с никелем, марганцем или с другой посторонней примесью. От этого то и твердость самых железитов изменяется в зависимости от сорта стали. Разветвления железитов в никелевой стали до того характерны, что зная строение вышеупомянутых образцов, можно безошибочно определять присутствие никеля в стали. Такое разветвление железитов в зернах сталитов придает никелевой стали большую вязкость и тягучесть.

С другой стороны, при застывании в изложнице получаем более значительное лучистое (призматическое) сложение наружных слоев в болванке из никелевой стали, чем из обыкновенной, и иногда даже сильным отжигом нельзя уничтожить этого сложения, как показано на фиг. 64, изображающей собой структуру некованной отожженной мартеновской стали с 2% Ni и 0,4% C. Однако ковка, как видно на фиг. 65, переменяет почти совершенно эту структуру.

Иногда эта наклонность к лучистому сложению до того сильно развивается в наружных слоях болванки никелевой стали, что ослабляется связь между призматическими гранулями и достаточно самых ничтожных препятствий при сжимании наружной корки болванки во время ее остывания в изложнице, чтобы нарушилось сцепление между отдельными пучками гранулей и появились трещины на поверхности болванки.

До сих пор существовало мнение, что влияние серы на сталь ограничивается только дурными последствиями при ее обработке в нагретом состоянии, т. е. что от присутствия серы металл делается красноломким. Небольшие количества этого металлоида до 0,04% действительно не оказывали видимого вреда при ковке и допускались всегда с чистой совестью. Даже в некоторых учебниках по металлургии признается, что для фасонных отливок незначительные количества серы даже полезны, потому что такой металл более жидок и лучше выполняет формы при отливке.

Однако химические и микроскопические исследования Андрюса над различными поломками локомотивных осей, бандажей, рельсов и гребных валов позволяют считать, что главной причиной этих несчастных случаев было присутствие серы даже в очень незначительных количествах. Он находил, что сернокислые соли железа или сульфид марганца (в случае присутствия избытка последнего) собираются в сочленениях и ослабляют связь между зернами стали. На полированных шлифах эти соединения серы представляются в виде частых мельчайших трещинок или язвинок, число которых на 1 кв. дюйме доходит иногда до 100 штук.

Во время продолжительной работы, а особенно при сотрясениях эти трещины увеличиваются и ослабляют междучастичную связь, вследствие чего и происходят поломки стальных частей. Не имея пока возможности проследить этот факт, потому что обуховская сталь не содержит серы, я ограничусь только представлением копии снимков Андрюса [1].

Фиг. 66 изображает сложение стали с 2% S, где черные зигзаги состоят из сернистого железа; фиг. 67 — сталь с 0,25% S; фиг. 68 — сталь с 0,03% S; фиг. 69 — сталь с 0,02% S.

На последних двух фигурах темные пятнышки указывают на присутствие серы, которая и была причиной поломки стали.

[1] Andrews, Microscopic internal flaws inducing fractur in steel, London 1896.

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПОРОКИ СТАЛИ

Кроме серы, которая образует пороки и вследствие этого вредно действует на качества стали, есть еще много других мало исследованных причин, вызывающих различные недостатки в этом металле.

Оставляя в стороне все те пороки, которые можно видеть невооруженным глазом, как, например, усадочные раковины, газовые пузыри, трещины в болванках и т. п., скажем несколько слов относительно микроскопических пороков, которые, несмотря на свою ничтожную величину, причиняют тоже большой вред для прочности стали.

Большей частью причины поломок различных машинных частей, рельсов, валов и т. п. оставались невыясненными вследствие того, что на глаз в изломе не замечалось никаких пороков. Точно такие же обстоятельства встречаются при испытании брусков на растяжение и изгиб; очень часто при этом получается малая вязкость и тягучесть металла, хотя излом брусков не показывает ничего особенного. Однако микроскоп и здесь может принести большую услугу, указывая нам, что причиной поломки служат мельчайшие междучастичные трещинки или пустоты, которые ослабляют связь между зернами стали.

Эти зловредные микробы действуют на организм металла не столько своей величиной, сколько массой, и несмотря на то, что они иногда находятся в громадном количестве, их нельзя заметить на поверхности излома даже при помощи лупы.

Для примера укажу случай поломки вала, изготовленного на одном из германских заводов для электрической машины в Москве. Хотя химический состав металла вполне удовлетворял назначенной цели и, повидимому, излом был без пороков, но, однако, микроскопическое исследование обнаружило, что вся поверхность шлифа усеяна мельчайшими чечевицеобразными язвинками, которых я насчитал на одном кв. сантиметре 22 штуки, т. е. около 130 штук на кв. дюйме. Фиг. 70 представляет один из тех пороков при увеличении в 500 раз. Нет сомнения, что эти пороки были причиной поломки вала, тем более, что по наружному виду большинство их похожи на микротрещины, хотя анализ не показал присутствия серы.

Форма поперечного сечения микроскопических пороков бывает или продолговатая (чечевицеобразная), или круглая, или, наконец, в виде бесформенных пятен. Первая из них преобладает в кованных изделиях, что следует приписать деформации пороков во время ковки, которая вытягивает их по одному направлению, как указывает фиг. 71. Однако иногда, несмотря на вытягивание тела металла во время ковки, очертание пороков остается как бы неизменным. Так, например, из фиг. 72 видно, что газовый пузырек удержал свою первоначальную форму, или же на фиг. 75, где видно скопление круглых (шарообразных)

ямочек. В литой некованной стали эти ямки чаще всего имеют вид бесформенных пятен, разбросанных между зернами металла (фиг. 43).

Иногда эти ямочки бывают заполнены посторонними телами или просто шлаками, которые по своей твердости истираются при полировке труднее, чем окружающий металл, и поэтому они образуют на шлифе выступы, как показано на фиг. 70.

Однако чаще всего эти пороки состоят из пустых ямочек и тогда при полировке они заполняются частичками крокуса, которые необходимо удалить кисточкой во время промывки шлифа.

Заполненные ямки, вероятно, происходят или от запутавшихся в жидком металле частичек шлака, который не успел всплыть на поверхность, или же от неравномерного распределения в массе металла какой-нибудь посторонней примеси, как, например: серы, фосфора, марганца, кремния и т. п. В зависимости от обстоятельств эти последние могли остаться в чистом виде или в присутствии окислов железа превратиться в окиси, или же образовать силикаты.

Вследствие незначительного количества и неравномерного распределения посторонней примеси в металле, очень часто невозможно определить химическим анализом ее присутствие. Для точного исследования состава тела, заключающегося в ямочках, следовало бы выскоблить его под микроскопом посредством острия иголки, но исполнить это почти невозможно.

В некованной стали эти посторонние тельца располагаются чаще всего в промежутках между зернами металла, т. е. в местах, где разместились выделившиеся железиты, как показывает фиг. 43, и таким образом они нарушают связь между зернами сталитов. После обработки болванки под молотом или после отжига выделившиеся железиты располагаются кругом ямочек в виде сетки (фиг. 73) или же окружают их красивым ореолом, как показано на фиг. 74.

В закаленной стали посторонние тельца помещаются между группами игольчатых кристаллов, т. е. в пространствах, которые уже сами по себе представляют слабые места, и вследствие этого увеличивается хрупкость закаленного металла.

Подобного рода недостатки представляют также пустые ямочки (пузырьки), которые происходят от выделения газов во время остывания жидкой стали в болванке.

Не вдаваясь в подробное объяснение причин образования и выделения газов в жидком металле, упомяну только, что при получении литой стали какими бы то ни было заводскими способами, железо находится всегда в соприкосновении с атмосферным воздухом или печными газами, которые его окисляют, и образовавшаяся при этом закись растворяется в жидком металле. Таким образом кислород окислов и находящийся в стали углерод непрерывно действуют друг на друга и образуют окись углерода, которая и выделяется. Кроме того, как известно, сталь

в расплавленном состоянии поглощает значительное количество водорода и азота.

Эти газы удерживаются в металле вследствие их растворения, сгущения, прилипания, а также вследствие образования с железом химического соединения. Часть их выделяется и освобождается при отливке стали, не оказывая никакого влияния на плотность и качество металла. Другая часть выделяется во время затвердевания стали и образует газовые пузыри, располагающиеся чаще всего у наружной поверхности, а иногда и внутри тела болванки. Остальная же часть находится в растворенном состоянии и после затвердения болванки не причиняет металлу никакого вреда.

При некоторых особенных обстоятельствах, как, например, при очень стылой стали, а тем более в присутствии окислов железа в жидком металле, иногда получается ряд пузырьков в виде мельчайших шариков. Во время обработки под молотом или вальцами эти пузыречки принимают продолговатый вид и под микроскопом представляются в виде пунктирных штрихов, как показано на фиг. 71. Но иногда даже после обработки они сохраняют свою шарообразную форму, и располагаясь друг около друга, образуют рыхлую губчатую массу, дурно влияющую на качество металла. Такого рода недостаток показывает фиг. 75.

При отпуске или отжиге металла выделившиеся железиты окаймляют контуры пузырьков и располагаются кругом них, как это видно на фиг. 76.

Всякие же надрывы или трещины, которые происходят в металле готовых изделий от действия внешних сил, образуются независимо от расположения элементов структуры стали и чаще всего пересекают тела железитов, как указывает фиг. 77.

Здесь ясно видно, что это не порок литой стали, а только трещинка, образовавшаяся в металле от действия внешних усилий.

Все эти микроскопические пороки представляют собой больные места металла и оказывают громадное влияние на его прочность, как указывает следующая таблица IX, где помещены результаты испытаний на растяжение брусков, в которых были замечены вышеуказанные пороки.

Таблица IX

№ фиг.	Предел упругости	Сопротивление разрыву	Удлинение в %
	в атмосферах		
71	4200	7100	6,6
72	4800	7600	3,5
73	3500	6500	9,0
74	2800	5800	5,1
75	2700	5600	3,8

Сравнительно небольшое еще количество собранных данных относительно микроскопических недостатков стали не позволяет мне высказать более положительных заключений относительно их происхождения. Этот вопрос в настоящее время составляет главную задачу моих исследований.

Необходимо, однако, предупредить начинающих работать с микроскопом, что очень часто вначале, вследствие неправильной полировки, получается на отполированных поверхностях множество ямок в виде уколов булавки или запятых, которые могут ввести в заблуждение. В таких сомнительных случаях необходимо шлиф снова протереть с мелким наждаком и во время этой работы внимательно наблюдать под лупой, как уничтожаются эти язвинки.

МИКРОСТРУКТУРА ЧУГУНА

Чтобы иметь более полную картину микроструктуры железных продуктов, прилагаем еще несколько снимков сложения различных чугунов.

Фиг. 78 и 79 представляют структуру чугуна, рафинированного в бессемеровской реторте и отлитого в маленькую цилиндрическую формочку, где металл остывал довольно быстро. Излом отлитого цилиндрика имел лучистое сложение серовато-белого цвета. Химический состав: C = 4,2%, графит = 0,2%, Mn = 0,21%, Si = 0,17% и P = 0,03%.

Темные места на рисунках изображают собой сталиты, которые выкристаллизовались в виде разрывчатых, елкообразных кристаллов. Этого рода кристаллы встречаются в усадочных раковинах чугунных и стальных отливок. На нижеследующей фигуре 84 представлен елочный кристалл из усадочной раковины стальной болванки. Они представляют склелеты октаэдров, для полного образования которых нехватило как будто металла и выкристаллизовались только его главные оси. Каждый из отростков елочного кристалла представляет собой тоже елочный кристалл, от которого опять идут новые отростки. Иногда в чугунных отливках вся внутренняя поверхность усадочной раковины усеяна густым лесом елочек, т. е. неполных октаэдров, между которыми встречаются целые груды вполне образовавшихся правильных октаэдров.

Из снимков на фиг. 78 и 79 можно заметить, что в теле рафинированного чугуна находится бесчисленное количество елочных кристаллов, которые расположились без всякой системы и в полном беспорядке. Плоскость шлифа разрезала эти кристаллы по различным направлениям относительно их главных осей. Некоторые из них скрещиваются между собой, другие как будто неполные, обломаны, и обломки их разбросаны по сторонам. Это показывает, что во время наполнения формы жидким металлом, выкристаллизовались сперва более тугоплавкие углеродистые соединения в виде разрывчатых кристаллов.

Охлаждение жидкого металла происходит главным образом от стенок изложницы и поэтому первоначальный рост этих кристаллов совершался по направлению нормальному к охлаждающим поверхностям. Однако движением массы жидкого металла в момент отливки и в некоторый промежуток после нее положение елочек изменилось; они перемещались, соединялись, искривлялись и обламывались, пока не застыли в более легкоплавкой остальной массе чугуна.

Такое явление послужило Д. К. Чернову основой для его теории относительно застывания стали в болванке[1]. По его мнению затвердевание стали в болванке совершается образованием и разрастанием таких же разрывчатых кристаллов.

Однако елочное сложение замечается только в некоторых сортах чугуна, как, например: в рафинированном белом, в алюминиевом с 10% Al, фиг. 80, а иногда еще у самой наружной корки болванки сильно фосфористой стали; при исследовании же шлифов, взятых из разных мест болванки обыкновенной стали, подобного сложения никогда не встречается, кроме только мест, где металл застывал последним, т. е. в усадочных раковинах верхней части болванки. Хотя с другой стороны, наблюдаемая под микроскопом структура литой болванки, как было выше упомянуто, есть уже продукт вторичной перегруппировки частиц, которые могли укладываться при застывании совсем в другом виде и порядке, однако местоположение елочных кристаллов в стальной болванке, обильное их присутствие в теле рафинированного чугуна и, наконец, их химический состав прямо показывают, что эта форма кристаллизации свойственна только некоторому углеродистому соединению железа, более легкоплавкому, чем то, которое могло выкристаллизоваться в первый момент затвердевания стали в болванке.

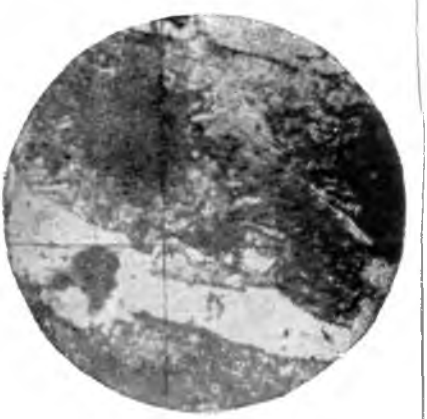
На фиг. 81 представлен микроскопический снимок шлифа зеркального чугуна с содержанием около 12% Mn (увеличение в 100 раз). Как было выше указано, при застывании рафинированного чугуна сперва образовались елочные кристаллы, здесь же выкристаллизовались в различных направлениях цельные прослойки в виде прямолинейных пластинок, которые пересекаются между собой чаще всего под определенным углом (около 60°). Образовавшиеся пластинки окружили собой целые пространства, заполненные вначале жидким металлом, который, независимо от общей массы, застывал самостоятельно в каждом отдельном пространстве и образовал более или менее значительные усадочные пустоты.

В чугунных и стальных отливках поверхности усадочных раковин покрыты чаще всего елочными кристаллами, между тем в зеркальном чугуне на этих поверхностях видны сотообразные

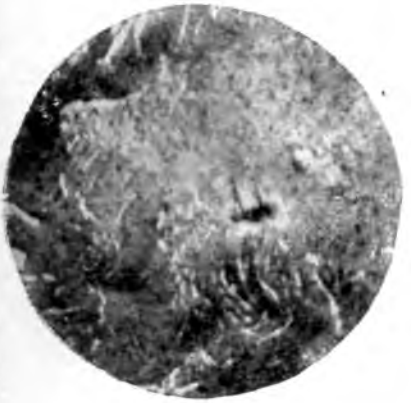
---

[1] Чернов Д. К., Исследования, относящиеся до структуры литых стальных болванок. Сообщение в Русском техническом обществе 2 декабря 1878 г.

Фиг. 1. × 100.



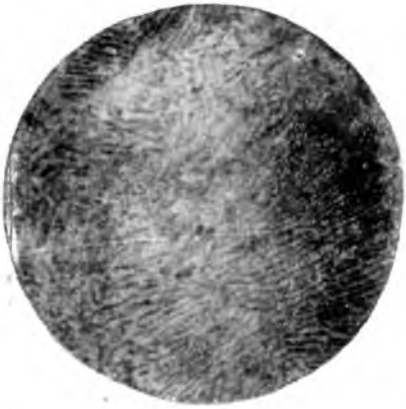
Фиг. 2. × 100.



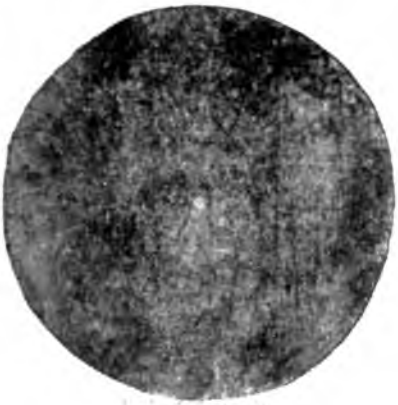
Фиг. 3. × 600.

Фиг. 4. × 600.

6129

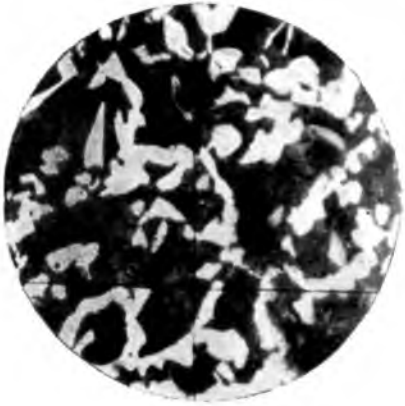


Фиг. 5. × 600.



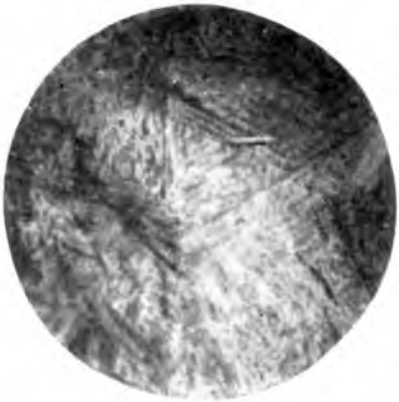
Фиг. 6. × 600.

Фиг. 7. × 100.



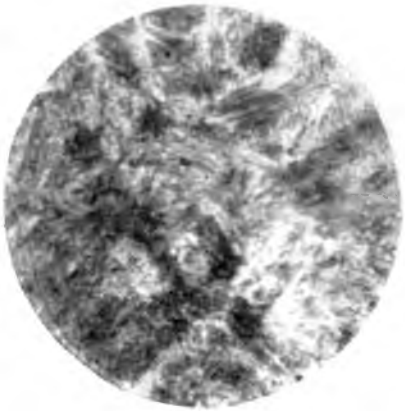
Фиг. 8. × 100.

Фиг. 9. × 100.

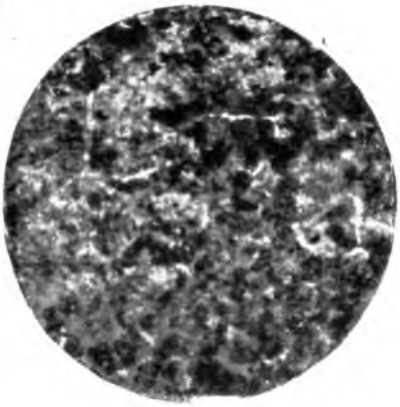


Фиг. 10. × 800.

Фиг. 11. × 800.



Фиг. 12. × 500.

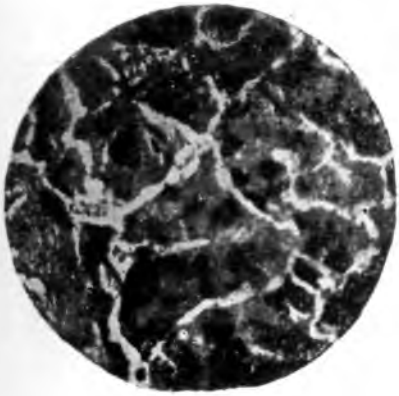


Фиг. 13. × 100.

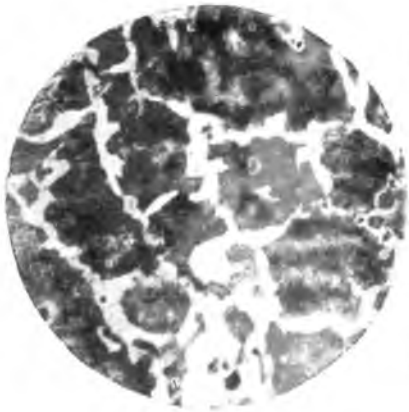
Фиг. 14. × 500.

Фиг. 15. × 500.

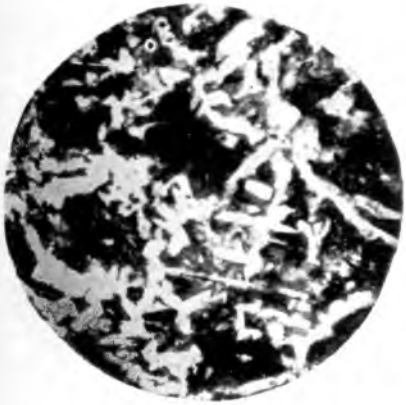
Фиг. 16. × 500.



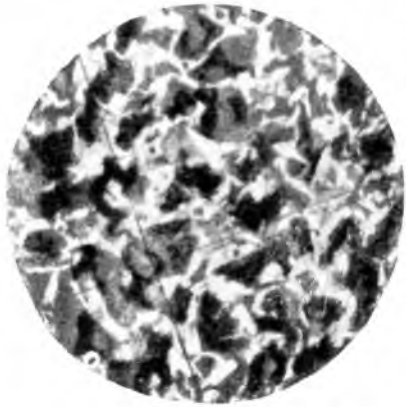
Фиг. 17. × 100.



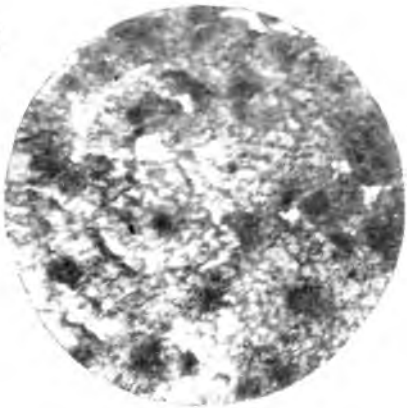
Фиг. 18. × 100.



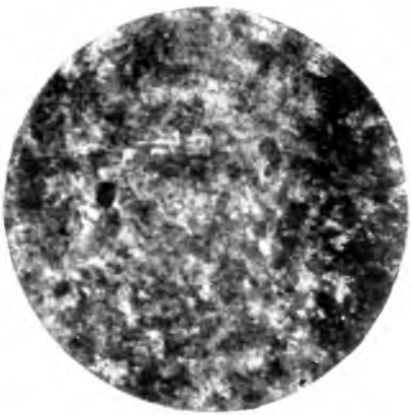
Фиг. 19. × 100.



Фиг. 20. × 100.

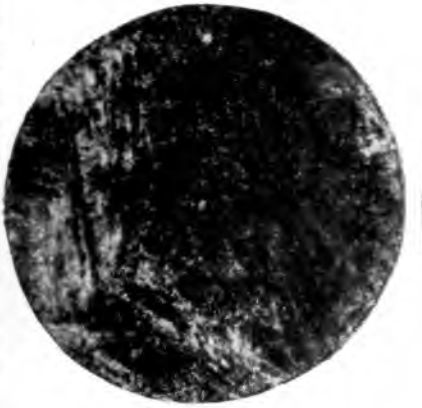


Фиг. 21. × 100.

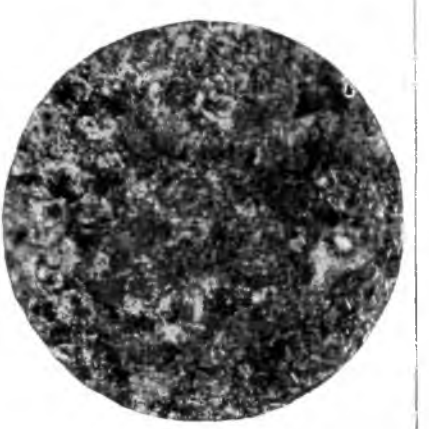


Фиг. 22. × 100.

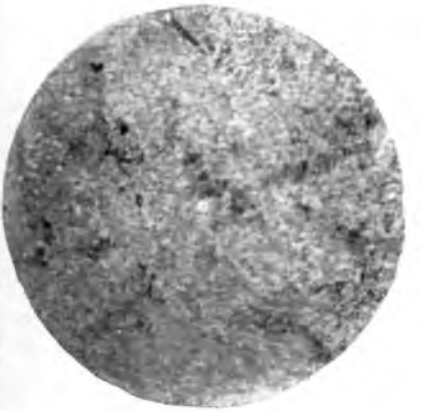
Фиг. 23. × 100.



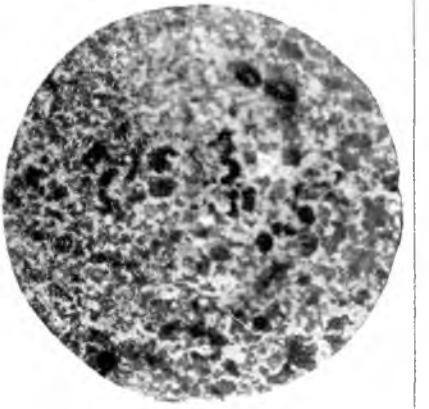
Фиг. 24. × 500.



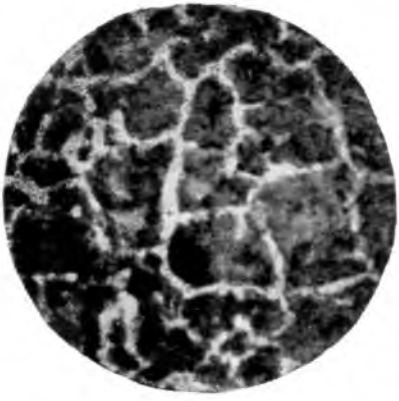
Фиг. 25. × 100.



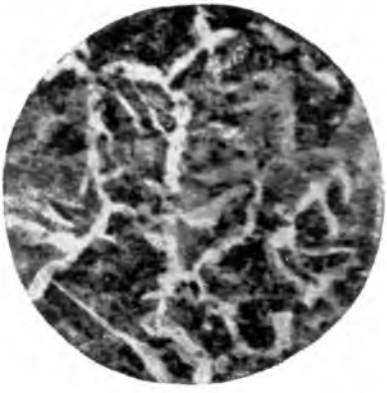
Фиг 26. × 100.



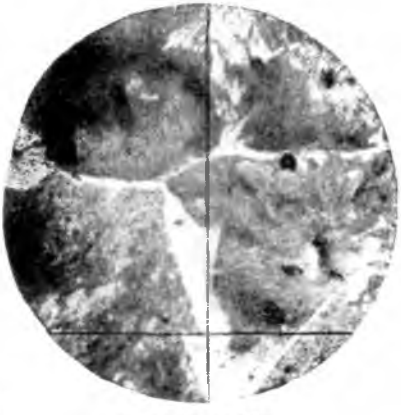
Фиг. 27. × 100.



Фиг. 28. × 100.

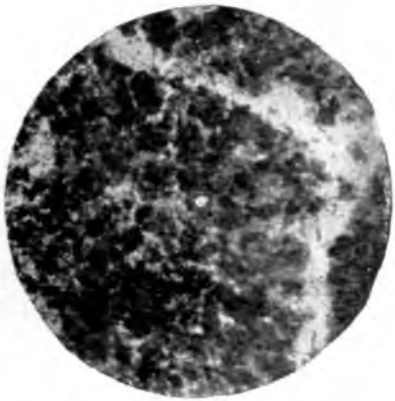


Фиг. 29. × 100.

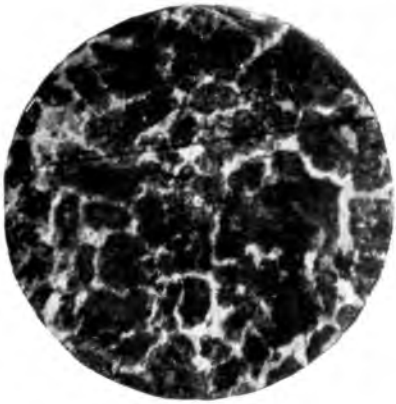


Фиг. 30. × 100.

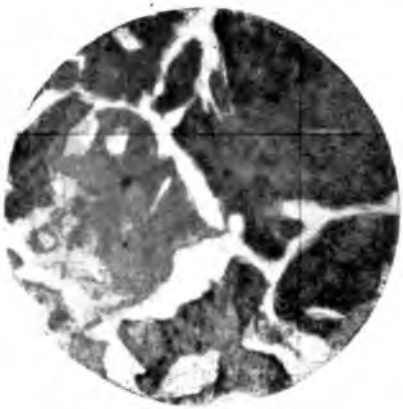
Фиг. 31. × 100.



Фиг. 32. × 100.



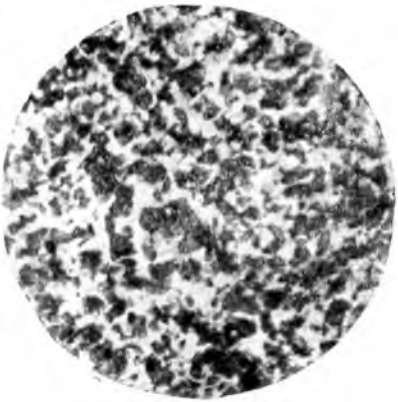
Фиг. 33. × 100.



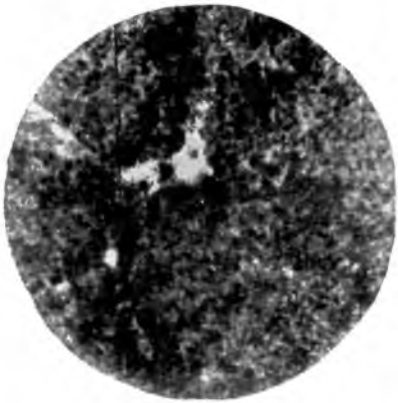
Фиг. 34. × 100.

Фиг. 35. × 60.

Фиг. 36. × 60.

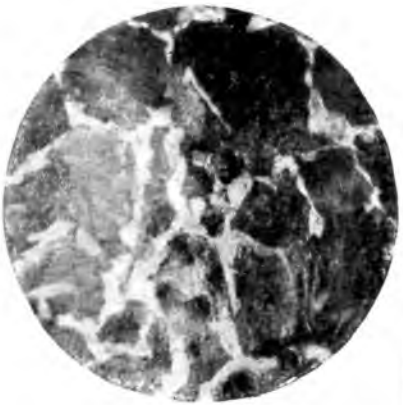


Фиг. 37. × 100.



Фиг. 38. × 100.

Фиг. 39. × 100.



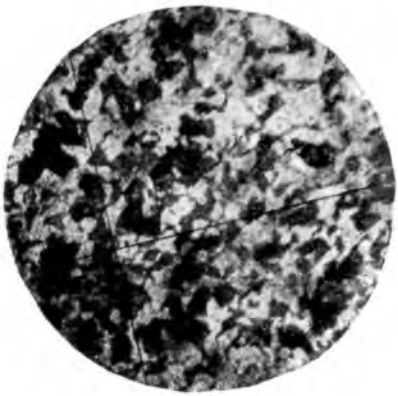
Фиг. 40. × 100.

Фиг. 41. × 100.

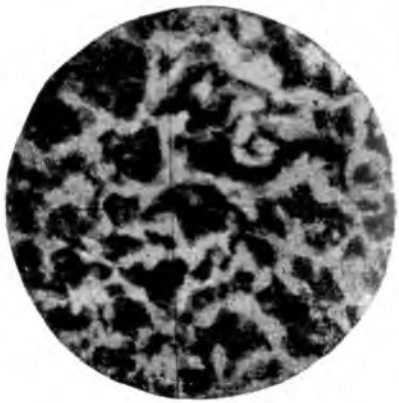
Фиг. 42. × 100.

Фиг. 43. × 100.

Фиг. 44. × 100.

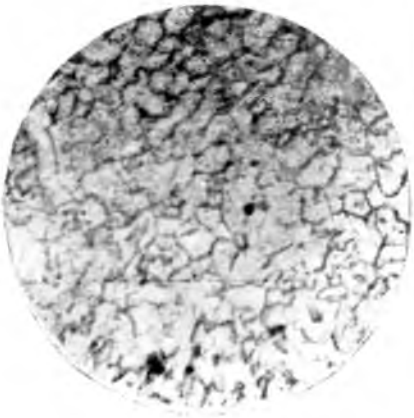


Фиг. 45. × 100.

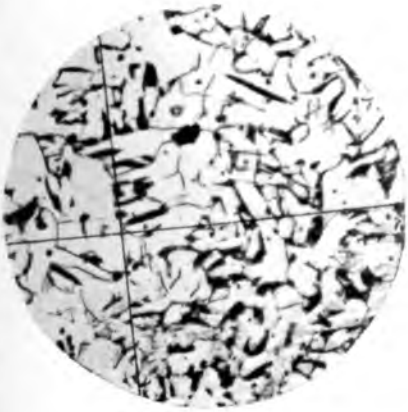


Фиг. 46. × 100.

Фиг. 47. × 100.



Фиг. 48. × 100.



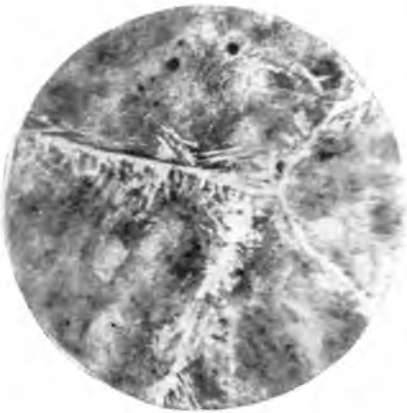
Фиг. 49. × 100.

Фиг. 50. × 100.

Фиг. 51. × 100.

Фиг. 52. × 100.

Фиг. 53. × 100.

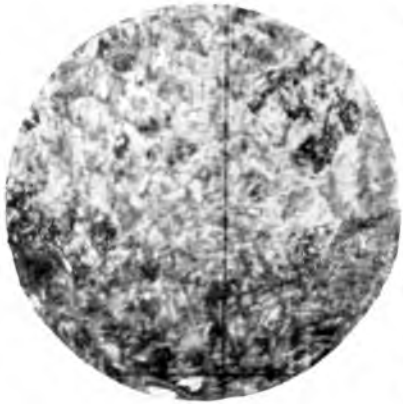


Фиг. 54. × 100.

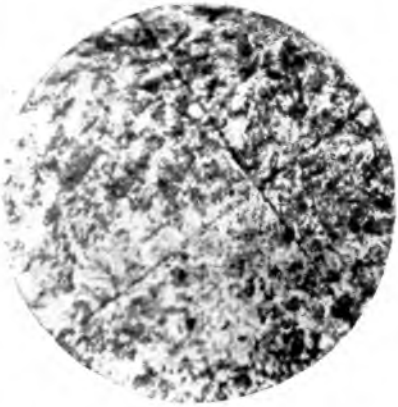
Фиг. 55. × 100.

Фиг. 56. × 100.

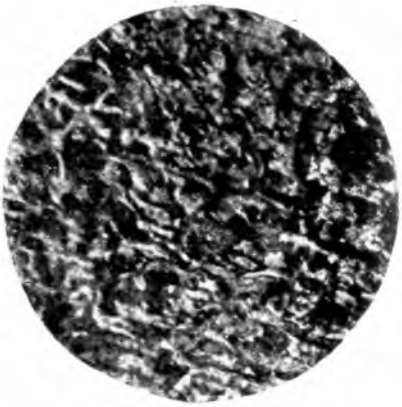
Фиг. 57. × 100.



Фиг. 58. × 100.



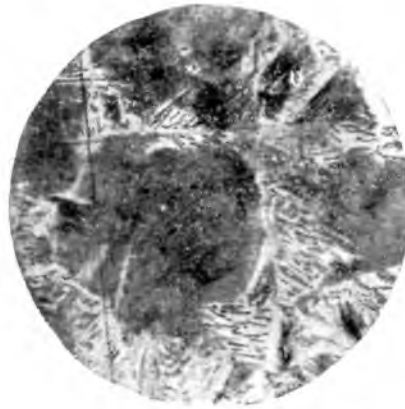
Фиг. 59. × 100.



Фиг. 60. × 100.

Фиг. 61. × 100.

Фиг. 62. × 100.

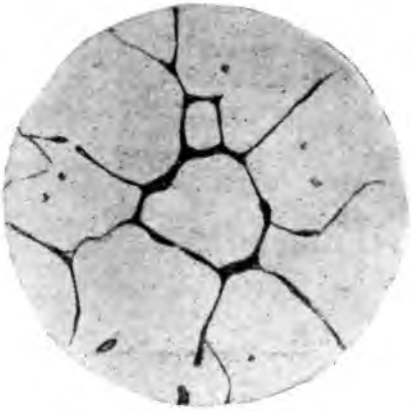


Фиг. 63. × 100.

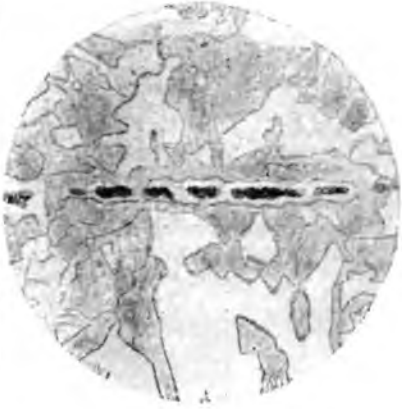
Фиг. 64. × 100.

Фиг. 65. × 100.

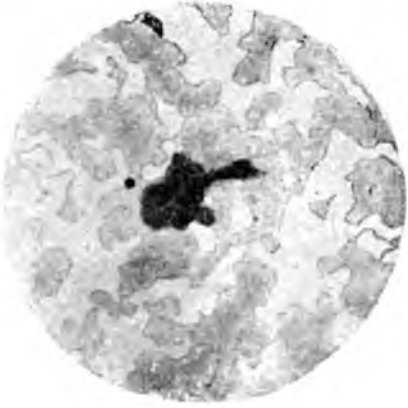
Фиг. 66. × 250.



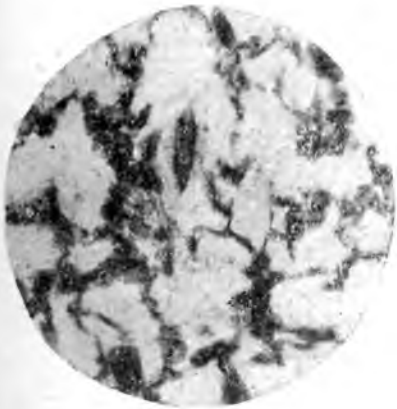
Фиг. 67. × 300.



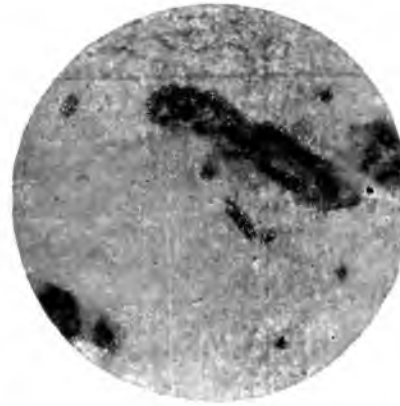
Фиг. 68. × 300.



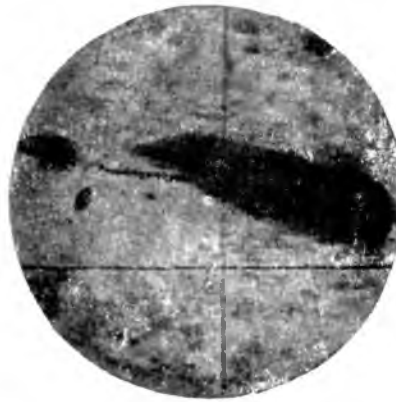
Фиг. 69. × 500.



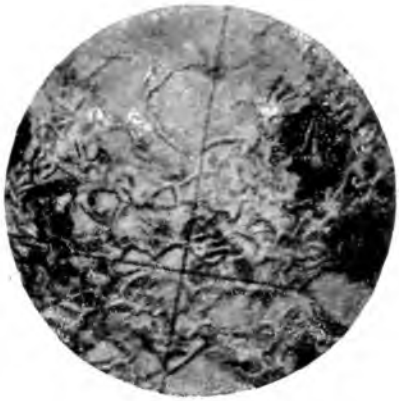
Фиг. 70. × 500.



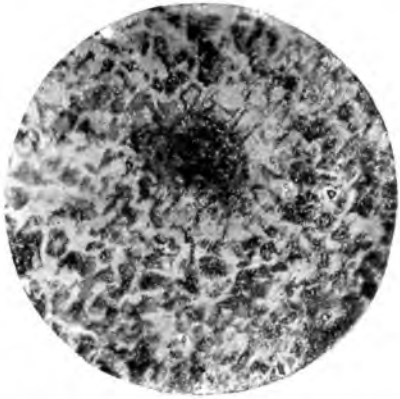
Фиг. 71. × 100.



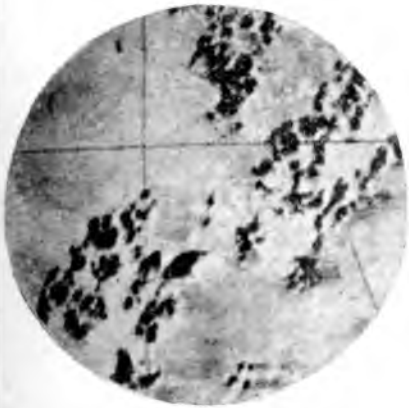
Фиг. 72. × 100.



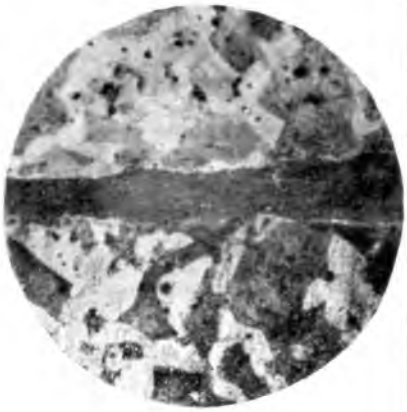
Фиг. 73. × 100.



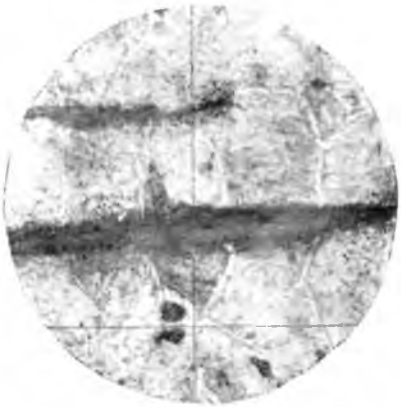
Фиг. 74. × 100.



Фиг. 75. × 100.



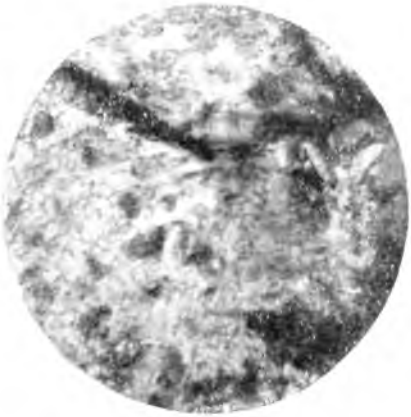
Фиг. 76. × 100.



Фиг. 77. × 100.

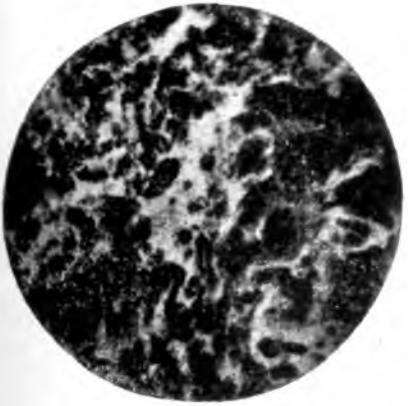
Фиг. 78. × 100.

Фиг. 79. × 100.



Фиг. 80. × 100.

Фиг. 81. × 100.



Фиг. 82. × 100.

Фиг. 83. × 100.

Фиг. 84. × 50.

Фиг. 85×90.

Фиг. 86. × 56.

углубления, состоящие из ряда пересекающихся тоненьких пластинок, верхушки которых зазубрены, как изображено на нижеследующей фигуре 85. Этот рисунок сделан мною при посредстве камеры люциды (увеличение в 90 раз).

Зеркальный чугун под ударами молотка легко распадается на куски, причем разъединение их происходит по плоскостям пластинок, что указывает на небольшую спайность между пластинками и остальной массой чугуна. Отполированная поверхность поперечного сечения представляет однородное плотное сложение, совершенно похожее на сложение пластинок цементитов в цементной стали — фиг. 7. По мнению Мартенса пластинки зеркального чугуна состоят из цементитов, в которых железо частью замещено марганцем. Толщина их бывает различна от 0,05 до 2 *мм*.

Рассматривая под микроскопом наружные поверхности этих пластинок, т. е. поверхности их соединений с остальной массой чугуна, замечаем красивый рисунок, который местами состоит из елочных кристаллов — фиг. 86 (два последние рисунка сделаны мною карандашом при посредстве камеры люциды).

Из всего сказанного видно, что сейчас же после наполнения формы расплавленным зеркальным чугуном образуются в жидком металле кристаллические пластинки, на которых оседают частицы застывающего металла и дают узоры, наподобие узоров, происходящих при замерзании оконных стекол. Затем затвердевает остальная масса, которая (как показывают более значительные увеличения) кристаллизуется в виде нормальных лучей к этим пластинкам.

С увеличением содержания марганца в чугуне сложение его переменяется. Так, например, марганцовое железо при содержании 84% Mn принимает структуру, изображенную на фиг. 82.

На фиг. 83 видно сложение кремнистого чугуна с 10% Si. Темные ветки представляют собой скважины, которые были заполнены графитом.

Из всего вышесказанного видно, что изучение перемены микроструктуры стали имеет для нас двойное значение:

1) научное, потому что оно может нам выяснить много темных фактов и явлений, как, например, причины перемен свойств металла, происходящих при критических температурах или в промежутках между ними во время нагрева и охлаждения стали, а также дать более ясное представление о тех молекулярных и химических превращениях, которые претерпевает металл в критических моментах;

2) практическое, потому что благодаря применению к микроскопу фотографий, воспроизводящей микроскопические изображения при любом увеличении, можно составить из целого ряда наблюдений нормальную шкалу и, сравнивая с ней исследуемый образец стали, определить: а) какого приблизительного состава сталь; б) в каком состоянии находится металл, т. е. в закаленном,

отпущенном или отожженном; в) какая степень закалки, отпуска или отжига, т. е. при какой температуре металл был закален, отпущен или отожжен; г) с пороками ли металл или нет; д) каких можно приблизительно ожидать от этой стали механических результатов; е) при совместном сравнении микроскопических исследований с химическими и механическими—насколько примененная обработка соответствовала данному сорту стали.

Таким образом, микроскопический анализ может быть отличным контролем при производстве стали, а для приемщиков послужит указанием настоящих качеств металла — качеств, которых не всегда в состоянии определить один химический анализ и механические испытания.

Разумеется, что составленный мною краткий очерк микроскопических исследований далек еще от решения этих вопросов и предстоит еще немало труда и порчи глаз, пока можно будет высказать более основательные заключения и применить все это к практической пользе.

Надеемся, что по примеру Обуховского сталелитейного завода в скором времени и другие заводы найдут необходимость в подобных исследованиях, и я буду очень счастлив, если мой труд послужит в этом отношении хотя бы канвой для дальнейших работ. Считаю, однако, необходимым разочаровать тех лиц, которые ожидают, что микроскопический анализ может быть доступным для каждого, кто захочет исследовать любой кусок металла, т. е., что для определения качеств куска стали, достаточно только его отполировать, вытравить, рассмотреть под микроскопом и по данной шкале решить вопрос о годности или негодности металла. Таких преимуществ от микроскопического анализа навряд ли когда-либо можно ожидать. Смею уверить, что этот способ исследования требует не меньше подготовки, знания и опытности, чем химический анализ.

ПРИМЕЧАНИЯ РЕДАКЦИИ К СТАТЬЕ А. А. РЖЕШОТАРСКОГО „МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗА, СТАЛИ И ЧУГУНА“

1. Приводятся в сокращенном виде три последние главы сочинения А. А. Ржешотарского „Микроскопические исследования железа, стали и чугуна“, СПБ 1898, стр. 39—115.

2. Следует иметь в виду, что Д. К. Чернов, взгляды которого излагает А. А. Ржешотарский, не считал, что сталь при температурах выше точки *b* имеет подлинно аморфное строение, так как именно им и была высказана теория о кристаллизации стали из жидкого состояния. Представление об аморфном состоянии было выдвинуто Д. К. Черновым чтобы подчеркнуть резкие структурные изменения, совершающиеся в стали при нагреве.

3. Температуры, указываемые А. А. Ржешотарским, вследствие, повидимому, досадной погрешности градуировки пирометра несколько ниже действительных. Это, однако, не снижает принципиальной ценности полученных им выводов.

4. β-железо, упоминаемое А. А. Ржешотарским, соответствует железу, существующему выше критических температур, или, как мы обозначаем теперь, γ-железу. Следует иметь в виду, что для того, чтобы отличить α-железо (феррит, или железит) от состояния железа после закалки, автор в соответствии с существовавшими в то время воззрениями указывает здесь также β-железо.

Необходимо иметь в виду, что в то время не разделяли критических точек, полученных при нагреве, от критических точек при охлаждении.

5. Иногда А. А. Ржешотарский пользуется термином „закалит“ не только для описания структуры закаленной стали, но и для описания состояния стали при температуре выше критической. Здесь закалит соответствует структуре твердого раствора — аустенит по современной терминологии.

6. В то время четко не разграничивали отжиг от отпуска.

7. Вследствие возможного сохранения мартенситовой ориентировки у троостита или сорбита отпуска разницу по микроструктуре между ними и мартенситом заметить было почти невозможно, тем более, что А. А. Ржешотарский пользовался несовершенными микроскопами того времени.

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ БЕЛЯЕВ

Николай Иванович Беляев (1877—1920 гг.)

Н. И. БЕЛЯЕВ (1877—1920)

Среди имен русских ученых и инженеров, оказавших огромное влияние на развитие машиностроения и металлургии, на создание науки о металлах — металловедения, имя Николая Ивановича Беляева занимает одно из видных мест. Несмотря на очень короткую, внезапно оборвавшуюся жизнь, практическая и научная деятельность Николая Ивановича принесла много ценных плодов, создала ему вполне заслуженное имя и показала всему миру колоссальную роль русской науки и техники.

Характерной чертой научного и производственного творчества Беляева было осуществление неразрывной связи между наукой и промышленностью. Именно по этой причине велика и научная и практическая ценность его трудов. С этой точки зрения всю деятельность Н. И. Беляева прекрасно иллюстрируют гениальные слова великого Сталина о том, что: „Данные науки всегда проверялись практикой, опытом. Наука, порвавшая связи с практикой, с опытом, — какая же это наука?... Наука потому и называется наукой, что она не признает фетишей, не боится поднять руку на отживающее, старое и чутко прислушивается к голосу опыта, практики“ [1].

Николай Иванович Беляев родился 28 (15) мая 1877 г. в г. Поневеже б. Ковенской губернии в семье учителя. Его отец Иван Александрович Беляев, позднее директор народных училищ г. Поневежи, был очень образованным и культурным человеком.

Николай Иванович в 1890 г. был принят в Поневежское шестиклассное реальное училище и по окончании его поступил в седьмой дополнительный класс реального училища г. Риги. По окончании Рижского реального училища в 1896 г., он поступил на механическое отделение Петербургского технологического института. В 1902 г. Николай Иванович окончил полный курс института, сдал испытания в экзаменационной комиссии, защитил специальный проект мартеновской мастерской, и 6 июня 1902 г. ему было присвоено звание инженера-технолога. Еще во время учебы в Технологическом институте Николая Ивановича особенно привлекала живая заводская

[1] Сталин И. В., Вопросы ленинизма, изд. 11-е, стр. 502.

работа, с которой он познакомился во время практики на Путиловском заводе. Поэтому, по окончании института, он поступил на Путиловский завод (ныне Кировский завод).

Здесь он занял скромную должность в отделе главного механика завода. В его обязанность входило выполнение различных механических испытаний частей паровозов и вагонов (осей, колес, бандажей, рессор, пружин и т. д.) и собирание материалов для железнодорожного съезда. Проявив большую инициативу и особый интерес к металлургическим процессам производства, Николай Иванович 2 февраля 1903 г. был переведен в металлургический отдел и назначен инженером при главном металлурге завода. Вся его последующая деятельность на Путиловском заводе протекала в металлургическом отделе.

С первых шагов работы в металлургическом отделе Николай Иванович столкнулся со всей разнообразной деятельностью громадного завода. Здесь возникали новые производства, новые технические задачи, требующие быстрого и умелого решения. Совершенно ясно, что такие решения требовали научного подхода, всестороннего исследования металла на разных стадиях производства. Вследствие этого назрела необходимость в организации заводской лаборатории, способной решать разнообразные производственные задачи научными методами.

Именно поэтому Николай Иванович свою деятельность в металлургическом отделе начал с составления проекта металлографической лаборатории, цель которой, по его словам, заключалась „в исследовании металлов и сплавов тогда еще новыми научными методами, с помощью микроскопов, регистрирующих пирометров, специальных машин и приборов для механических и других испытаний“ [1].

В этом начинании Николай Иванович основывался и на опыте работы Обуховского завода, где под руководством выдающегося русского ученого-инженера А. А. Ржешотарского впервые в России была организована металлографическая лаборатория, сыгравшая весьма большую роль в жизни завода.

Проект Н. И. Беляева был принят, и на Путиловском заводе началась организация лаборатории, которая сначала была размещена при одной из мастерских, и только спустя несколько лет, для лаборатории было выстроено отдельное здание. Металлографическая лаборатория была закончена оборудованием в 1904 г., и с этого момента она под руководством Николая Ивановича начала служить практическим целям завода, сыграв крупную роль при разрешении сложных производственно-технических задач. Занимая впоследствии ряд ответственных должностей, Н. И. Беляев никогда не порывал связи с лабораторией, чувствуя в ней своего настоящего помощника, вплоть до момента ухода с Путиловского завода в 1916 г.

---

[1] Беляев Н. И., Автобиография, Московская горная академия, 1919, рукопись.

Благодаря усилиям Николая Ивановича и многих талантливых сотрудников лаборатории, ставших в дальнейшем нашими виднейшими учеными, среди которых необходимо отметить ныне академика Н. Т. Гудцова, чл.-корр. АН СССР Б. В. Старка, проф. Г. З. Нессельштрауса и др., лаборатория Путиловского завода и организованный при ней музей стали одним из крупнейших, если не самым крупным, научно-исследовательским и научно-производственным центром в области металловедения, термической обработки и металлургии дореволюционной России, значительно превосходившим соответствующие учреждения Англии, Франции и Америки.

Как правильно указывает Владимир Ефимович Грум-Гржимайло — „Много металлографических лабораторий было построено в последние 15 лет в заводах России и за границей. Много инженеров пробовали свои силы дать жизнь этим учреждениям и в бессилии опускали свои руки. Лаборатории за границей и у нас в России оставались вне жизни завода и заведующие не находили в окружающем их океане вопросов техники предметов для исследования и изучения.

Блестящим исключением была металлографическая лаборатория Путиловского завода под руководством Николая Ивановича. Посещение ее доставляло высокое наслаждение. В ней кипела жизнь, ставились опыты, вопрос подвергался всестороннему изучению, иногда проходили месяцы упорного труда, прежде чем приходили решения, но Николай Иванович никогда не опускал рук, а работал и думал, думал и работал, пока наконец, не находил решения. Эта несокрушимая воля, видимое спокойствие, но мятежный и беспокойный дух были его отличительной чертой“ [1].

Сам Николай Иванович в автобиографии указывает: „чтобы судить о той роли, которую лаборатория сыграла в жизни такого крупного завода, как Путиловский, достаточно познакомиться с оборудованием ее (лучшим в России), музеем и материалами по различным научно-практическим исследованиям“ [2].

Многие ученые и инженеры, посещавшие лабораторию, восхищались ею и обращались на завод за помощью в решении многих как научных, так и практических вопросов.

Первые работы Николая Ивановича, составившие ему известность на заводе и за его пределами, касались изготовления паровозных осей. После ряда неудач благодаря настойчивости Николая Ивановича заводу удалось справиться с этой задачей. Второй и одной из самых трудных задач, также блестяще им решенных, было изготовление пружин для накатников 3-дюймовой артиллерии. Ни один из заграничных заводов, к которым обращались органы военного ведомства, не был в состоянии поставить сталь или готовые пружины по требуемым техническим условиям. Представленные некоторыми фирмами образцы не выдержали испытаний. Понадобился

---

[1] Некролог В. Е. Грум-Гржимайло о Н. И. Беляеве от 4 сентября 1920, рукопись, архив семьи Н. И. Беляева.

[2] Беляев Н. И., Автобиография, Московская горная академия, 1919, рукопись.

и глубоко научный подход Николая Ивановича, и его большая настойчивость, чтобы решить этот важнейший вопрос для завода и для русской артиллерии, принимавшей в то время на вооружение 3 дюймовую пушку образца 1900—1902 гг., сконструированную Путиловским заводом, которая была использована и во время русско-японской войны 1904—1905 гг. и войны 1914 - 1918 гг.

Уже в первые годы работы Н. И. Беляева на заводе возник вопрос о разработке щитовой стали, необходимой для артиллерии и многих других назначений. Речь в данном случае шла о создании новой марки стали и разработке рациональных режимов технологического процесса ее производства вообще и режимов термической обработки стали в частности.

Николаю Ивановичу удалось разработать новую щитовую (броневую) сталь, которая не только не уступала, но и превосходила аналогичную продукцию заграничных заводов, как, например, Круппа и Крезо. Об этой работе Н. И. Беляев уже позже писал: „все производство щитов с начала его возникновения на заводе т. е. с момента выработки новой щитовой стали, лежало на моей ответственности, как и заведывание отделением по термической обработке их“ [1].

Многостороннюю деятельность Н. И. Беляева на Путиловском заводе характеризуют, например, его опыты в 1908 г. по центробежной отливке изделий, имеющих форму тел вращения (труб, бандажей, снарядов и т. д.), не только из углеродистой, но и специальной стали, послужившие также толчком, как мы увидим далее, к изучению макроструктуры стали. Однако даже эти первые годы деятельности Николая Ивановича, когда он работал как рядовой инженер, показали его выдающиеся способности и главное — умение каждую производственно-техническую задачу решать на научной основе и придать проводившимся научно-исследовательским работам настоящий русский размах. Характерным в его работе было то, что он в своих исследованиях никогда не останавливался на полпути, а всегда доводил их до конца, выяснял вопросы до степени очевидности, как образно указывает В. Е. Грум-Гржимайло, „до ясности и простоты, доступной ребенку“. Проф. Б. В. Старк, много лет проработавший совместно с Николаем Ивановичем, так описывает стиль его работы: „Характерной особенностью работ Н. И. Беляева была необычайная систематичность. Всякий вопрос ставился им во всей полноте, выяснялось в отдельности влияние каждого фактора и только после разработки плана исследования, начиналось получение экспериментального материала“ [2].

Однако исключительно важной, если не сказать самой важной, стороной стиля его работы была непосредственная связь между наукой и производством. Эта связь чувствовалась в каждой его

---

[1] Беляев Н. И., Автобиография, Московская горная академия, 1919.

[2] Сообщения о научно-технических работниках в Республике, вып. VI, Краткий обзор трудов Всероссийского съезда научных деятелей по металлургии, М. 1921, стр. 18.

работе, а отсюда и ясно выраженная направленность работ и их научная и практическая ценность.

Николай Иванович ясно видел разрыв, наблюдавшийся в то время между высшими учебными заведениями и заводами, и считал, что это была одна из крупных ошибок того времени. В одной из своих лекций он указывал, что „На почве такого ненормального положения рождается рутина в науке, рутина в практике, а в результате застой в технике вообще“ [1]. Эти взгляды Н. И. Беляева проявлялись ярко на протяжении всей его жизни.

Среди первых научных работ, проводившихся Николаем Ивановичем, большое значение имело исследование макроструктуры стали.

Еще во время учения в Технологическом институте Н. И. Беляев заинтересовался явлениями, происходящими в стали при затвердевании, и структурой стали в литом состоянии. Именно поэтому он уже в то время изучил классические работы Д. К. Чернова, учеником которого он всегда себя считал.

Интерес к проблеме строения литой стали не угас у Николая Ивановича и после окончания института. Так, в 1903 г., т. е. через год работы на Путиловском заводе, он пишет о том огромном интересе, с которым ждет лекции Дмитрия Константиновича относительно кристаллизации стали. На этой публичной лекции Д. К. Чернов развивал свою знаменитую теорию о структуре стали и демонстрировал дендрит, полученный в усадочной раковине 100-тонного слитка. И вот тогда у присутствовавшего на лекции Н. И. Беляева возникла мысль попытаться экспериментально изучить кристаллическое строение стального слитка. Однако осуществить эту идею ему удалось лишь спустя несколько лет. В статье „О булате“ Николай Иванович писал:

„В начале 1908 г. мне случайно удалось это сделать, т. е. разложить болванку стали на ее составные части — кристаллы, совершенно подобные кристаллам усадочных раковин — при особых обстоятельствах: при одной из серий опытов отливки стали в условиях вращения. При отливке этим способом полого конуса из хромо-никелевой стали мне пришла мысль — непосредственно после застывания металла опустить конус в холодную воду. От совершенно охладившегося конуса был легко отбит нос, а затем и весь конус был разбит на куски. Впервые картина построения болванки из кристаллов представилась мне с удивительной ясностью“ [2].

Далее Н. И. Беляев указывает: „Этот резкий пример дал сильный толчок моим мыслям, он был началом моей систематической работы по разложению стали на кристаллы и изучению этого вопроса в возможной полноте“ [3]. Начиная с этого момента, Николай Ивано-

---

[1] Стр. 355 настоящей книги.

[2] „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, 1911, стр. 453.

[3] Там же.

вич усиленно занимается всей проблемой макростроения стали, поскольку механические свойства стального изделия, как показывал его заводской опыт, зависят не только от микроструктуры, но и от „более грубого сложения стали“ — макроструктуры. 10 декабря 1908 г. он выступает с докладом „Практическое значение металлографии в производстве стали“ на металлографической секции Русского технического общества и формулирует мысль, послужившую основным стержнем дальнейших исследований: „все наши изделия, выполняющие известную техническую работу, составлены из кристаллов совершенно таких же, какие находят иногда в виде больших кристаллов в раковинах больших и малых болванок“ [1].

После доклада о макроструктуре стали, сделанного Николаем Ивановичем в собрании с участием крупнейших русских ученых, Александр Александрович Байков обратился к Николаю Ивановичу и поздравил его с крупнейшими открытиями в области структуры стали.

В 1910 г. в „Журнале Русского металлургического общества“ Н. И. Беляев опубликовывает результаты своих исследований в области макростроения стали под заглавием „Макроструктура стали в связи с кристаллизацией“. Эта работа принесла ему широкую известность и явилась крупнейшим вкладом в металлографию.

Позднее, в сентябре 1910 г., Николай Иванович сделал доклад на съезде деятелей по горному делу, металлургии и машиностроению в Екатеринославе (ныне Днепропетровск) на тему „Макроструктура стали в связи с кристаллизацией“. Этот доклад Николая Ивановича был встречен как выдающееся событие в науке. В 1912 г. в немецком журнале [2] был опубликован большой реферат об этой работе, снабженный многочисленными иллюстрациями, а во французском журнале [3] был приведен полный перевод текста доклада на упомянутом выше съезде. В связи с большим значением этой работы, приводимой в настоящем сборнике (стр. 305), необходимо указать ее основные положения, сформулированные Николаем Ивановичем следующим образом:

„Исследователи, воспользовавшись микроскопом, сосредоточили все свое внимание на строении и изменениях в строении очень малых (микроскопических) площадок, перенесли это строение на объем изучаемого куска и на весь тот объем, от которого этот кусок отделялся для исследования. Ошибка такого представления о строении стали — в форме определенного объема, особенно рельефно проявлялась тогда, когда этот объем должен был сопротивляться динамическим усилиям и силам, прилагаемым к этому объему по разным направлениям“ [4].

Не следует, однако, думать, что по мнению Николая Ивановича микроструктура не играет особой роли. Важность изучения и микро-,

---

[1] „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, 1911, стр. 435.
[2] „Stahl und Eisen“ № 24, 1912, стр. 996—999.
[3] „Revue de Metallurgie“ № 9, 1912.
[4] Стр. 306 настоящей книги.

и макроструктуры выражена им в следующих словах: „Признавая важность микроструктуры стали, необходимость ее изучения и практическое ее значение, я хочу обратить внимание интересующихся вопросами строения стали на не менее важную другую структуру стали — макроструктуру ее, изучать которую, по моему мнению, не менее необходимо и практическое значение которой не менее ценно. В противоположность тонкому микроскопическому строению, каким обладает любая точка в куске стали, макроскопическое строение указывает на грубое сложение самого куска стали. Микроструктура имеет дело с точкой, макроструктура — с объемом его“[1].

В результате подробного рассмотрения фактического материала, полученного в практической работе на Путиловском заводе, и многочисленных специальных экспериментов Н. И. Беляевым было доказано, что „Сталь в литом виде составлена из самостоятельных кристаллов, совершенно подобных кристаллам усадочных раковин болванок—по внешним очертаниям и по внутреннему построению. Величина, форма и распределение этих кристаллов в болванке различны в зависимости от разных условий: массы, формы сечений, состава, обстановки, отливки и проч.“[2].

Далее Н. И. Беляев заключил, что кристаллы существуют всегда в литом металле и при любых условиях охлаждения. Это опровергало существовавшее в то время мнение некоторых иностранных ученых и в том числе американского металлурга Гоу, который считал, что иглы (кристаллы) образуются только при медленном охлаждении. Николай Иванович ясно указывает: „В действительности, насколько меня убедил практический материал, иголки имеются в изломах болванок различного поперечного сечения (от 3″×3″ до 24″×24″), различного состава ... и различного способа охлаждения“[3].

Исходя из основных физико-химических закономерностей, Николай Иванович устанавливает: „Макроструктура кристаллов и, следовательно, стали есть следствие неоднородности твердого раствора и потому есть общее типичное явление для всех сортов стали“[4].

Вопреки существовавшему в то время мнению, что термическая обработка вызывает изменения макростроения, он показал, что термическая обработка вызывает только „местные изменения в строении соседних частиц и объемов, образующих макроструктуру кристаллов стали“[5].

Горячая механическая обработка производит деформацию кристаллов и вызывает перемещения и перегруппировки частиц или

---

[1]. Труды Съезда деятелей по горному делу, металлургии и машиностроению, 1910, стр. 349. Доклад инж.-технолога Н. И. Беляева „Макроструктура стали в связи с кристаллизацией“, 1 сентября 1910 г.

[2] Стр. 323 настоящей книги.

[3] Стр. 307 настоящей книги.

[4] Стр. 323 настоящей книги

[5] Там же.

объемов, составляющих кристаллы, что выражается „соответствующими изменениями в макроструктуре“.

Об основном значении своей работы Николай Иванович писал: „В своей работе „Макроструктура стали в связи с кристаллизацией“ я дал теоретическое объяснение механической разницы между сталью в литом и механически обработанном виде, чего не было сделано до того времени, хотя уже давно за механически обработанной сталью признавали преимущества в механических свойствах перед литой“ [1].

Прекрасно поставленные опыты, изумительные по четкости снимки макроструктуры, хорошо обоснованные выводы сделали эту работу выдающимся вкладом в металлографию железа.

Профессор Б. В. Старк в следующих словах показал значение работы Н. И. Беляева:

„Возникшая, как и многие другие отрасли научного творчества, из техники, металлография волею судеб должна была заняться труднейшей системой сплавов, а именно — сталью. Применение микроскопического метода быстро открыло новой дисциплине блестящие перспективы объяснения целого ряда явлений, но так же скоро выяснилось, что объяснить все особенности стали с помощью того, что мы теперь подразумеваем под словом „микроструктура“, невозможно. Наличие дендритных кристаллов в усадочных раковинах, волокнистые и крупнозернистые изломы, сетчатое строение пережженного материала скоро обнаружило, что, помимо тех мелких кристаллических индивидов, которые видны под микроскопом, сталь состоит из более крупных неделимых. Соответственно с этим был высказан ряд гипотез, среди которых особенно замечательна была дендритная теория отца металлографии Д. К. Чернова. Но молодая наука, увлеченная методами микроскопическим, термическим и другими, не учитывала и не могла учесть того огромного значения, которое имеет макроскопическое строение стали. Понадобился светлый ум Николая Ивановича, чтобы оттенить всю важность макроструктуры и показать, из каких именно крупных неделимых состоит сталь; Николай Иванович объяснил и причины появления тех крупных неделимых, которые мы видим теперь после соответствующей обработки во всяком образце литой стали и которые мы привыкли называть дендритами. Его работа о макроструктуре положила конец всякой неясности в этом вопросе, и теперь общепризнан взгляд, что литая сталь состоит из дендритовидных кристаллов, образующихся в процессе отвердевания, причем самые дендриты состоят из тех микроскопических кристаллических индивидов, которым мы приписываем название аустенита, феррита и цементита“ [2].

Николай Иванович не ограничился исследованиями макростроения литой стали, опубликованными в статье „Макроструктура стали в связи с кристаллизацией“, он начал изучать также природу булата.

---

[1] „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, 1911, стр. 484.

[2] Стенограмма доклада проф. Б. В. Старка на Всероссийском съезде научных деятелей по металлургии, М. 1921.

Если секрет изготовления булата перестал быть тайной после работ П. П. Аносова (1828—1837 гг.) и Д. К. Чернова (1869 г.), то природа свойств булата оставалась не вполне ясной. Уже в 1907 г., как об этом упоминает сам Н. И. Беляев, он отлил слитки булатной стали, исследовал их макроструктуру и далее проделал огромную работу по выяснению свойств булата, обобщенную в его исследовании „О булате", опубликованном в 1911 г. [1].

В этой статье Николай Иванович, рассматривая различные теории строения булата, указывает, например, что попытки объяснить сущность строения булата только на основании узоров перлита являются неправильными, так как в образцах булатной стали даже с крупным узором пластинчатый перлит становится ясно различимым только при увеличениях в 100—140 раз. Исходя из данных своих предшествующих работ, Николай Иванович делает вывод, что узоры булата есть результат характера кристаллизации стали. При этом чем медленнее процесс кристаллизации и чем больше в стали углерода, тем более крупными являются узоры.

Последующая ковка должна приводить к определенному деформированию кристаллов и „укладыванию их в известном порядке, чем достигается прочность изделий, особенно при действии на них динамических сил". С этой точки зрения при закалке булата, необходимой для придания определенных механических свойств (твердости и упругости), нет опасности потерять полученный при ковке узор.

Булатная сталь отличается, по мнению Николая Ивановича, от обыкновенной стали того же состава определенной макроструктурой и чистотой в отношении вредных примесей и газов.

Помимо работ в области макроструктуры Н. И. Беляев в эти же годы проводит исследование о газах в стали, на влияние которых он всегда обращал большое внимание. Как указывает проф. Г. З. Нессельштраус „в металлографической лаборатории Путиловского завода под руководством и при участии Николая Ивановича было выполнено обширное исследование газов, содержащихся в слитках затвердевшей стали и выделяющихся из расплавленного металла, непосредственно после разливки и изложницы" [2]. Николай Иванович понимал, что газы оказывают большое влияние на физические и механические свойства стали, которыми он особенно много занимался. Позднее, по его инициативе, Б. В. Старком было произведено более полное исследование явления выделения газов из застывающей стали.

Наряду с указанными работами Николай Иванович совместно с Н. Т. Гудцовым предпринимает широкое исследование механических свойств стали, опубликованное в 1914 г. под общим заголов-

---

[1] „Журнал Русского металлургического общества" № 4, 1911, стр. 435—487.

[2] Стр. 367 настоящей книги.

ком „О пределе упругости стали“ [1], доложенное на заседании Русского металлургического общества 27 марта 1914 г.

В начале этой капитальной работы Н. И. Беляев и Н. Т. Гудцов формулируют принципиальную важность изучения механических свойств стали. Они указывают, что хотя этим вопросом занимаются многие исследователи в течение продолжительного времени, и накоплен огромный цифровой материал, но пользование этим материалом по существу невозможно, поскольку в большинстве случаев имеет место несравнимость результатов не только различных, но часто даже одного и того же исследования, являющихся следствием громадного разнообразия исходного материала, с одной стороны, и различия предварительной термической и механической обработки — с другой. По этой причине Н. И. Беляев и Н. Т. Гудцов проводят тщательное исследование механических свойств среднеуглеродистой стали как наиболее распространенной в общем машиностроении в таких условиях, которые исключают влияние каких-либо других факторов, кроме специально изучаемых и намеренно изменяемых.

Можно без преувеличения назвать это исследование образцовым и не утратившим своего значения до настоящего времени. Прежде всего следует отметить исключительную систематичность работы и весьма продуманную подготовку объектов исследования. Здесь учитывается влияние всех металлургических факторов (усадка, ликвация, газовые пузыри), причем в опытах созданы такие условия для получения образцов, чтобы эти факторы не оказывали влияния и были исключены. Выполнение термической обработки также проведено с высокой точностью, причем критические точки определены с помощью пирометра Н. С. Курнакова дифференциальным методом. Далее результаты термической обработки контролировались не только на основании данных по механическим испытаниям, методы которых были исключительно подробно и критически рассмотрены, но и на основании металлографического исследования. Это было в полном смысле комплексное исследование, т. е исследование с применением самой разнообразной методики, позволяющей выяснить сложную природу наблюдающихся явлений. С этой точки зрения здесь указывается то научно-методическое направление, которое и сейчас является необходимым в любом научном металловедческом исследовании.

Выводы, полученные Н. И. Беляевым и Н. Т. Гудцовым относительно влияния на механические свойства температуры отжига и отпуска как литой, так в кованой стали, являются вполне обоснованными и сохраняют свое значение и сейчас. И в наше время представляет практический интерес двойной отжиг среднеуглеродистой стали: сначала отжиг при 800° и затем при 740° с медленным охлаждением (18°/час) до 630°. При отжиге по этому режиму, предложенному Н. И. Беляевым и Н. Т. Гудцовым было достигнуто очень высокое по-

---

[1] „Журнал Русского металлургического общества № 3, 1914, стр. 332—414.

перечное сжатие стали. Следует подчеркнуть, что, проведя исключительно тщательный анализ многих механических свойств, Н. И. Беляев и Н. Т. Гудцов пришли к тому выводу, что из механических свойств наибольшее значение имеет предел текучести, который подробно рассматривается в описываемой работе, а также поперечное сжатие, более полно, по их мнению, характеризующие прочность и пластичность стали. Интересно отметить, что и с точки зрения современной теории прочности, созданной советскими учеными, именно эти механические свойства стали и являются одними из наиболее важных.

На основе этих исследований в области макроструктуры и механических свойств Николай Иванович совместно со своими сотрудниками проводил в лаборатории напряженную работу и в области снарядного производства.

Из работ Беляева в этой области можно привести следующий пример. Перед самым началом войны 1914—1918 гг. Николай Иванович разработал новый способ изготовления наиболее ответственных фугасных снарядов малых и крупных калибров. Фугасные снаряды, изготовленные по этому новому способу, имели более высокие качества, чем снаряды, поставленные иностранными фирмами. Благодаря очень хорошим результатам, полученным при испытании снарядов на полигоне по плитам, их стали обрабатывать по способу Н. И. Беляева, отказавшись от способа французской фирмы Жиро, несмотря на то, что правлением Путиловских заводов было заключено с этой фирмой специальное соглашение по этому поводу [1].

Таким образом, работы Николая Ивановича очень ясно показывают достигнутое превосходство русской техники перед иностранной.

Существенно отметить, что Николай Иванович не только разработал способ изготовления этих снарядов, но и руководил металлургической частью производства снарядов и непосредственно ведал термической мастерской по обработке этих снарядов

Особенно напряженной была деятельность Н. И. Беляева во время войны, когда Путиловский завод являлся одним из важнейших поставщиков вооружения и боеприпасов. В 1915 г. по проекту Николая Ивановича на заводе организуется шрапнельно-термическая мастерская для термической обработки 3″ шрапнелей, гранат и 6″ фугасных снарядов. 1 апреля 1915 г. Н. И. Беляев назначается помощником главного металлурга завода с оставлением в то же время начальником термической мастерской по обработке брони, начальником шрапнельно-термической мастерской и металлографической лаборатории. Таким образом, с этого момента Николай Иванович получает возможность еще ближе связать работу лаборатории и производства завода, все глубже и глубже вводить научный подход к решению производственных задач, а также проверять результаты научных

[1] Беляев Н. И., Автобиография. Московская горная академия, 1919, рукопись.

работ практикой. Николай Иванович усиливает работу лаборатории. Приглашает для работы в качестве научного консультанта Бориса Викторовича Старка, бывшего в то время преподавателем Петербургского политехнического института. Кроме Б. В. Старка, в работах, проводимых Николаем Ивановичем, деятельно участвует Николай Тимофеевич Гудцов, являвшийся в то время его помощником по заведыванию металлографической лабораторией, и Г. З. Нессельштраус. Под руководством Н. И. Беляева в этот период проводятся многие исследования, имеющие очень большое значение. Среди этих исследований важное место занимает проведенное впервые в мире изыскание малолегированной быстрорежущей стали. Эта работа была начата Николаем Ивановичем в связи с тем, что во время войны могли истощиться запасы ферровольфрама в России. В области быстрорежущей стали надо было провести сложные изыскания, чтобы подобрать состав стали и условия ее обработки.

Основываясь на значительном опыте по производству и обработке инструментальной стали на Путиловском заводе, в которые Николай Иванович внес много существенных изменений, улучшивших качество стали и давших экономию в материале, он после многочисленных опытов разработал принципиально новую марку маловольфрамовой стали, известной под наименованием „Воин". Состав этой стали следующий: 0,8—1% углерода, 12—14% хрома и 3—3,5% вольфрама. Несмотря на почти в 4 раза меньшее содержание вольфрама, эта сталь с повышенным содержанием хрома лишь немного уступала по стойкости дорогой быстрорежущей стали. Можно с полным основанием сказать, что успехи советских металловедов в области создания новых малолегированных быстрорежущих сталей и, в первую очередь, Н. Т. Гудцова, Н. А. Минкевича, А. П. Гуляева, М. В. Приданцева и др. в значительной степени связаны с первыми работами Н. И. Беляева, показавшими принципиальную возможность такой замены.

Помимо этой важной работы Н. И. Беляев разрешает многие другие вопросы, выдвинутые войной: „о валовом производстве волочильных досок для волочения проволоки, о снабжении автомобильными сортами стали учреждений, нуждавшихся в них, с инструктированием потребителей в обращении с ними; о снабжении потребителей магнитной сталью для магнитов и проч." [1].

Уже этот краткий перечень работ, проведенных Николаем Ивановичем, а также его участие в создании соответствующих производств достаточно полно характеризуют его разнообразную деятельность в этот период. В самом деле, он изучает и разрабатывает броневые, снарядные и орудийные стали, инструментальные (быстрорежущие и для волочильных досок) и, наконец, конструкционные (автомобильные) стали и стали с особыми физическими свойствами (магнитные). Надо было обладать не только научными знаниями, но и огромным производственным опытом, чтобы руководить столь слож-

---

[1] Беляев Н. И., Автобиография, Московская горная академия, 1919.

ными производствами, каждое из которых требовало особых технологических режимов. Большинство из этих сталей были специальными и их надо было уметь и выплавлять и обрабатывать и добиваться получения нужных свойств.

Николай Иванович в своей работе по специальным сталям руководствовался соображениями, которые несколько позднее были им сформулированы в следующих словах:

„Одним словом, процентное содержание и процентное отношение примесей в стали не делает ее еще специальной, так как это условие только необходимое, но не достаточное. Для того чтобы сталь стала специальной, необходимо, чтобы она способна была выполнять специальное назначение. А для этого она рядом процессов и операций должна быть переведена в соответствующее состояние, обеспечивающее получение необходимых свойств“ [1], и далее: „только совокупность факторов является условием, необходимым и достаточным для проявления сталью, в наиболее совершенном виде, тех или иных свойств в изделиях или, яснее говоря, наилучшего и наиболее полного использования стали в желаемом направлении“ [2]. Этими факторами Николай Иванович называл „различные процессы и операции, которым подвергается сталь от своего рождения до зрелого возраста: плавка, отливка, механическая обработка, ковка, прокатка, штамповка, волочение, термическая обработка и пр.“ [3].

Из этих слов Николая Ивановича ясно следовало, что область специальных сталей должна была стать особой отраслью промышленности, ибо производство специальных сталей должно быть особым образом организовано, поскольку свойства этих сталей, в большей степени, чем углеродистых, определяются всем циклом производства стали. Необходимость создания особой отрасли промышленности имела не только научно-техническое обоснование, но и была подтверждена настоятельными требованиями русской промышленности, испытывавшей недостаток в специальных сталях для изготовления вооружения, боеприпасов и машин. Поставка специальной стали из-за границы практически ничего не давала, так как эта сталь была плохого качества, а заграничные способы обработки стали также во многих случаях были неудовлетворительными. Н. И. Беляев вообще резко критически относится ко всему иностранному, что особенно отчетливо видно из следующих высказываний: „Пробуждение научно-технической мысли в России в практических производствах позволяет критически отнестись к тем благодеяниям, которые получала и еще продолжает получать наша техника от общения не с заграничной техникой, а с ее суррогатами в виде отбросов технических сил и отбросов производства. И в этом виноваты и наше преклонение перед рекламой, авторитетом иностранной техники и

---

[1] Беляев Н. И., Сталь. Кристаллизация термическая обработка и механические свойства, Л. 1925, стр. 131.
[2] Там же, стр. 132.
[3] Там же.

ее второразрядных представителей, и наше постоянное умаление своих сил“ [1].

Далее Николай Иванович приводит примеры из технической практики. В одном из примеров Николай Иванович указывает на американскую, как всегда крикливую, рекламу о новой ванадиевой броневой стали, якобы обладающей исключительно высокими качествами. Однако испытания стали показали, что она обладает значительно худшими свойствами, чем другие известные стали. Николай Иванович при этом иронически замечает: „Оставалось одно объяснение, что сталь теряла при перевозке из Америки те свойства, которые она имела в Америке [2]. Далее интересно отношение Н. И. Беляева к иностранной технике, выраженное в другом примере: „Американцы изобрели недавно специально для России новую специальную сталь для взрывателей, с содержанием 2 % серы, и авторитет иностранцев еще так велик, что некоторыми был предпринят ряд опытов по получению и испытанию такой стали. *Мало возмущаться таким фактом, — необходимо бороться с ним и русская техника не оставит этого факта без освещения*“ [3].

Резко критикует Н. И. Беляев и иностранца „знатока“, по указаниям которого поступала заграничная сталь для автомобилей. Здесь имело место по существу настоящее надувательство со стороны иностранных фирм, так как простая мартеновская кремнистая сталь выдавалась за дорогую хромоникелекремнистую сталь, и из нее изготовлялись детали, для которых она не годилась.

Далее Николай Иванович указывает на ряд заграничных способов обработки стали, которые отличаются „...одной общей чертой — сложностью. Истинная техника как раз наоборот — отличается простотой и ясностью“ [4]. Именно этой характерной чертой обладала и та область техники, которая создавалась Н. И. Беляевым и его сотрудниками. Так же весьма критически относился Николай Иванович и к заимствованиям иностранных способов и их последующей переработке. Н. И. Беляев писал: „Нужно заметить, однако, что такая творческая работа отечественной техники не является благодарной, так как она все-таки может находиться под вредным влиянием плохих образцов, методов и приемов работы. А это так же вредно, как иногда, в период технического творчества, напитываться литературными источниками и подпадать под влияние отдельных работ и исследований“ [5].

Таким образом, Н. И. Беляев приходит к выводу о необходимости строительства русского завода специальных сталей, позволяющего отказаться от иностранной зависимости, создать многочисленные русские сорта специальной стали на основании уже имеющегося опыта,

---

[1] Беляев Н. И., Сталь. Кристаллизация, термическая обработка и механические свойства, Л. 1925, стр. 136.

[2] Там же.

[3] Там же.

[4] Там же, стр. 137.

[5] Там же.

в частности опыта Путиловского завода, и предложить новые, действительно совершенные отечественные методы ее обработки.

К этой мысли Николай Иванович по существу пришел уже давно, и в 1916 г. он и В. Е. Грум-Гржимайло открыто высказали идею о необходимости строительства завода специальной стали, в основу которого был бы положен электрометаллургический процесс, т. е. плавка стали в электропечах.

Н. И. Беляев и В. Е. Грум-Гржимайло сформулировали основные идеи, которые должны быть положены в основу этого нового предприятия. Главной задачей этого завода должен быть выпуск всех сортов специальной стали не только в виде заготовок (для поковок) и сортовой стали, а также самих поковок и даже готовых изделий. Кроме того, завод должен изготовлять ферросплавы, часть которых (например, ферровольфрам) в России никогда не изготовлялась. Этот завод должен быть тесно связан с потребителями, с тем чтобы специальная сталь применялась именно в тех случаях, когда это необходимо, и в тех условиях, которые позволяют выявить все ее свойства. Много внимания Н. И. Беляев и В. Е. Грум-Гржимайло уделили вопросам организации производства нового завода „Электросталь“ Особенно интересны следующие мысли Н. И. Беляева: „Жизненным нервом нового предприятия будут научно-практические лаборатории (химико-металлургическая, механико-металлографическая, лаборатория по испытанию инструментальной стали и инструментов, автомобильная). Живая связь производства с творческой работой лаборатории — есть верный залог быстрого прогресса отечественной техники, что доказано непосредственно опытом и признано практическими деятелями и людьми широкого кругозора“ [1], и далее указывается, что новое предприятие должно стать научно-практической школой, способствующей развитию русской техники. „. . . и в этом большое общественное значение нового предприятия“. Несмотря на косность и препятствия различных учреждений царского правительства, после многих хлопот проект Н И. Беляева и В. Е. Грум-Гржимайло был принят, и Николай Иванович занялся постройкой и оборудованием первого русского завода специальной стали.

25 мая 1916 г. Н. И. Беляев оставил Путиловской завод, на котором проработал почти 14 лет. Николай Иванович в следующих словах очень скромно и кратко охарактеризовал всю свою разнообразную работу на Путиловском заводе: „Работа моя на заводе в главной своей части сводилась: к систематическому проведению в практическую жизнь правильных методов термической обработки продуктов железного производства; к выработке новых специальных сортов стали для различных нужд техники, к усовершенствованию старых производств и установлению новых производств“. На самом же деле в этот период работы на заводе Н. И. Беляев на основе работ Д. К. Чернова создал новую область металлогра-

---

[1] Беляев Н. И., Сталь. Кристаллизация, термическая обработка и механические свойства, Л. 1925, стр. 140—141.

фии — учение о макростроении стали, разработал принципиально новые марки специальных сталей и, можно смело сказать, явился одним из создателей производства и термической обработки специальных сталей Научный подход к решению задач производства и влияние производства на научную работу привело к тому, что уже в тот период Н. И. Беляев был одним из самых крупных специалистов, особенно в области термической обработки стали. Еще в 1909 г. Петербургский политехнический институт пригласил Николая Ивановича для преподавания курса „Термическая обработка стали“ и руководства дипломными работами студентов. Здесь Николай Иванович одним из первых вводит реальные дипломные работы по заводской тематике, причем и выполнение этих дипломных работ осуществлялось на заводе.

Лекции Н. И. Беляева в Политехническом институте всегда были глубокими по содержанию и интересными по форме. В них тесно переплетались научные положения и данные практики. Из многочисленных курсов лекций Николая Ивановича сохранился лишь один на тему „Введение в изучение термической обработки стали“ [1] В этом курсе лекций Николай Иванович очень ясно проводит основную линию всех его работ о том, что свойства стали зависят от всего цикла процессов ее обработки. Поэтому в курсе лекций рассматриваются: металлургические основы плавки, затвердевание стали и последующая горячая механическая обработка. Необходимо отметить одно исключительно яркое место лекции о роли химического состава стали, который далеко еще не является основным для оценки свойств специальной стали:

„Некоторые специальные элементы влияют не только и даже не столько своим присутствием в стали, сколько присутствием в большем или меньшем количестве во время процесса плавки и разливки, и это последнее обстоятельство может быть иногда гораздо полезнее, чем те остатки соответствующих примесей, которые определяются анализом в готовом продукте после его затвердевания“ [2]. Эта мысль Николая Ивановича имеет огромное значение и обязательно учитывается как при разработке новых сталей, так и при изучении существующих сплавов советскими металлургами и металловедами

Очень интересным является высказывание Н. И. Беляева о значении термической обработки и перспективах ее применения. Он указывает: „В настоящее время позволительно высказать положение, что теоретически всякое изделие из стали, всякая часть машины должны быть термически обработаны. Необходимость термической обработки возникает из того, что всякий кусок стали, превращенный при помощи тех или иных приемов в изделие, практически должен дать максимум полезной работы, т. е. должен быть использован наиболее совершенным образом“ [3]. Эта мысль Николая Ивано-

---

[1] Стр. 355 настоящей книги.
[2] Стр. 360 настоящей книги.
[3] Стр. 375 настоящей книги.

вича о широком применении термической обработки нашла полное развитие в России только после Великой Октябрьской социалистической революции, и теперь громадное большинство деталей машин подвергается термической обработке. Каждый машиностроительный или металлургический завод обязательно применяет термическую обработку, считая ее важнейшей операцией технологического процесса.

Благодаря тому, что Н. И. Беляев был человеком передовых взглядов русского общества того времени, а также вследствие глубины содержания его лекций у него сложились очень хорошие взаимоотношения со студентами. Интересно, что по мере появления в науке и практике металлургии новых вопросов Николай Иванович немедленно организовывал занятия по этим вопросам, на которых он или студенты делали соответствующие сообщения, а далее следовало горячее обсуждение. Несмотря на огромную занятость, особенно во время войны, когда Николай Иванович часто целые сутки оставался на заводе, он все же всегда находил время, чтобы заниматься со студентами.

Связь между студентами и Николаем Ивановичем была столь сильной, что даже по уходе его с Путиловского завода и переезда для руководства строительством нового завода в Москву он продолжал оставаться преподавателем и периодически выезжал в Петербург для чтения лекций и ведения занятий. Если отъезд Николая Ивановича в Москву не прервал связи с институтом, то с Путиловским заводом ему пришлось расстаться навсегда.

За время своей почти 14-летней работы он очень сроднился с заводом, его инженерно-техническими работниками и рабочими. Поэтому уход с Путиловского завода для него был очень тяжел. Но он твердо был уверен в том, что на новом поприще, работая по организации производства специальной стали, нужной стране, он принесет больше пользы. Поэтому он принял предложение о руководстве строительством завода и переехал в Москву.

Последовали годы напряженной работы, приходилось заниматься самыми разнообразными делами, связанными со строительством и оборудованием нового завода. Вместе с тем большой опыт Н. И. Беляева требовался то на одном, то на другом предприятии. Поэтому наряду с основной работой по строительству Николай Иванович выезжает на заводы для помощи в развертывании тех или иных производств. Так, в августе 1916 г. он был командирован на Пермские пушечные заводы для выяснения причин плохого качества снарядов и обследовал всю постановку этого производства. Кроме того, по поручению Военно-воздушного управления на Николая Ивановича была возложена задача по организации производства струнной проволоки для самолетов. Помимо этого он участвовал в различных технических комиссиях.

Работа на Путиловском заводе, этом крупнейшем очаге революционной борьбы русского рабочего класса, была для Н. И. Беляева большой общественно-политической школой. Именно благодаря этой

школе Н. И. Беляев оказался в ряду первых искренне преданных советской власти русских специалистов.

Великую Октябрьскую социалистическую революцию Н. И. Беляев как человек передовых взглядов и русский патриот открыто приветствовал, так как понимал, что только революция раскроет перед учеными широкие горизонты и положит начало мощному развитию русской науки и промышленности. Именно поэтому он сразу после Великой Октябрьской социалистической революции начал активно работать в различных органах советского правительства, не прерывая работ по окончанию строительства завода „Электросталь". Несмотря на тяжелое положение строительства завода, Советская республика сделала все возможное для пуска завода, и в декабре 1917 г. завод был пущен, хотя и частично, но сразу же стал удовлетворять промышленность нужными сортами стали. Завод „Электросталь", таким образом, явился первым новым заводом, пущенным в ход при советской власти.

Николай Иванович, являвшийся строителем завода, после пуска был назначен его техническим руководителем. Следует отметить, что благодаря усилиям Николая Ивановича в значительной мере удалось обеспечить техническими кадрами новое предприятие вследствие привлечения им на работу многих его сотрудников по Путиловскому заводу и учеников по Политехническому институту. В частности, в качестве руководителя лаборатории, которая по идее Н. И. Беляева должна быть жизненным нервом завода, был привлечен Б. В. Старк. Он, так же как и Н. И. Беляев, переехал в Москву и стал его помощником в решении многих технических и научных вопросов. Необходимо заметить, что Николай Иванович подготовил как техническую направленность и систему организации завода, изложенные в его статье „Специальная сталь в России и завод „Электросталь" [1], так и техническую программу выпуска завода.

Николай Иванович наметил сортамент сталей, которые предполагалось выпускать в виде кованых заготовок, а также составы и марки этих сталей. Для широкого ознакомления русской промышленности с составами и применением стали разных марок Н. И. Беляевым было написано несколько брошюр. Первая из этих брошюр, под названием „Электросталь" — первый завод специальной стали в России. (А. „Марки стали)", вышедшая в 1917 г., позволяет характеризовать продукцию завода. В ней приведены все основные классы специальной стали для самого широкого применения почти во всех областях техники.

В другой брошюре „Электросталь" — первый завод специальной стали в России (Б. Автомобильно-аэропланная сталь; сорта стали и обращение с ними)", написанной Н. И. Беляевым в декабре 1917 г., т. е. к самому моменту пуска завода, приводятся условия выбора стали для тех или иных назначений, способы обра-

---

[1] Беляев Н. И., Сталь. Кристаллизация, термическая обработка и механические свойства, Л. 1925, стр. 130.

ботки стали, обеспечивающие получение лучших механических свойств, а также составы и назначения выпущенных сталей.

В этой же брошюре Николай Иванович приводит описание четырех марок хромоникелевых сталей — Э4, Э6, Э5 и Э2 как цементуемых, так и улучшаемых, с разным содержанием хрома и никеля. Составы были настолько хорошо продуманы, что эти стали в течение многих лет уже после смерти Н. И. Беляева продолжали оставаться в номенклатуре завода, имели широкое применение и были введены в стандарт 1935 г. Интересно, что химический состав стали марок Э2 и Э5, предложенный Н. И. Беляевым, почти совершенно точно совпал с химическим составом стали марок 20ХНА и 12Х2Н4А, состав которых определен нашим стандартом на конструкционную легированную сталь, введенным в 1949 г. Другая же сталь марки Э6 почти точно соответствует стали 30ХН3А того же стандарта. Рассмотрение составов, предложенных Н. И. Беляевым, показывает, что он особенно большое внимание уделял уменьшению содержания вредных примесей и сужению пределов содержания углерода. Прекрасно понимая, что высокие свойства специальной стали могут быть получены лишь при точном соблюдении режима ковки и термической обработки, Николай Иванович обращает особое внимание на точность контроля температуры, а также на многие важные практические приемы закалки, цементации и отпуска, имеющие большое значение для заводов-потребителей. В этой работе Н. И. Беляев выступает не как представитель завода-производителя, а как передовой советский человек, для которого большое значение имеет не только выпуск доброкачественной стали на заводе „Электросталь", но и ее полное использование и обеспечение высокого качества изделий и конструкций там, где эта сталь будет применена.

Благодаря искреннему желанию Николая Ивановича работать для нового советского государства, его честности и абсолютной добросовестности ему было оказано большое доверие советским правительством. Он был привлечен к руководящей работе в целом ряде советских учреждений. Он был членом металлургического совета Отдела металла ВСНХ, членом Электротехнического совета при Комитете государственных сооружений ВСНХ, членом Комиссии по заводскому отделению Военно-технического комитета, председателем Комиссии по обеспечению страны высокосортной сталью, членом правления и техническим руководителем завода „Электросталь". Все это позволяет представить ясную картину большой и многогранной работы Николая Ивановича. К этому можно еще добавить большую научную работу, которую он продолжал вести, а также преподавание в Политехническом институте и общественно-техническую деятельность в качестве заместителя председателя Русского металлургического общества и председателя московского отделения этого общества [1].

---

[1] Д. К. Чернов, А. А. Байков, Н. С. Курнаков, Н. И. Беляев, М. А. Павлов и др. были организаторами Русского металлургического общества и его первыми руководителями.

В период 1917—1919 гг. Н. И. Беляев также продолжает работу над давно задуманным сочинением „Сталь". Эта капитальная работа предполагалась в четырех частях: ч. I. Структура литой стали и условия отливки, ч. II. Структура механически обработанной стали и условия механической обработки, ч. III. Термическая обработка стали, ч. IV. Специальные сорта стали.

Таким образом, новая работа Н. И. Беляева должна была охватить все процессы, происходящие в стали „с момента ее рождения до зрелого возраста". К сожалению, очень трудно представить полное содержание и глубину всех вопросов, рассмотренных Николаем Ивановичем, так как этот труд, уже подготовленный к печати, не был найден после смерти автора. Однако сохранившиеся черновые наброски и отрывки отдельных частей сочинения, отредактированные Н. Т. Гудцовым и Г. З. Нессельштраусом, позволяют все же отчасти представить себе глубину творческого замысла Н. И. Беляева[1] Одна из частей книги Николая Ивановича приводится в настоящем сборнике.

Эта часть посвящена процессу затвердевания стали и описанию тех явлений, которые при этом происходят, а также структуре слитка. Процессу кристаллизации стали Николай Иванович уделял особое внимание и указывал, что „...легко качественно обесценить хорошую сталь в слитке, неправильно отлитом и, наоборот, повысить качественную ценность сравнительно плохой стали в слитке, правильно отлитом. Отсюда важность тех операций, которые, рождая слиток, наделяют его соответственной природой и тесно с последней связанными свойствами"[2].

Помимо работы над трудом „Сталь" Н. И. Беляев часто выступал с докладами по различным вопросам в области металлургии на совещаниях, съездах и т. д. Из этих многочисленных выступлений сохранились лишь некоторые и, в частности, доклад на тему „Классификация высокосортной стали"[3].

В этом докладе дана хорошо продуманная классификация стали по назначению, так как классификация по механическим свойствам годится в одних случаях и не типична в других. Николай Иванович указывает: „Правильнее и естественнее за основание для классификации высокосортной стали принять свойства стали в изделиях, в связи с назначением их"[4]. Отсюда и классы: класс И — инструментальная, класс М — машиноподелочная, класс О — сталь особого назначения.

Следует отметить и некоторые детали этой классификации. Так, например, сталь инструментальную для режущего инструмента Ни-

---

[1] Эти работы Н. И. Беляева опубликованы в сборнике „Сталь. Кристаллизация, термическая обработка и механические свойства, Л. 1925.

[2] Стр. 327 настоящей книги.

[3] Доклад опубликован под тем же названием в книге Н. И. Беляева „Сталь. Кристаллизация, термическая обработка и механические свойства". Л. 1925, стр. 145—156.

[4] Там же, стр. 146.

колай Иванович разделяет по способности сохранять высокую твердость при нагреве до температур 350—600, 300—350 и 200—220°. Наиболее высокому температурному интервалу соответствует быстрорежущая сталь, далее идет специальная сталь и, наконец, углеродистая. Сталь машиноподелочная, или, как мы сейчас называем, конструкционная сталь, разделяется на ряд групп по механическим свойствам, поскольку именно они играют здесь основную роль. К классу особого назначения относятся стали магнитная, маломагнитная, динамная, инвар, жаростойкая и др. Следует заметить, что эта классификация стали широко вошла в практику нашей промышленности.

Николай Иванович выступал с докладами не только на узких совещаниях технических и научных работников, но и на широких общественных съездах. Так, например, в июле 1919 г. он выступил с речью-лекцией на съезде работников губернских отделов по металлам (губметаллов) о высокосортной стали, дав местным работникам ряд практических советов и указаний для их повседневной работы. Известна также его активная деятельность в качестве председателя московского отделения Русского металлургического общества. Достаточно указать, что за период 1918—1919 гг., под руководством Николая Ивановича было подробно обсуждено 25 докладов.

Помимо всей этой работы Н. И. Беляев был привлечен к преподаванию в Московской горной академии, созданной в 1919 г. по постановлению Совета Народных Комиссаров, подписанному Владимиром Ильичем Лениным. Здесь Н. И. Беляеву присуждается звание профессора[1] и он назначается руководителем кафедры „Специальная сталь". В Горной академии Николай Иванович не только читал лекции, которые слушались с большим интересом, но и организовывал лаборатории, так как без сочетания лекций с практическими лабораторными работами он не мыслил подготовки квалифицированных специалистов.

В 1920 г. Николай Иванович командируется на юг России. В выданном ему мандате Отдела металла ВСНХ № 2013 от 6 апреля 1920 г. говорится:

„Настоящим удостоверяется, что предъявитель сего инженер Н. И. Беляев срочно командируется на юг для выяснения состояния специального оборудования на заводах Бахмута, Ростова и Кременчуга в связи с организацией производства струнной проволоки для аэропланостроения и текстильной промышленности (для кардолент), выяснения возможности изготовления на заводе „Электрон" в Славянске крупных электродов для электрометаллургических печей, а также для установления связи с соответствующими учреждениями по вопросам обеспечения промышленности высокосортной сталью.

---

[1] Интересно заметить, что будучи очень скромным человеком, Николай Иванович уже после присуждения ему звания профессора, всегда подписывался „инженер Н. И. Беляев".

Все правительственные и частные учреждения, а также рабочие организации и руководители предприятий, к коим обратится за содействием инженер Н. И. Беляев, призываются оказывать ему полное содействие для исполнения поручений, возложенных на него Центральным органом Рабоче-Крестьянского Правительства"[1] Из этого мандата видно, что Н. И. Беляеву в этот период поручались очень ответственные задачи. Николай Иванович выполнил все возложенные на него задачи. На обратном пути из Ростова в Москву он заболел и 26 мая скончался. Эта внезапная смерть выдающегося деятеля металлургии, русского патриота, преданного советской Родине, была тяжелой утратой для советской науки и промышленности.

В газете „Экономическая жизнь" 28 мая 1920 г. был помещен следующий некролог: „Профессор-инженер Николай Иванович Беляев скончался 26 с. м. Коллегия отдела Металла, потеряв лучшего своего металлурга, скорбит и, учитывая неоценимую потерю в лице покойного для нашей промышленности, взывает ко всем его ученикам и почитателям сплотиться для упорной работы, особенно необходимой в настоящее время"[2].

Так же тяжело и с большой скорбью восприняли рабочие и служащие завода „Электросталь" смерть своего друга и руководителя. В письме общего собрания рабочих, служащих и инженеров завода „Электросталь" от 5 июня 1920 г. говорится: „Мы все, работающие на заводе „Электросталь", все как один человек скорбим о тяжелой утрате, которую мы понесли в лице дорогого Николая Ивановича. Мы потеряли друга, учителя и руководителя. Все, кто знал этого редкого человека, ценили его исключительный ум, его энергию, его знание дела.

Он создал себе памятник при жизни — это завод „Электросталь", где все говорит о его творческом духе"[3].

В газете „Правда" от 17 ноября 1921 г. под заголовком „Завод Электросталь" было сказано: „Завод этот основан был в 1917 г. и пущен был в декабре этого года. С именем завода связана память инженера Н. И. Беляева, безвременно погибшего в прошлом году. Он был его строителем и до самой смерти главным руководителем. Имя его упоминается с благоговением, как техническими руководителями завода, так и рабочими, как только речь заходит о том или другом улучшении или усовершенствовании завода". В этих словах документов ясно чувствуется та большая утрата, которую понесла советская металлопромышленность со смертью Н. И. Беляева. Эти строки также рисуют и благородные черты всего облика Николая Ивановича.

Советское правительство высоко оценило деятельность Н. И. Беляева. Специальным решением Президиума ВСНХ было постановлено издать его биографию и сборник трудов.

---

[1] Настоящий документ хранится в архиве семьи Н. И. Беляева
[2] „Экономическая жизнь" от 28 мая 1920 г.
[3] Настоящий документ хранится в архиве семьи Н. И. Беляева.

Постановлением Совета Народных Комиссаров была обеспечена пожизненно его семья.

В ноябре 1920 г. состоялся I Всероссийский съезд научных деятелей по металлургии. Одно заседание этого съезда было специально посвящено памяти Н. И. Беляева, на котором подробно освещалась как научно-производственная, так и общественная его деятельность. В решениях этого съезда указывается: „Приветствуя постановления Президиума ВСНХ об увековечении памяти инженера Н. И. Беляева, съезд поручает московскому отделению Русского металлургического общества принять со своей стороны меры к исполнению этого постановления“ [1] И вскоре московское отделение Русского металлургического общества приступило к работе по изданию трудов Н. И. Беляева. Была создана специальная комиссия по разбору архива Н. И. Беляева и по изданию трудов, в составе Н. Т. Гудцова и Г. З. Нессельштрауса, которые собрали и обработали черновой материал, вошедший в упомянутый сборник „Сталь“.

Благодаря изданию этого сборника мы имеем возможность и сейчас пользоваться многими статьями Николая Ивановича, которые не утратили своего значения до сих пор и являются блестящей характеристикой выдающегося русского ученого.

Вся деятельность Н. И. Беляева, его научные труды и педагогическая работа показывает, что в его лице мы имели крупнейшего русского ученого и инженера.

Николай Иванович проделал колоссальную работу в области как металлургии, так и машиностроения. Можно смело сказать, что Николай Иванович ввел в науку о металлах представление о том, что свойства металла определяются всей его историей „от рождения и до зрелого возраста“. Именно в связи с этим он много занимался металлургическими процессами выплавки стали и особенно явлениями, происходящими при кристаллизации стали. Огромной заслугой Николая Ивановича является также и то, что он разработал научные основы металлургии и обработки специальной стали, показав, что свойства специальной стали создаются не только введением легирующих элементов, а и всем циклом последующей обработки ее. Он не только создал научные основы обработки специальных сталей, но и явился организатором и техническим руководителем первого в России завода специальных сталей „Электросталь“. Николай Иванович также разработал одну из важнейших областей металлографии — учение о макростроении. Основы этого учения были заложены великим русским ученым Д. К. Черновым, достойным учеником и последователем которого являлся Н. И. Беляев. Помимо этого, им совместно с Н. Т. Гудцовым были проделаны классические работы по механическим свойствам стали с применением комплексных методов иссле-

---

[1] „Сообщения о научно-технических работах в Республике“, вып. V, 1921 г. Краткий обзор трудов Всероссийского съезда научных деятелей по металлургии. М. 1921, стр. 28.

дования и работы совместно с Б. В. Старком по определению газов в стали и т. д.

Большая работа была проведена Н. И. Беляевым по разработке новых марок стали для изготовления снарядов, брони, инструментов, деталей машин и конструкций и методов их обработки.

Педагогическая и производственная работа Н. И. Беляева, как и других наших выдающихся ученых, способствовала созданию школы русских металлургов и металловедов, формированию взглядов многих научных работников и, в первую очередь, Н. Т. Гудцова и Б. В. Старка, которые сейчас сами являются создателями крупных советских научных школ в области металловедения и металлургии. Научные и производственные работы Н. И. Беляева до сих пор не утратили своего значения и явились основанием для многих работ советских ученых, использующих славные традиции русской школы, создавшей металловедение как науку и давшей миру крупнейших ученых.

В решениях недавно состоявшейся в Ленинграде широкой научно-технической сессии по термической обработке стали, созванной для дальнейшего развития содружества науки с производством и посвященной памяти Н. И. Беляева, говорится, что „Н. И. Беляев принадлежал к числу чрезвычайно одаренных натур и явился провозвестником и выразителем новых прогрессивных идей и течений своего времени в области металловедения и термической обработки стали, не утративших и поныне актуального значения для науки и производства“ [1].

Можно смело сказать, что работы Н. И. Беляева сыграли и играют до сих пор большую роль в развитии советской промышленности и науки, двигающихся вперед по пути, предначертанному великим Сталиным. В большом созидательном творческом труде советского народа, в его успехах есть доля труда выдающегося русского ученого, инженера Николая Ивановича Беляева.

---

[1] Из решения, принятого по докладу проф. Г. З. Нессельштрауса „Н. И. Беляев и его труды в области термической обработки стали“. Сборник решений Научно-технической сессии, изданный Ленинградским отделением ВНИТО металлургов, 1950, стр. 7.

СПИСОК ТРУДОВ Н. И. БЕЛЯЕВА

1. Макроструктура стали в связи с кристаллизацией, доклад инж.-технолога Н. И. Беляева в секции металлургии 1 сентября 1910 г., Труды съезда деятелей по горному делу, металлургии и машиностроению, сентябрь 1910, стр. 349—379 (Екатеринослав).

2. Беляев Н. И., Макроструктура стали в связи с кристаллизацией, „Журнал Русского металлургического общества“ № 1, 1910, стр. 1 — 38.

3. Беляев Н. И., Макроструктура и кристаллизация стали, „Stahl und Eisen“ № 24, 1912, стр. 996—999.

4. Беляев Н. И., Зависимость макроструктуры от кристаллизации стали, „Revue de Metallurgie“ v. 9, 1912 (полный перевод доклада на съезде в Екатеринославе).

5. Беляев Н. И., О булате, „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, 1911, стр. 435.

6. Беляев Н. И. и Гудцов Н. Т., О пределе упругости стали, „Журнал Русского металлургического общества“ № 3, 1914, стр. 332—414.

Этот труд содержит три работы:

1) Влияние термической обработки на механические свойства стали;

2) Обзор теоретических исследований и практических работ по вопросу об определении предела упругости;

3) Влияние неоднородности материала на результаты определения предела упругости при статическом испытании на растяжение.

7. Беляев Н. И. и Гудцов Н. Т., О пределе упругости стали, „Revue de Metallurgie“ № 2, 1916, стр. 34.

8. Брошюры Н. И. Беляева „Электросталь“ — первый завод специальной стали в России“:

А. Марки стали, М. 1917;

Б. Автомобильно-аэропланная сталь. Сорта стали и обращение с ними, М. 1917.

9. Беляев Н. И., Сталь. Кристаллизация, термическая обработка и механические свойства, посмертное издание под ред. Н. Т. Гудцова и Г. З. Нессельштрауса, Л. 1925.

Утрачен в связи со смертью подготовленный к печати большой труд Н. И. Беляева „Сталь“ в четырех частях:

ч. I. Структура литой стали и условия отливки;

ч. II. Структура механически обработанной стали и условия механической обработки;

ч. III. Термическая обработка стали;

ч. IV. Специальные сорта стали.

МАКРОСТРУКТУРА СТАЛИ В СВЯЗИ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ [1]

Н. И. БЕЛЯЕВ

Практика, удовлетворяя требованиям техники, применяет сталь в сооружениях, машинах и изделиях или в литом, или механически ковкой, прокаткой и штамповкой переработанном, или термически обработанном виде. Везде, где возможно по конструктивным, экономическим и другим соображениям, она предпочитает механически обработанную сталь литой, а в последнее время в широких размерах пользуется термической обработкой — отжигом, закалкой и отпуском, подвергая ей по преимуществу сталь после механической обработки в горячем состоянии. Получаемый при этом практический результат — в форме работы изделий и машин в условиях нормальной их службы — подтверждал, обыкновенно, как преимущества, в механическом смысле, кованной, катанной и штампованной стали перед литой, так и рациональность пользования термическими обработками. Такой практически установившийся взгляд по отношению к различным сортам углеродистой стали был перенесен и на специальные сорта, когда последние стали входить во всеобщее употребление, вытесняя и заменяя углеродистую сталь. Термическая обработка для этих новых сортов стали стала необходимой и обязательной операцией, так как иначе терялись механическая и экономическая выгоды применения их (высокая цена не окупалась преимуществами в механических свойствах). К сожалению, еще не всеми практическими деятелями последнее положение признается правильным.

Пока не было средств проникнуть во внтуренний мир стали, для оценки свойств ее пользовались химическим анализом и механическими испытаниями, причем последними в наибольшей степени, так как механическими свойствами по преимуществу и можно было надеяться правильно оценить работоспособность стали в частях, из нее изготовленных. Количественное и качественное разнообразие способов механических испытаний, какими располагает современная техника, лучше слов говорит об этом. Правда, почти никогда способами механических испытаний нельзя было с уверенностью воспроизвести действительную механическую работу стали в объеме частей машин, изделий и сооружений во время службы их; тем не менее, такой способ давал возмож-

ность отчасти приблизиться к решению сложной технической задачи: обеспечить возможно меньшей массой стали сопротивляемость части машины, во время нормальной службы ее, сложным и возможно большим механическим силам.

Металлография, достаточно осветив, в лице своих представителей, внутреннее строение стали и изменения этого строения — при посредстве микроскопа и других способов, дала технике новый метод испытания стали — структурный. Структура была поставлена в связь с химическим составом и температурой (т. е. тепловыми операциями). Но практическую цену новый метод может приобрести тогда, когда структура стали будет связана с механическими и другими свойствами ее вообще и в различных изделиях в частности. Очевидно, что эта связь так же естественна, как естественна связь механических свойств с химическим составом. Тот путь, который был избран современной металлографией, например, для оценки механических свойств структурой, оказался пока не совсем верным, так как явился результатом изучения строения стали только при больших сравнительно увеличениях. Исследователи, воспользовавшись микроскопом, сосредоточили все свое внимание на строении и изменениях в строении очень малых (микроскопических) площадок, перенесли это строение на объем изучаемого куска и на весь тот объем, от которого этот кусок отделялся для исследования. Ошибка такого представления о строении стали — в форме определенного объема — особенно рельефно проявлялась тогда, когда этот объем должен был сопротивляться динамическим усилиям и силам, прилагаемым к этому объему по разным направлениям. К сожалению, задача — связать механические свойства стали с структурой не решена до сих пор удовлетворительно, и этим отчасти объясняется недостаточный еще спрос на структурный метод испытания в практическом деле. При удовлетворительном решении этой задачи, за металлографией, в этом частном случае применения методов ее, обеспечно блестящее будущее.

Наблюдения, опыт и систематические исследования методами микро- и макроструктуры привели меня к более ясному представлению о строении и изменениях в строении стали, взятой в определенном объеме, и дают возможность установить ряд новых положений.

Из литературы и практических наблюдений можно почерпнуть ряд фактов, которые наглядно указывают на более грубое сложение стали в определенном объеме, чем о том же говорит микроскоп.

К таким фактам можно отнести следующие.

1. Столбчатое или игольчатое сложение болванок в изломе, причем столбы и иголки расположены нормально к поверхностям охлаждения, Гоу [1] приписывает образование такого сложения

[1] Gow, Iron, Steel and other Alloys, p. 5.

медленному охлаждению стали при отливке. В литературе особенным стремлением к образованию таких иголок отмечена никелевая сталь[1] (при большом содержании Ni). Там же это явление признается вредным и указывается способ к ослаблению этого вреда (уничтожить пока нет средств) возможно быстрым охлаждением стали в изложнице непосредственно после отливки. Очевидно, и в этом случае образование иголок связывается не только с Ni, а с большей или меньшей скоростью охлаждения стали при отливке. В действительности, насколько меня убедил практический материал, иголки имеются в изломах болванок различного поперечного сечения (от 3″×3″ до 24″×24″), различного химического состава (сталь углеродистая, никелевая, хромистая, кремнистая, хромо-никелевая, кремне-никелевая, вольфрамовая, марганцовая, хромо-вольфрамовая и проч.) и различного способа охлаждения. Изломы в этом отношении различаются между собой: резкостью проявления иголок, масштабом самих иголок и площадью, видимо занимаемой ими по отношению ко всей площади излома. Для примера на фиг. 1 дан излом в ½ нат. вел. болванки сечения 120×120 *мм* хромо-никелевой стали состава: C — 0,45%; Cr — 0,60% и Ni — 2,80%.

2. Рассыпание болванок при механической обработке их в горячем состоянии ковкой, прокаткой и штамповкой. Это явление в литературе и практике обычно связывается с пережогом стали вследствие нагревания ее до очень высоких температур в атмосфере окислительного пламени и при содержании в самой стали большого количества газов. Отделяющиеся при этом куски имеют вид или механически слабо сцепленных больших зерен с довольно правильно ограниченными поверхностями, или пучков, в притык сложенных, иногда сильно переплетенных и растрепанных, иголок, или смешанный вид из первых двух. На фиг. 2 и 3 даны два вида кусков, отделенных от двух разных болванок, развалившихся при прокатке: углеродистой стали состава C—0,4% — зерна при увеличении в 2 раза (фиг. 2) и маломагнитной никелевой стали — иголки в нат. величину (фиг. 3) состава: C — 0,6; Cr — 3,0; Ni — 22,0%. Я думаю, что пережог не может создавать таких форм сложения, вопреки мнению, а только обнаруживает уже существовавшие в куске стали такие отдельные объемы — подобно тому, как проявление вызывает изображение, скрытое на фотографической пластинке.

3. При медленном охлаждении расплавленной стали в тигле (например в условиях получения булата) на поверхности затвердевших слитков, под шлаковым слоем, проявляются рисунки кристаллических образований, внешние очертания которых напоминают очертания больших «кристаллов», находимых в усадочных раковинах болванок. Такими рисунками снабжены слитки

---

[1] Abraham, Etude sur certains aciers speciaux, Annales de mines, 1898, p. 265—268.

не только углеродистой стали [1], но и слитки различных специальных сортов. На фиг. 4 в натуральную величину изображен подобный рисунок (части — *ред*) слитка в 1½ пуда весом хромистой стали состава: C — 1,15% Cr — 7,0%.

4. «Кристаллы», находимые в усадочных раковинах болванок, особенно друзы, красиво переплетенные и незаметно сливающиеся с основной массой болванки «кристаллов» — наглядные примеры и показатели того, что и основная масса болванки построена подобным же образом. На фиг. 5 уменьшенным в 2,5 раза представлен большой «кристалл» из моей коллекции с двумя маленькими, соединенными с ним. «Кристалл» (часть его) извлечен из болванки осевой стали весом около 700 пудов. Главные размеры имеющейся части: длина — 24 *см*, наибольший размер поперечного сечения — 9 *см*.

5. В практике установились два термина для характеристики изломов, которые сталь дает при разрушении ее механическими силами — гибом, разрывом, ударом или во время службы изделий: «волокнистый» излом и «зернистый». Один и тот же объем стали может дать, в зависимости от характера и направления сил в отношении различных точек объема, как волокнистый, так и зернистый излом; поэтому способ оценки сложения стали видом излома, полученного в этих условиях, теряет свое значение — из-за возможности впасть легко в ошибку; самый же факт проявления механическими силами в одном случае волокон, в другом — зерен, конечно, показателен для освещения строения стали.

6. К тому же порядку явлений относятся факты, описанные в литературе, а также наблюдения в практике, что никелевые и кремнистые сорта стали после термической обработки закалкой и отпуском приобретают слоистое сложение, которое и обнаруживается, например, при гибе, вообще при изломе. Трудно предположить (как это делают), чтобы закалка с отпуском создавали какие-то слои в стали: вероятнее, что они только рельефнее проявляют то сложение, которое сталь имела до этих операций в том же куске. Можно прибавить, что не только никелевая и кремнистая сталь богаты такими слоями после термической обработки, а и другие сорта — от обыкновенных углеродистых до самых специальных (например быстрорежущая хромо-вольфрамо-ванадиевая сталь), что указывает на какую-то общую причину этого явления.

7. В практике очень хорошее впечатление производят некоторые изломы в изделиях, особенно после термической обработки их, так называемые «вязкие» изломы. С ними обыкновенно связывают высокие механические свойства стали. При внимательном рассмотрении этих изломов (особенно специальных сортов стали, принимающих энергичную закалку) можно легко заметить, что изломы составлены из слоев различной формы, величины

---

[1] Беляев Н. Т., Кристаллизация стали при медленном охлаждении, 1909.

и расположения; причем, поверхности соприкосновения этих слоев резко отличаются от поверхностей изломов самих слоев: они гладки, блестящи и потому легко заметны. Поверхности с подобными характерными признаками можно найти в изломах различных сортов стали, независимо от того, будут они взяты в литом, кованном, катанном или термически обработанном виде, что опять указывает на общую причину этого явления.

8. После закалки изделий, особенно когда они были перегреты или пережжены, на поверхности их можно обнаружить иногда узоры из трещин в виде или довольно правильных сеток, или идущих в одном или нескольких направлениях параллельных изогнутых линий. Однообразие форм узоров, повторяемость одних форм в однообразно изготовленных изделиях не могут быть случайными явлениями и потому не могут остаться без внимания.

9. Продолжительная служба некоторых изделий (например, железнодорожных осей, цепей и пр.) в условиях повторных (особенно динамических) усилий (сотрясений) кончается иногда поломкой их, причем излом имеет обыкновенно очень крупное сложение. Теория объясняет такое сложение развитием его при совокупном действии повторных усилий и времени. Достаточных данных в пользу такого объяснения нет, почему можно предположить, что время и силы сыграли здесь такую же роль, как и пережог, т. е. проявили уже существовавшее, а не развившееся сложение.

10. Наконец, большая разница в механических свойствах стали в изделиях и кусках по разным направлениям, при большой разнице механической горячей обработки их в тех же направлениях (Ле Шателье и другие указывают на это явление в никелевой, кремнистой и отчасти углеродистой стали; в действительности, это справедливо и для других сортов стали: хромистой, хромо-никелевой и пр.), пока не имеет достаточно удовлетворительного объяснения и должна быть разъяснена структурой.

Этими примерами, конечно, не исчерпывается (применительно к данному вопросу) тот фактический материал, для освещения которого техника, в своем постоянном стремлении к этому, не располагает еще достаточными данными. Несомненно, однако, что приведенные и подобные им факты могут служить руководящими нитями при отыскании этих данных и уяснении тех явлений, связь которых с внутренним миром стали вряд ли вызывает сомнения.

* * *

В кристаллическом строении стали, конечно, никто не сомневается. Общепризнан взгляд, что для наглядного проявления этого строения в стали необходимо возможно медленное и спокойное охлаждение ее. Ряд наблюдаемых явлений при застыва-

нии расплавленной массы стали в условиях сравнительно быстрого охлаждения и движения частиц ее противоречит отчасти этому взгляду. Заставляя сталь вращаться при отливке, можно получить полые стальные цилиндры и конусы. Изучение свободных, т. е. внутренних поверхностей этих цилиндров, а также различных изломов, как их, так и конусов, дает довольно ясную внешнюю картину сложения стали, а именно:

1. Свободные поверхности цилиндров представляются сплошь покрытыми ясно выраженными кристаллическими образованиями в виде самостоятельных, подобных обнаженных скелетов. На фиг. 6 дана поверхность цилиндра вольфрамовой стали (C — 1,0%; W — 7%) в натуральную величину; на фиг. 7 — углеродистой стали (C — 0,8%) при увеличении в 2 раза; на фиг. 8 — хромоникелевой стали в натуральную величину. В первом случае вся свободная поверхность разделена как бы на множество одинаковых площадок, и каждая площадка занята самостоятельной кристаллической единицей, в плане — ромбом с резко выраженными диагоналями — осями. Оси в соседних площадках различно взаимно ориентированы. Во втором случае (фиг. 7) ориентировка осей по известным направлениям у группы кристаллических образований одинакова, отчего получается впечатление более длинных осей, как совокупности коротких одного направления, принадлежащих отдельным кристаллическим образованиям. Так как в перпендикулярном направлении наблюдается видимое сложение осей такого же характера, то получается картина деления (на фиг. 7) всей поверхности цилиндра на большие, чем в первом случае (фиг. 6) площадки с различной взаимной ориентировкой осей в них. Как большие площадки составлены из меньших, так эти последние (например фиг. 6) составлены из еще меньших кристаллических образований с одинаковой взаимной ориентировкой осей. В различных точках поверхности конусов наблюдаются обе описанные картины (фиг. 6 и 7) попеременно; а в цилиндрах: с большей толщиной стенок встречается преимущественно картина фиг. 7, с меньшей толщиной стенок — картина фиг. 6. Цилиндры с подобными кристаллическими образованиями требовали для своего застывания от 3 до 4 минут времени, в зависимости от толщины стенки. Представление о размерах цилиндров и кристаллических образований на поверхностях их дает табл. 1.

2. Свежие изломы цилиндров различных сортов стали, охлажденных после отливки на воздухе или в песке (вообще — сравнительно медленно), и по цвету и по характеру однородны и однообразны; на определенной только части поверхности их наблюдается лучистость. Вообще они мало характерны и мало показательны.

3. Изломы (поперечные) цилиндров тех же сортов стали, опущенных непосредственно после застывания в холодную воду, даны на фиг. 9 (сталь с C — 0,8%), фиг. 10 (хромо-никелевая

Таблица I

Сталь	Химический анализ в %				Толщина стенок	Длина оси простой	Длина оси сложной
	C	Cr	Ni	W	в мм		
Углеродистая	0,3	—	—	—	40	1,5—2,0	12
»	0,8	—	—	—	50	2,0—2,5	
Хромо-никелевая	—	0,8	2,8	—	50	2,5—3,5	
Вольфрамовая	1,0	—	—	7,0	45	3,0—3,5	

сталь) и фиг. 11 (осевая с 0,3% C сталь). Излом углеродистой стали взят по трещине, получившейся во время охлаждения водой и, следовательно — окисленный. Характерным и общим на обоих изломах является постепенная смена вида их от внутренней до наружной поверхности. На фиг. 9 и 11 длинные, толстые иголки, вперемежку с короткими более тонкими, параллельно извиваясь или переплетаясь, стремясь при этом в общем сохранить нормальное к внутренней поверхности цилиндра направление, сменяются постепенно слоями: тонких иголок различного направления, больших, меньших и, наконец, едва видимых глазом площадок у самой наружной поверхности. На фиг. 10 место иголок занимают сильно вытянутые перпендикулярно к внутренней поверхности изломы отдельных объемов в виде матовых площадок (цвета излома хорошо закаленной хромо-никелевой стали), резко разделенных светлыми блестящими линиями; их сменяют постепенно меньшие и менее вытянутые площадки — до очень мелких у самой наружной поверхности. Линии раздела этих площадок резко выделяются своим цветом и блеском по всему сечению излома. Представленное на фиг. 9 сложение проявилось резко исключительно благодаря тому, что здесь прошла при закалке трещина, отчего поверхность излома сильно окислилась; свежий соседний излом того же цилиндра почти не отличается от излома цилиндра, охлажденного медленно, исключая самой наружной части, где более резко выделяются слои с строением площадок — вследствие принятия ими вида излома закаленной стали (подобно площадкам хромо-никелевой стали). Сопоставляя, между прочим, два свежих излома цилиндров, закаленных в воде: углеродистой стали (C — 0,8%) и хромо-никелевой стали, можно сказать, что охлаждение резко сказалось в углеродистой стали только на наружном слое, в хромо-никелевой стали — по всему сечению. Чем тоньше стенки цилиндров, тем иголки у внутренней поверхности в углеродистой стали тоньше, а объемы, разделенные блестящими поверхностями, в хромо-никелевой стали меньше. Некоторое представление о размерах

иголок в углеродистой стали и объемов в хромо-никелевой стали дает табл. II.

Некоторые объемы и иголки можно отделить от остальной массы простыми механическими средствами (пальцами, зубилом), правда не в цельном виде; так как несмотря на видимую отдельность их в общей массе, они довольно сильно цепляются друг за друга своими поверхностями и часто даже сильно переплетаются. Тем не менее, имея часть их как самостоятельные единицы, составляющие целое — изучаемый кусок стали, можно получить уже более правильное, осязаемое представление о действительном сложении стали.

Таблица II

Сталь	Толщина стенки в *мм*	Наибольшие приблизительные размеры иголок и объемов в *мм*	
		длина	толщина
Углеродистая (С—0,3%)	40	20	1,0
Углеродистая (С—0,8%)	50	34	2,5
Хромо-никелевая . . .	50	25	4,0

Боковые поверхности отдельных иголок и объемов не гладки, а имеют в первом случае вид очертаний больших «кристаллов» в усадочных раковинах, а во втором — бугристый вид с штриховатостью на них. Чем больше по размерам иголки, тем больше они напоминают «кристаллы» внешним видом.

Выделенная из массы более толстая иголка углеродистой стали (т. е. лежащая ближе к внутренней поверхности цилиндра с толстой стенкой) в поперечном и продольном изломах представляется сплошным телом мелко кристаллического (зернистого) сложения, как принято называть такой излом в практике. В действительности, достаточно простых средств, чтобы разложить эту иголку на более тонкие, составляющие ее. Эти последние стыкаются между собой более гладкими поверхностями, чем большие иголки между собой, и соответствуют более тонким иголкам цилиндров с тонкими стенками или слоев, лежащих ближе к наружной поверхности цилиндра.

Почти на всех поперечных и продольных изломах отдельных объемов хромо-никелевой стали (фиг. 10) при боковом освещении их видна невооруженным глазом штриховатость, обращающая на себя внимание правильностью и закономерностью распределения линий, составляющих ее. Так как это, очевидно, не случайное явление, то представляло интерес сделать снимки некоторых

подобных изломов отдельных объемов с наиболее ясно выраженной картиной штриховатости. На фиг. 12 дан поперечный излом *A* такого объема при увеличении в 15 раз, а на фиг. 13 — продольный излом *B* другого объема при увеличении в 8 раз. Действительные наибольшие размеры сечений этих объемов даны в табл. III.

Таблица III

Излом	Больший размер	Меньший размер
	в *мм*	
A	5,5	3,0
B	25	3,0

На обоих изломах одна и та же характерная картина штриховатости.

1. Резко выраженная (темная) продольная линия, идущая приблизительно посредине площадки и соединяющая две наиболее удаленные одна от другой точки в плоскости излома. Параллельно или почти параллельно ей тянутся другие подобные же линии, только менее ясно выраженные.

2. Их пересекают под прямым углом поперечные линии, которые тянутся в некоторых местах (фиг. 12) через все сечение, или только на части его (фиг. 13). Эти линии так ясно выражены для центральной линии (фиг. 13), что число их на длине оси можно легко сосчитать.

3. Кроме этих двух систем линий имеются еще линии, которые пересекаются с продольными под острыми углами. Они так же ясно выражены, как и другие.

На фиг. 12 видно, между прочим, как один объем стыкается с другим, поперечный излом которого оказался под другим углом и, освещенный слабее, не дал ясной картины штрихов.

Штриховатость, повторяющаяся на большинстве продольных и поперечных изломов отдельных объемов, составляющих сталь, не случайное, конечно, явление и оказалось внешним отпечатком внутреннего строения этих объемов. Для проявления этого строения подготовлены шлифовкой и полировкой два шлифа: части поперечных сечений цилиндров углеродистой стали (C — 0,3%) и хромо-никелевой стали, протравлены 2% раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте; причем, первый был выдержан в реактиве 2 часа, а второй — 6 часов. Если рассматривать поверхность протравленного шлифа хромо-никелевой стали нормально (а не под углом), то можно увидеть точную копию картины излома этой стали, описанную выше, т. е.: площадки с ясными границами, большие и вытянутые у внутренней поверхности, уменьшающиеся по направлению к наружной поверхности и пере-

ходящие в едва уловимые глазом у самой наружной поверхности. То, что можно увидеть на полученных шлифах невооруженным глазом, при рассматривании поверхности их под некоторым углом, представлено на фиг. 15 (хромо-никелевая сталь) при увеличении 15 и на фиг. 16 (углеродистая с 0,3% С) при увеличении в 1,5 раза. Снимки получены при помощи специально приспособленной для этой цели фотографической камеры. Рисунки, проявившиеся на фиг. 15 и 16, в высшей степени интересны, важны и характерны тем, что подобны рисункам штриховатостей на изломах. Как последние включали в себе систему нескольких продольных, поперечных и наклонных линий, так и площадки с ясными контурами на шлифах включают в себе подобную же систему линий. На фиг. 15 легко выделить системы линий, принадлежащие различным площадкам, т. е. объемам.

Если взять поперечное сечение «кристалла», получившегося в усадочной раковине большой болванки, приготовить шлиф и протравить его тем же способом, получится рисунок, изображенный на фиг. 14. Между рисунком штриховатости в изломе отдельного объема, макроструктурой сечения объема, дающего этот излом, и макроструктурой поперечного сечения «кристалла»— полное соответствие. Это дает возможность установить, что объемы в хромо-никелевой стали и иголки в углеродистой стали выражают собой самостоятельные кристаллические единицы и что они составлены из меньших объемов, известным правильным образом распределенных в пределах больших объемов. Рассмотрением этих меньших объемов как самостоятельных единиц, может заняться и занимается микроструктура. Разница между отдельными объемами или иголками выражается большей или меньшей сложностью строения их, т. е. бо́льшим или меньшим числом линий в пределах сечений их: поперечное сечение большого «кристалла» имеет их очень много, сечение кристалла [1] хромоникелевой стали, лежащего ближе к внутренней поверхности цилиндра, — меньше, лежащего дальше от этой поверхности, — еще меньше и т. д.

Остается еще не вполне ясным вопрос о построении той части сечения, которая непосредственно соприкасается с изложницей, т. е. находится в условиях более быстрого охлаждения, чем остальная масса стали. Благодаря очень малым кристаллам, сидящим здесь впритык, эта часть трудно поддается макроскопическому анализу. Чтобы более определенно подойти к решению этого вопроса, было произведено исследование с каплями, полученными отливкой минимального количества расплавленной тигельной стали различного химического состава в холодную

---

[1] Название «кристалл» неудачно дано индивидуумам, образующимся в усадочных раковинах болванок или составляющих какой-либо объем стали, как, например, в данном случае (ибо кристалл представляет собой однородное тело). Тем не менее, в последующем изложении я сохраняю это название, не имея возможности подыскать пока более подходящее.

воду. Сталь из ложки заставляли капать в воду температуры около 15°, налитую в цилиндр длиной в 1,5 *м* и диаметром в 100 *мм*. На фиг. 17 в натуральную величину дана серия таких капель пяти различных сортов стали. Для более ясного представления о них на фиг. 17 дан параллельно масштаб (бумага с миллиметровыми делениями), а в таблице IV сгруппированы некоторые данные.

Таблица IV

Сталь	Приблизительный химический состав в %				Вес капли в *г*	Объем в виде шара *d* в *мм*
	C	Mn	Cr	Ni		
1. Углеродистая	0,6	0,2	—	—	1,6	7,3
2. Марганцовая	1,1	13,5	—	—	2,5	8,5
3. Углеродистая	1,2	0,2	—	—	0,77	2 по 4,6
4. Хромо-никелевая	—	0,3	0,8	2,9	3,8	9,75
5. Хромистая	1,0	0,2	1,2	—	0,6	5,3

Приготовлены шлифы двух капель: хромо-никелевой (№ 4) и марганцовистой (№ 2). После соответствующей протравки оба шлифа сняты под углом; фиг. 18 — хромо-никелевая сталь (увелич. 20), фиг. 19 — марганцовистая сталь (увелич. 20). Достаточно взглянуть на снимки, чтобы установить тождественность этих картин с картинами на свободных поверхностях цилиндров, штриховатостями на изломах отдельных кристаллов, составляющих сталь, макроструктурой этих кристаллов и больших кристаллов, находимых в усадочных раковинах болванок. Разница: в масштабе кристаллических образований, принадлежащих определенному кристаллу, и в ориентировке их в соседних кристаллах, подобно тому как мы это уже видели на внутренних свободных поверхностях цилиндров. При рассмотрении шлифов капель невооруженным глазом и не под углом ясно видно, что площадь их составлена из маленьких площадок — сечений кристаллов, составляющих объем капли. Ориентировка кристаллических образований в соседних кристаллах (фиг. 18 и 19) весьма различна.

В 1908 году 10 декабря, в заседании Металлографической комиссии при Русском техническом обществе мной (в докладе «Практическое значение металлографии в производстве стали») было высказано положение, что все наши изделия, выполняющие известную техническую работу, составлены из кристаллов, совершенно таких же, какие находят иногда, в виде больших кристаллов, в раковинах больших и малых болванок. Сейчас это положение, я думаю, нашло наглядное подтверждение в раз-

ложении на такие кристаллы различных объемов стали в литом виде, начиная от капли и кончая самыми большими болванками, какие когда-либо и где-либо отливались; ибо все болванки будут различаться между собой, в зависимости от поперечного сечения, массы и способа отливки их, величиной составляющих их кристаллов, формой этих кристаллов, характером их распределения и построения из меньших кристаллов. Излом болванки (например фиг. 1), проявляя наглядно сложение ее из отдельных кристаллов— иголок в определенной части (наружной), не проявляет подобных кристаллов в остальной части — центральной и представляется поэтому в этой части имеющим мелкое строение, во всяком случае — более мелкое, чем представляют собой иголки. Эта кажущаяся мелкость сложения (в действительности, как доказано, эта часть занята более крупными кристаллами) — наглядный пример того, как ошибочны могут быть заключения о материале на основании рассматривания изломов. Необходима специальная подготовка материала, чтобы излом дал более ясное представление о сложении стали в массе куска или изделия, например: закалка куска перед изломом его; окисление поверхности излома водой при закалке (как мы имели в случае углеродистой стали), сопровождающейся трещинами; действие на излом растворами кислот и пр. Поэтому лучше не пользоваться методом рассмотрения изломов, если не применять при этом вполне определенных предварительных подготовок тех кусков, по излому которых предполагается делать выводы и заключения.

Макроструктура кристаллов, составляющих сталь, т. е. больших площадок (подобная фиг. 15 и 16), характерная своей правильностью, тонкостью и ясностью рисунков, есть общее, типично резкое явление для всех сортов стали (обыкновенных углеродистых и специальных) и всех способов получения их, так как она есть непременная принадлежность отдельных кристаллов, составляющих сталь, а сталь всегда состоит из таких кристаллов. Для примера дана макроструктура трех сортов стали. Фиг. 20 и 21 — сталь в количестве 1,5 пудов, расплавленная в тигле, охлаждалась очень медленно вместе с тиглем (в условиях получения так называемой булатной стали). Из полученных слитков были вырезаны продольные пластинки. На фиг. 20 при увеличении в 3,5 раза снята часть такой пластинки, протравленной водным раствором двойной медноаммиачной соли в течение нескольких секунд. Выбран участок, где наглядно рез прошел приблизительно через средние сечения трех близко друг к другу лежащих кристаллов. Химический анализ слитка дал: C — 0,40%; Si — 0,08%; Mn — следы; S — 0,022%.

На фиг. 21 при увеличении в 5 раз дана макроструктура шлифа, отрезанного от продольной пластины стали другого состава: C — 1,40%, Mn — 0,23%, P — 0,023%, S — 0,012%. Шлиф протравлен особым способом: кусок с полированной поверхностью помещен в небольшой железный цилиндр (который

герметически закрыт пробкой), вместе с цилиндром положен в электрическую печь, нагрет до 600°, выдержан 3 часа и медленно охлажден с печью. Цементит при этом окрасился в черный цвет. На снимке (снят вид шлифа по нормали, а не под углом) проявилась ясная картина макроструктуры отдельных составляющих сталь кристаллов. Светлые части на снимке заняты цементитом.

На фиг. 22 при увеличении в 5 раз дана макроструктура части сечения болванки, отлитой обыкновенным способом (в чугунную изложницу). Сечение болванки: 75 × 75 *мм*. Химический анализ стали: C — 1,94%, Si — 0,07%, Mn — следы, P—0,005%, S — 0,013%.

* * *

Скорость охлаждения стали в форме определенного объема, зависящая от охлаждающейся массы (например: капля в 1 *г* и болванка в 1000 пуд.); при одной и той же массе — от распределения ее в объеме (малые и большие сечения), от охлаждающей среды (вода и формовочная отливка), от химического состава (тугоплавкие и легкоплавкие составы) и других причин, как мы видели, влияет на величину и форму кристаллов, составляющих этот объем, а также на характер распределения их в последнем. Капля и друза из усадочной раковины — в составных своих частях — приблизительные крайние видимые пределы этих кристаллов. Но несмотря на скорость охлаждения и состав, каждый кристалл, независимо от величины его, формы и положения, макроскопически неоднороден. Образование как отдельных кристаллов, составляющих сталь, так и неоднородности строения их, относятся к периоду перехода стали из жидкого в твердое состояние. В пользу такого положения говорят следующие факты и наблюдения.

1. Опытами Таманна установлено, что переход жидкой фазы в твердую слагается: 1) из самопроизвольного зарождения в жидкой фазе центров кристаллизации, число которых в единицу времени и в единице массы зависит главным образом от состава и температуры, и 2) из нарастания твердой фазы от этих центров с определенной линейной скоростью кристаллизации. Очевидно, момент полного затвердения должен совпасть с окончательным формированием и стыканием между собой отдельных кристаллов, число которых равно числу образовавшихся центров кристаллизации.

2. Рисунок неоднородности (ветвистости), рельефно выступающий в плоскости шлифов, как капель, так и сечений, больших кристаллов и видимый невооруженным глазом или при минимальных увеличениях (5—10 раз) есть рисунок «идиоморфных» и «псевдоморфных» кристаллических образований, весьма характерный и типичный для большинства более легкоплавких сплавов, чем железо с углеродом. Это указывает на последова-

тельность выпадения твердых фаз (как в большинстве сплавов), на свободное расположение их, под влиянием кристаллических и других сил, в остающемся жидким маточном растворе и на необходимость последними частями этого раствора принять форму псевдоморфных кристаллических образований. Период перехода расплавленной массы стали из состояния жидкого раствора в состояние твердого раствора захватывает, как известно, определенный интервал температур, — разный для различных сортов стали — в зависимости от химического состава их. По теории Розебума процесс затвердевания стали идет путем последовательного выделения и группировки (с момента зарождения центров кристаллизации) твердых частиц переменного состава и обогащения остающейся в каждый данный момент жидкой части углеродом за счет менее богатых углеродом выделяющихся твердых частиц. Конечным результатом такого процесса, если принять, что он совершается по указанной схеме, должна быть неоднородность твердого раствора. Это согласуется с макроскопическими рисунками, представленными в настоящей работе, которыми, или им подобными, я уверен, обладают все затвердевшие сплавы железа с углеродом или другими специальными примесями. Положение, выставляемое многими, что диффузия во время процесса затвердевания и последующих периодов охлаждения сглаживает эту неоднородность, может быть, отчасти и справедливо; если же иметь в виду, что 1) диффузия в твердом теле совершается очень медленно, 2) ей могут встретиться чисто механические препятствия в виде часто встречающегося в стали сернистого марганца (MnS) и устойчивых соединений (при специальных сортах стали), то, надо думать, неоднородность твердого раствора в определенном объеме затвердевшей стали скорее правило, чем исключение. Не надо упускать из виду, что наиболее медленное охлаждение (когда диффузия, казалось бы, должна сильнее всего проявить свое влияние), например, при получении булатных слитков или при формировании больших кристаллов в усадочных раковинах больших болванок, не избавляет от неоднородности, а скорее даже увеличивает ее (см. фиг. 20 и 21).

3. Внешние очертания кристаллов, составляющих сталь, совершенно подобны очертаниям кристаллов из усадочных раковин, что указывает на одинаковые условия образования их, т. е. в период перехода стали из жидкого в твердое состояние.

4. Изломы и шлифы конусов, полученных в условиях вращения стали при отливке ее, весьма типичны, а главное — характерны своей доказательностью в пользу образования кристаллов, составляющих сталь, и структуры их в период затвердевания стали. Конусы, непосредственно после затвердевания, вынимались из изложницы и охлаждались в баке с холодной водой. Изломы и шлифы сделаны перпендикулярно оси — у вершины конусов. На фиг. 23 дан подобный излом хромоникелевой стали в натуральную величину, на фиг. 24 — шлиф осевой углеродистой

стали в натуральную величину и на фиг. 25 — часть этого же шлифа при увеличении в 5 раз. На изломе (фиг. 23) наблюдаются вихри, образованные отдельными деформированными кристаллами, уложенными спиралеобразно; на фиг. 24 и 25 подобная же картина образована соответствующим распределением и деформацией основных линий макроструктуры. Эти явления могли так наглядно проявиться при наличности совместного действия сил кристаллизации и, очевидно, механических, вызванных вращением стали, при условии наименьшего сопротивления этим силам со стороны подвижности частиц стали. Подвижностью же частицы обладают тогда, когда они входят в состав жидкого раствора, или когда, будучи твердыми, могут легко сдвигаться в отдельности или в системе подобных себе частиц, при непременном условии существования соседних жидких частиц или систем их. С момента застывания последних жидких частиц в определенном объеме стали, последний вряд ли способен деформироваться в отдельных частях своих, при сохранении им определенной формы, в данном случае — конуса.

5. Наконец, в целом ряде кусков углеродистой и специальной стали, взятых от различных готовых изделий, прошедших через серию промежуточных термических операций и, следовательно, претерпевших ряд нагреваний, иногда до очень высоких температур, проявленные макроскопические рисунки строения кристаллов подобны и в главных своих частях не изменяемы температурой. Иначе говоря, существующие термические обработки стали, связанные с прямыми и обратными превращениями в ней (с критическими точками): отжиг, закалка, отпуск не изменяют величины, формы и распределения составляющих сталь кристаллов, а равно и общей картины распределения вещества в них. Это указывает на то, что не этими и им подобными операциями над затвердевшими объемами вызваны макроскопические рисунки строения их.

Ввиду важности этого положения, последнее подтверждается следующим опытом (из серии подобных же, произведенных в разное время над различными сортами стали). От готового изделия после окончательной обработки его закалкой и отпуском (закалка при 850° и отпуск до 550°) отрезан небольшой кусок (химический анализ стали: C — 0,45%; Si — 0,30%; Mn — 0,45%; P — 0,03%; S — 0,01%; Ni — 1,25%). С площади шлифа его, протравленного 2% раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте, снята фотография — 1-й макроскопический рисунок. Протравленный слой снят шлифовкой, после чего кусок, для предохранения от окисления, положен в небольшой железный цилиндр, который затем плотно закрыт пробкой на резьбе. Цилиндр помещен в электрическую печь, кусок нагрет до 890° и медленно охлажден с печью. С той же площади шлифа после протравки ее снят 2-й макроскопический рисунок. После этого кусок нагрели до 850°, закалили при этой температуре в воде +15°

и отпустили до 580° и с той же площади шлифа сняли после протравки 3-й макроскопический рисунок. Поместив кусок снова в железный цилиндр, его нагрели до 1150°, выдержали при этой температуре в течение 24 часов, медленно охладили с печью, затем снова нагрели до 850°, закалили при этой температуре в воде + 15° и отпустили до 550°. С прежней площадки шлифа после протравки сняли 4-й макроскопический рисунок. В табл. V сгруппированы все последовательные операции.

На фиг. 26 при увеличении в 5 раз дана макроструктура площади куска в том его состоянии структуры, в каком он находился в изделии; на фиг. 27 при увеличении в 5 раз — макроструктура той же площади после 4-й операции (см. табл. V).

Таблица V

№ операции	Термическая обработка	t закалки или отжига	Охлаждающая среда	t отпуска
1	В виде изделия	850	Вода + 15°	550
2	Отжиг с медленным охлаждением	890	Печь	
3	Закалка и отпуск	850	Вода + 15°	580
4	Нагревание при 1150° в течение 24 часов, закалка и отпуск	850	Вода + 15°	550

Из сравнения не только этих двух снимков, а всех четырех (два не даны), можно сделать следующие заключения.

1. Макроструктура площади до термических операций (фиг. 26) и после всех операций (фиг. 27) одна и та же: оба рисунка можно совместить до совпадения всех линий и площадей как будто снимки сделаны с одной и той же картины, только в двух экземплярах.

2. В обоих случаях рисунки характерны резкостью контуров отдельных частей. Это наблюдается всегда при совместном применении соответствующих закалок и отпусков, или при удачно выбранных только закалках. Отжиг (операция 2, табл. V), не изменяя общей картины макроструктуры, вносит в нее элементы расплывчатости и, видимо, только сглаживает неоднородность.

3. Одна и та же последняя термическая операция, независимо от ряда предыдущих, дает одну и ту же картину макроструктуры. Вот почему, при изучении тех изменений, которые вызывает температура, необходимо начальную и конечную картины макроструктуры приводить к одному знаменателю применением строго одних и тех же последних термических операций. Этот вывод весьма важен в технике исследования строения стали.

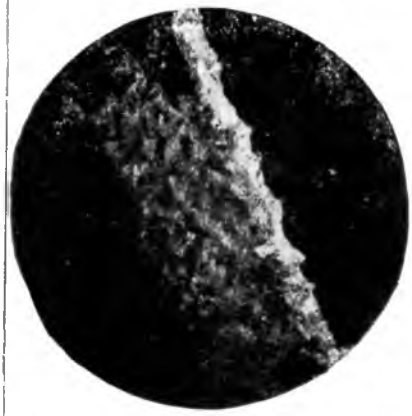
Фиг. 1. × 0,5.

Фиг. 2. × 2

Фиг. 3. (нат. вел.).

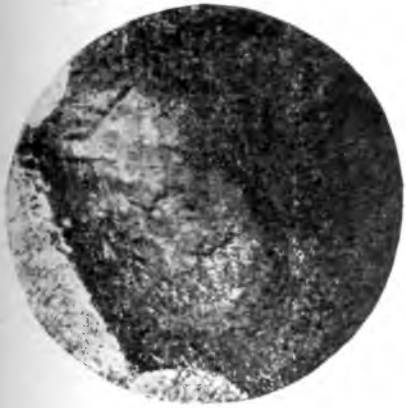
Фиг. 4. (нат. вел.).

Фиг. 5. × 2,5.

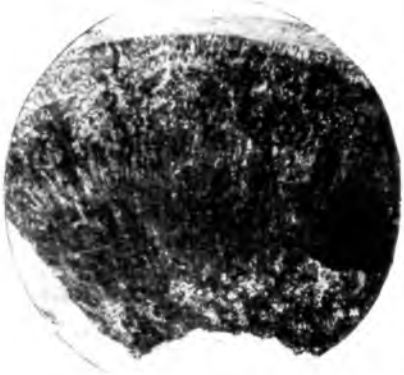


Фиг. 6. ×2.

Фиг. 7. × 2.



Фиг. 8. (нат. вел.).



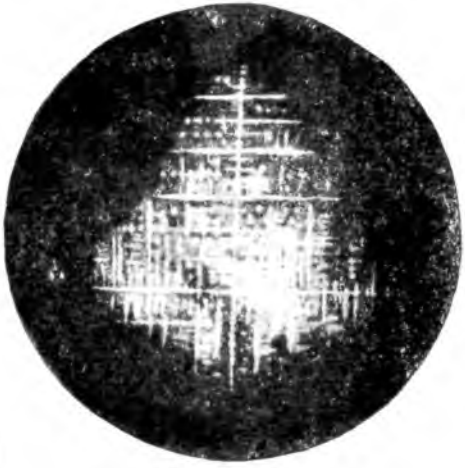
Фиг. 9. (нат. вел.).

Фиг. 10. (нат. вел.).

Фиг. 11. × 2.

Фиг. 12 × 15.

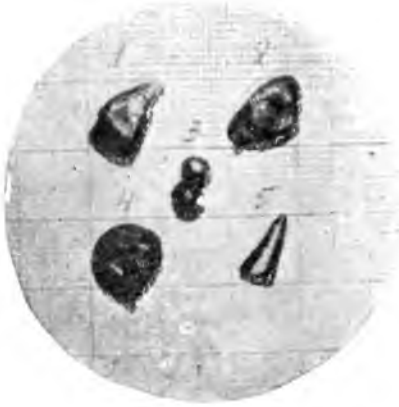
Фиг. 13. × 8.



Фиг. 14. × 2.

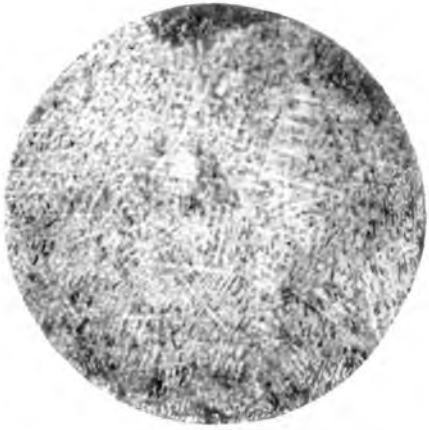
Фиг. 15. × 15.

Фиг. 16. × 1.5.

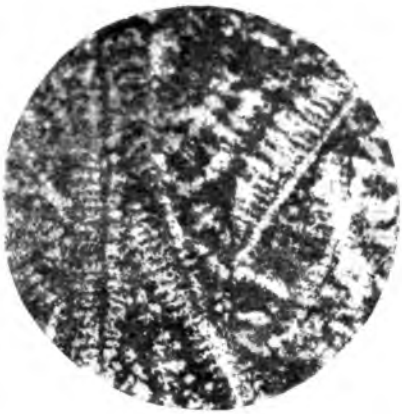


Фиг. 17. (нат. вел.).

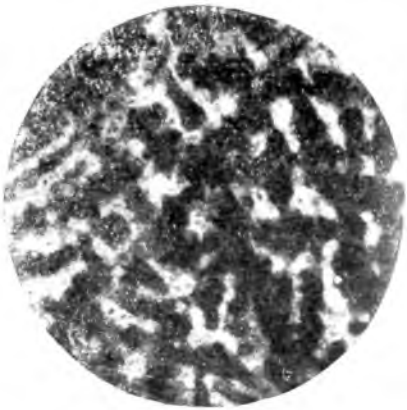
Фиг. 18. × 20.



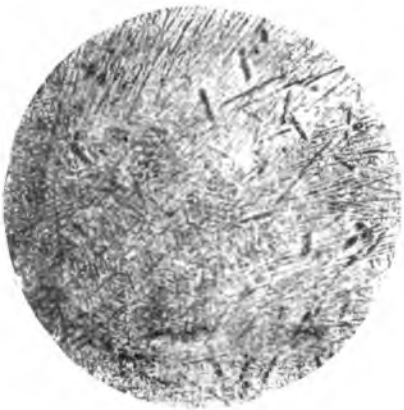
Фиг. 19. × 20.



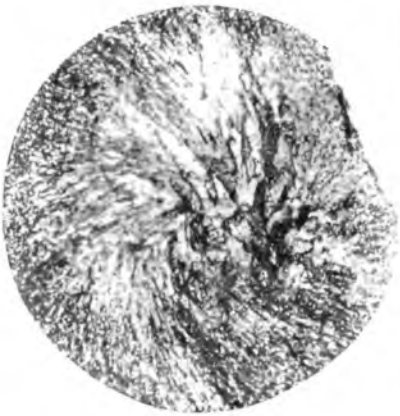
Фиг. 20. × 3,5.



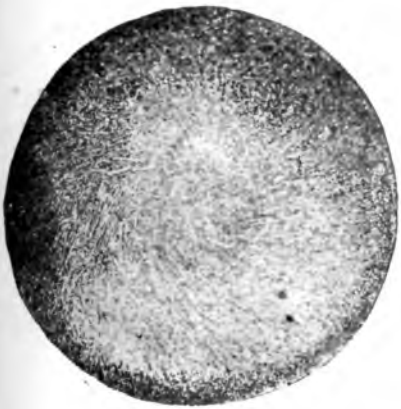
Фиг. 21. × 5.



Фиг. 22. × 5.



Фиг. 23. (нат. вел.)



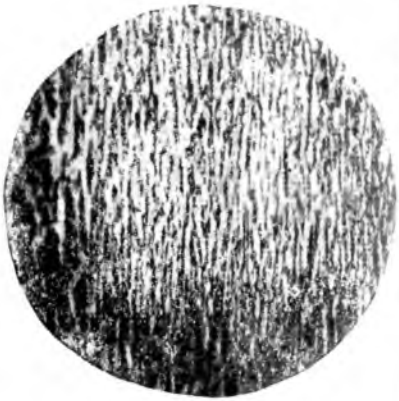
Фиг. 24 (нат. вел.).

Фиг. 25. × 5.

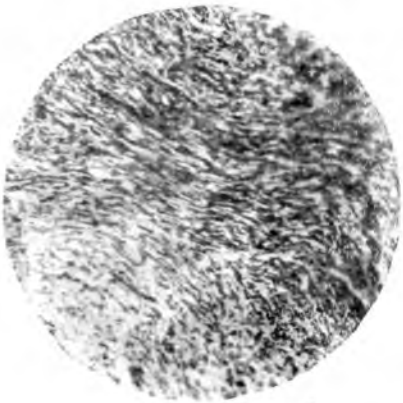
Фиг. 26. × 5.

Фиг. 27. × 5.

Фиг. 28. × 5.



Фиг. 29. × 5.



Фиг. 30. × 5.

* * *

При неизменяемости термическими обработками общей картины строения стали из отдельных кристаллов и общего характера внутреннего построения этих кристаллов, проявляющегося на шлифах их типичными макроскопическими рисунками, легко предвидеть, как отразится на этих кристаллах и макроструктуре их механическая обработка в горячем состоянии: прокатка, ковка и штамповка. На последние операции смотрели обыкновенно как на такие, которые помимо достижения требуемых техникой форм способны были улучшать механические и другие свойства стали в литом виде. Пользуясь практически действительными преимуществами кованной и катанной стали перед литой, не могли, однако, достаточно удовлетворительно объяснить теоретическую разницу между механически обработанной и литой сталью. Сейчас это объяснение вытекает из сравнения макроструктуры стали в литом и механически обработанном виде, а также из доказанного только что положения относительно неизменяемости этой макроструктуры от температуры. Все механические обработки в горячем состоянии, помимо достижения формы, производят механическое деформирование и перемещение кристаллов и, следовательно, вызывают соответствующее механическое изменение и макроструктуры этих кристаллов в плоскости сечений их. Что в определенном объеме вращающейся части стали, ограниченном размерами изложницы, однообразно (вихри) выполняется силами в периоде застывания стали, то в большей степени и в более разнообразной форме достигается в затвердевшей стали прокаткой, ковкой и штамповкой — при условии принятия куском стали последовательных разнообразных форм — до требуемой практикой формы включительно. На фиг. 28, 29 и 30 даны три случая, когда влияние механической обработки проявилось на шлифах макроструктурой.

1. Фиг. 28. Болванка тигельной инструментальной стали (состав: C — 0,69%; Si — 0,20%; Mn — 0,14%; P — 0,027%; S — 0,025%), весом в 3 пуда и сечения 5 × 5″, прокована в круглую заготовку $d = 2{,}5''$. Часть этой заготовки отожжена при температуре 760° с медленным охлаждением. На фиг. 28 при увеличении в 5 раз дано поперечное сечение этой заготовки (часть его) после протравки пикриновой кислотой (2% раствор в спирте) в течение 1½ часов. Ковка нарушила правильность взаимного положения основных линий макроструктуры той же стали в литом виде.

2. Фиг. 29. Болванка осевой стали (C—0,26%) весом в 60 пудов прокатана в заготовку. Из заготовки получена прокаткой полоса длиной 144″, шириной 16″ и толщиной 20 *мм* (раскатка в длину приблизительно в 9 раз больше, чем в ширину). Часть полосы — площадка 16 × 8″ — закалена при температуре 950° в проточной воде 10° и отпущена до 650°. На фиг. 29 дан при увеличении в 5 раз продольный шлиф, протравленный 2% раствором пикри-

новой кислоты в спирте в течение 6 часов. Вытяжка сказалась больше всего в средней части по толщине листа.

3. Фиг. 30. Болванка маломагнитной никелевой стали (C — 0,6%; Ni — 23,0%; Cr — 3,0%), прокатана в лист. По длине листа вырезана планка приблизительно квадратного сечения, которая раскована в брусок меньшего сечения. На фиг. 30 при увеличении в 5 раз дано поперечное сечение его после закалки при температуре 1100° в воде с температурой — 2°. Шлиф протравлен реактивом *D* Курбатова в течение 4 часов.

На приведенных примерах видно, как наглядно механическая обработка изменяет макроструктуру литой стали и как по макроструктуре можно делать заключение о характере и степени механической обработки в горячем состоянии. Структурная разница между литой и механически обработанной сталью, по моему мнению, и выражается главным образом разницей в макроструктуре их. Насколько это может быть связано с разницей в свойствах той и другой стали, должны выяснить, очевидно, систематические исследования.

* * *

Мною было указано выше, что макроструктура особенно легко и рельефно проявляется в кусках стали после подготовки их подходящей в каждом данном случае термической обработкой. Такой обработкой будет каждая, вызывающая в соседних частицах или объемах резко различные изменения строения и заставляющая их резко различно относиться к действию одного и того же реактива (одни части, например, окрашиваются им, другие — нет). Эта разница может, очевидно, произойти от различного состава этих соседних частиц и объемов, занимающих почти неизменно предназначенное им место в куске. Отсюда вытекает представление о стали как о совокупности частиц или объемов различного состава, микроскопически или макроскопически изменяющихся в своем строении под влиянием различных факторов, могущих произвести эти изменения. Макроструктура в этом смысле очень хорошо согласуется с микроструктурой, что будет содержанием моей ближайшей работы. Таким образом, макроструктура термически обработанной стали есть результат неоднородности твердого раствора, которая не уничтожается термической обработкой, а только или видимо сглаживается, или видимо рельефно проявляется. Как одна и та же термическая обработка различно сказывается на различных сортах стали, так та же термическая обработка различно стражается на неоднородных по составу соседних частицах или объемах в куске стали. Так как пока нет термической обработки, которая могла бы уничтожить разницу в составе соседних частиц или объемов в стали, то эта разница и выражается всегда на макроструктуре в большей или меньшей степени термической обработкой. С мак-

роскопической неоднородностью стали в термически обработанном виде могут быть связаны различные свойства стали, что может быть выяснено только систематическими исследованиями.

* * *

Выводы настоящей работы сводятся к следующему.

1. Сталь в литом виде составлена из самостоятельных кристаллов, совершенно подобных кристаллам усадочных раковин, болванок — по внешним очертаниям и по внутреннему построению. Величина, форма и распределение этих кристаллов в болванке различны в зависимости от разных условий: массы, формы сечений, состава, обстановки, отливки и проч.

2. Строение кристаллов, составляющих сталь, типично выражается макроструктурой их, подобной макроструктуре кристаллов усадочных раковин.

3. Как образование кристаллов, составляющих сталь, так и построение их начинается и заканчивается в периоде перехода стали из жидкого в твердое состояние.

4. Макроструктура кристаллов и, следовательно, стали есть следствие неоднородности твердого раствора и потому есть общее типичное явление для всех сортов стали.

5. Макроструктура в главных своих чертах не изменяется температурой, т. е. обычными нагреваниями: при ковке, прокатке, штамповке и при термических обработках отжигом, закалкой и отпуском; иначе говоря, макроструктура — есть устойчивая форма строения стали.

6. Механическая обработка в горячем состоянии вызывает только деформацию кристаллов, механические перемещения и перегруппировки частиц, составляющих кристаллы, что выражается соответствующими механическими изменениями в макроструктуре.

7. Термическая обработка вызывает только местные микроскопические изменения в строении соседних частиц и объемов, образующих макроструктуру кристаллов стали.

Как следствие, структурная разница между сталью: 1) в литом, 2) в механически (ковкой, прокаткой и штамповкой) переработанном виде и 3) в термически (отжигом, закалкой и отпуском) обработанном виде выражается следующим образом:

1. Сталь в литом виде сложена из кристаллов, различных по величине, форме, общему и взаимному расположению, совершенно подобных кристаллам усадочных раковин как по внешним очертаниям, так и по внутреннему строению — по макроструктуре.

2. Сталь в механически обработанном виде сложена из тех же кристаллов, как литая сталь, но в деформированном, переплетенном виде, согласованном с характером и степенью механической обработки, что на сечениях шлифов рельефно проявляется соответствующими механическими изменениями в макроструктуре.

3. Сталь в термически обработанном виде сложена из тех же кристаллов: в их естественном (в литой стали) или в перегруппированном (в механически обработанной стали) виде, претерпевших в различных частях своих объемов изменения, как результат согласования состава в каждой точке с температурой и обстановкой термической обработки, что проявляется соответствующими изменениями в макроструктуре и микроструктуре стали.

Январь 1910 г.

СТАЛЬ [1]

Н. И. БЕЛЯЕВ

ЧАСТЬ I

СОДЕРЖАНИЕ

Понятие „слиток стали". Чем обусловливаются вес и форма слитка? Явления в слитке, связанные с качеством стали в состоянии жидкого раствора и условиями затвердевания ее и охлаждения после затвердевания: кристаллизация, ликвация, усадочная раковина, газы и трещины. Общая причина этих явлений. Влияние условий отливки на характер и степень проявления этих явлений.

А. СТРОЕНИЕ СТАЛИ В ЛИТОМ ВИДЕ И УСЛОВИЯ ОТЛИВКИ

Полученный в мартеновской или электроплавильной печах сравнительно большой объем стали в жидком состоянии процессом отливки разбивается на ряд меньших объемов. Каждый такой объем, охлаждаясь и затвердевая, приобретает внешнюю форму, определяемую внутренними очертаниями того сосуда, в который он был помещен, находясь в жидком состоянии. Внешняя форма объема определяется дальнейшим назначением его: она более простая — когда объем стали подвергается механической обработке (в прокатных станах, под молотами, прессами и пр.), которой ему придается форма, близкая или соответствующая форме изделия; она более сложная — когда объем стали не подвергается такой механической обработке и по своей форме должен отвечать или быть очень близким к форме изделия. В первом случае объем стали называют обычно слитком, во втором случае — фасонной отливкой. Собственно говоря, фасонную отливку можно также назвать слитком, и говорить о каждом затвердевшем объеме стали, независимо от его формы и назначения, как о слитке.

Вес слитка, в случае фасонной отливки, является величиной более или менее постоянной, так как определяется весом одного изделия. При получении же изделий путем механической обработки (прокаткой, ковкой, штамповкой и пр.) вес слитка для них может быть переменным и определяется количеством изделий, получаемых из одного слитка. Очевидно, это количество не может

быть больше того, которое допускают технические средства (слиток предельного возможного веса, сила прокатного стана, сила молота, мощность пресса), но оно может быть и не больше одного изделия; в последнем случае необходимый вес слитка мало отличается от веса слитка при получении того же изделия (если это возможно) фасонной отливкой [1].

При получении требуемой формы изделия тем или другим способом руководствуются обычно рядом соображений: условиями требуемой прочности изделия (сообразно с работой его), легкостью получения, экономическими соображениями и пр. Самую сложную форму изделия можно получить обработкой на механических станках далекого по форме от изделия слитка стали, полученного как при фасонной отливке, так и при механической горячей переработке.

Не всякую сложную форму изделия можно получить фасонной отливкой, а равно и механической горячей обработкой, чаще первым или вторым способом получают форму, близкую к требуемой, которая достигается уже механической обработкой на станках. Степень приближения может быть весьма различна, и иногда объясняется просто чистотой работы, что выражается наглядно бо́льшими или меньшими припусками на механическую обработку, если она вообще необходима (случаи, когда изделия после отливки или штамповки идут в дело, непосредственно не подвергаясь механической обработке или подвергаясь обработке только в некоторых частях своей поверхности). Механической горячей обработкой слитка, для получения требуемой формы пользуются несравненно чаще, чем фасонной отливкой, и даже тогда, когда последним способом достигнуть это легче и удобнее.

При массовом изготовлении ходовых изделий стремятся обыкновенно получить большое количество изделий из одного слитка, руководствуясь главным образом экономическими соображениями. Тяготение к слиткам большого веса — на заводах нормальное явление.

Применение того или другого веса слитка, того или другого способа получения изделия из определенного объема жидкой стали должно иметь прочные основания.

Качество изделия, несомненно, тесно связано с качеством стали, полученной одним из современных металлургических процессов (мартеновским, тигельным, электроплавкой). Высокое качество стали, находящейся в жидком состоянии или в состоянии так называемого жидкого раствора, еще не предопределяет высокого качества изделия. На последнем в большей степени может отражаться влияние тех явлений, которые вызываются процессом затвердевания жидкой стали в объеме слитка. Эти явления со-

---

[1] На полях рукой Н. И. Беляева сделаны следующие пометки: „А форма слитка? Большой конус и большие размеры сечения при прокатке. Затруднения в разливке при малом весе слитка в мартеновск. производстве. Большой слиток при тигельном производстве“.

ставляют природу слитка, в гораздо большей степени зависящую от той обстановки, в которой идет затвердевание стали, чем от качества самой стали (в жидком виде). Поэтому, легко качественно обесценить хорошую сталь в слитке, неправильно отлитом и, наоборот, повысить качественную ценность сравнительно плохой стали в слитке, правильно отлитом. Отсюда — важность тех операций, которые, рождая слиток, наделяют его соответственной природой и тесно с последней связанными свойствами. Эти операции должны еще более выиграть в своем значении, если признать, что и успех механической и термической обработок, как это будет доказано впоследствии, тесно связан с природой слитка. Конечной целью всех этих обработок при изготовлении изделий должно быть достижение известной механической однородности в разных точках и по разным направлениям, а это в большой степени зависит от природы слитка.

Явления в слитке, с которыми приходится считаться технике и которые связаны с качеством стали в состоянии жидкого раствора и с условиями затвердевания ее в определенном объеме, выражаются в формах структуры (кристаллизации), ликвации, усадочных раковин, газовых пузырей и трещин [1].

Все эти явления как в отдельности, так и в совокупности, указывают на неоднородность слитка в объеме его. Они выражаются в большей или меньшей степени, в более или менее вредной форме и должны быть по возможности уменьшаемы или устраняемы средствами, имеющимися в распоряжении техники.

Идеальным следовало бы признать слиток, полученный при условии мгновенного затвердевания всего его жидкого объема, т. е. свободный от вышеуказанных явлений. При практической неосуществимости этого все явления в слитке получают право на существование. Степень и характер проявления каждого из этих явлений могут быть регулированы в желаемых направлениях соответствующими условиями отливки стали. Систематическое изучение условий отливки, в связи с вызываемыми ими изменениями в явлениях, определяющих природу слитка, должно предшествовать практическому применению этих условий в обстановке валового производства. Такое изучение показало бы, что часто одни условия отливки, устраняя или обезвреживая известные нежелательные явления в слитке, вызывают другие, не менее, а иногда и более вредные. Если улучшение слитка в известных направлениях отливкой может покупаться ценой значительного ухудшения его в других направлениях, то отсюда ясно: насколько неэкономичен и технически неудовлетворителен тот способ работы, который не принимает во внимание по возможности большого числа факторов, могущих влиять весьма различно в зависимости от различных обстоятельств. Все явления в слитке

---

[1] На полях рукой Н. И. Беляева сделаны следующие пометки: „А нерасплавленные кусочки металла шихты (железо, никель, вольфрам)“.

так тесно связаны между собой, что изучение их в связи с обстоятельствами, их создающими, должно итти параллельно. Только тогда возможно установить ту совокупность условий, которая позволяет получить слиток с наиболее желательной комбинацией явлений в нем, при возможности совершенного устранения одних явлений и приведения других к менее вредной форме.

Б. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛИ В ПЕРИОДЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

Сталь, затвердевая, распадается на отдельные объемы — кристаллы, более или менее прочно связанные между собой. Каждый слиток стали, как продукт затвердевания некоторой массы стали, составлен из таких кристаллов. Чтобы наглядно проявить грубо кристаллическое построение стали, необходимо или затвердевание ее вести в особых условиях, или затвердевшие слитки разлагать на составляющие части особыми приемами, или, наконец, пользоваться одновременно обоими способами. Лучше всего это иллюстрировать примерами.

1. При медленном охлаждении расплавленной стали в тигле (при тигельном процессе) на поверхности затвердевших слитков (при всяком составе стали) под шлаковым слоем обнаруживаются резко выраженные кристаллические образования.

2. Отливкой стали в условиях вращения можно получать полые цилиндры и конусы. На внутренних поверхностях этих цилиндров и конусов можно ясно наблюдать кристаллические образования.

3. В приведенных случаях (1 и 2) причиной проявления кристаллических образований на свободных поверхностях слитков как медленно, так и быстро затвердевших, является оголение, вследствие усадки стали, части скелетов кристаллических единиц, образовавшихся в жидком растворе. Каждый затвердевающий слой, усаживаясь при затвердевании, пополняет потерю объема, отнимая соответствующий объем жидкой стали от примыкающего слоя. При таком отнимании жидкой стали от последнего поверхностного слоя выступают в рельефе части этого слоя, успевшие затвердеть. Явление — вроде спадения воды в реке, в результате чего оголяются прикрытые до этого времени водой отмели. Еще более благоприятные условия для проявления таких кристаллических скелетов создаются при образовании усадочных раковин в результате усадки замкнутого большего или меньшего объема жидкой стали. На стенках и внутри камер — усадочных раковин — можно наблюдать колонии таких кристаллических образований. Иногда можно встретить особенно интересные экземпляры таких друз кристаллов в усадочных раковинах слитков большой массы, очень медленно затвердевающей, когда для образования таких индивидуумов создавались особенно благоприятные условия.

На эскизе фиг. 1 представлена верхняя часть слитка с образовавшейся усадочной раковиной. К известному моменту затвердевания слитка между верхней коркой в слитке и объемом жидкой стали образуется зазор (пустота) вследствие того, что часть жидкой стали пошла на заполнение объема, образовавшегося вследствие сокращения жидкого объема, перешедшего в затвердевшее состояние. Вследствие отхода поверхности жидкости от корки, оголяются кристаллические единицы или группы, успевшие образоваться на внутренней стенке корки с направлением роста вниз.

При известной достаточно малой скорости понижения уровня жидкого объема стали создаются благоприятные условия для роста кристаллов или групп их за счет жидкого объема. В таких условиях, например, получилась группа кристаллов [1], извлеченная мной из усадочной раковины 700-пудового слитка осевой стали (для коленчатой паровозной оси). К сожалению, верхнюю часть кристалла не удалось получить. Размеры извлеченной части: длина 24 *см*, наибольший размер поперечного сечения — 9 *см* (диагональ).

Из наиболее интересных кристаллов, описанных в литературе, необходимо отметить кристалл проф. Д. К. Чернова, извлеченный им из 100-тонного слитка мягкой стали. Длина его 39 *см*, вес 8½ фунтов (3,4 *кг*). Находимые в усадочных раковинах кристаллические скелеты или недоразвитые «разрывные прерывчатые кристаллы» (названные так в отличие от настоящих плотных кристаллов с развитыми гранями) представляют собой скелеты октаэдров; на это ясно указывают внешние очертания. В этом отношении сходятся все исследователи, занимавшиеся вопросом кристаллизации: Чернов, Осмонд, и др. Октаэдр является наиболее устойчивой кристаллографической формой при кристаллизации стали в периоде затвердевания.

Иногда кристаллические образования имеют внешне большое сходство со скелетом, и тогда они своим видом походят на елочку, почему и называются «елочными кристаллами»; иногда же сходство весьма отдаленное, они своим видом больше напоминают настоящие кристаллы. Первый случай можно наблюдать, когда кристаллические образования мелки, второй — когда они крупны, вроде кристалла Чернова или кристалла, представленного на фиг. 13 в статье «О булате» [2].

Несомненно, форма образования, напоминающая елочку, есть остов — скелет могущего сформироваться настоящего кристалла; чтобы его сохранить в этой стадии развития, необходимо его быстро изъять из среды, в которой он образовался, лишить его материала, за счет которого он может развиваться и переходить

---

[1] См. Беляев Н. И., О булате, „Журнал Русского металлургического общества“ № 1, 1911, стр. 445—488, фиг. 13.

[2] Там же.

последовательно через ряд стадий к окончательному, т. е. к законченному сплошному, совершенно развитому кристаллу. Первый случай мы имеем при быстром затвердевании объема жидкой стали, когда обнажение кристаллических скелетов в усадочных раковинах идет очень быстро; второй — при очень медленном затвердевании, когда обнажение идет очень медленно. Поэтому мелкие елочные кристаллы мы встречаем преимущественно в небольших усадочных раковинах небольших весом слитков; крупные, хорошо развитые прерывчатые кристаллы, близкие по форме к вытянутым октаэдрам, — в больших усадочных раковинах большого веса слитков.

Подобные же прерывчатые кристаллы, кристаллические скелеты или дендриты дают при затвердевании и другие металлы и сплавы, например, медно-цинковые[1], никель, медь, алюминий, золото, платина, серебро, цинк, свинец, олово, висмут, кадмий, сурьма и др. Если опустить железную пластинку в расплавленный цинк и вынуть ее, можно наблюдать самый процесс кристаллизации, причем поверхность железной пластинки покрывается сплошь елочного вида кристаллическими образованиями. Часто можно наблюдать аналогичные картины, если некоторое количество расплавленного металла вылить на ровную плитку. Так как поверхностный слой вылитого металла быстрее всего охлаждается, то здесь прежде всего и начинается кристаллизация, образование кристаллических скелетов; глубже лежащие слои, кристаллизуясь позже и сокращаясь в объеме при переходе из жидкого в твердое состояние, впитывают не успевшую еще затвердеть жидкую часть верхнего слоя, вследствие чего успевшие к тому времени образоваться и развиться сложные кристаллы обнажаются и рельефно выступают на поверхность. Такие рельефные рисунки получены для алюминия, серебра, свинца, олова и пр.

Еще одним способом можно обнаружить подобные образования как у стали, железа, так и у других металлов. Если налить стали в чугунный стаканчик большей или меньшей величины и, дав части массы ее затвердеть, вылить быстро жидкую часть, то на внутренней поверхности получившейся у слитка камеры можно увидеть кристаллические образования.

В благоприятных естественных условиях или в искусственно созданной обстановке проявляются, как мы видели, кристаллические образования в различной стадии развития, в форме скелетов, елочек, дендритов, прерывчатых кристаллов, близких по форме к настоящим кристаллам. Развитие и рост кристаллических образований идет, очевидно, за счет материала той среды, в которой образовались первичные формы их — скелеты. Там, где этого материала оказалось недостаточно, они не развились или развились слабо; там, где материала было достаточно, они развились до размеров и форм, ограниченных пределами воз-

[1] Курдюмов А. П., О медно-цинковых сплавах.

можного развития, т. е. поверхностями соприкосновения масс и объемов отдельных кристаллических индивидуумов. Совокупность таких индивидуумов образует сплошную массу, сплошной объем — тот слиток, который получается при отливке стали и принимает ту форму и внешние очертания, какие мы захотим ему придать по тем или иным соображениям. Перешедшие при этом в скрытое состояние кристаллические индивидуумы могут быть проявлены другими способами. Постараемся это сделать.

Способ 1-й. При ковке и прокатке слитки часто дают небольшие рванины при первом обжиме, и иногда настолько большие, что от слитков отделяются куски, слиток как бы расползается, рассыпается на части. Это явление обычно связывается с пережогом стали при нагревании ее до чрезмерно высоких температур в атмосфере окислительного пламени. Если при этом сталь недостаточно хорошо раскислена в процессе плавки, она еще больше склонна к проявлению этого недостатка. Изломы отделяющихся кусков различны: куски или сложены из больших, слабо сцепленных между собой зерен с довольно правильными поверхностями, или представляют из себя пучки перепутанных иголок различной длины и толщины. Иголки так же плохо сцеплены, как и зерна, и некоторые из них можно легко отделить пальцами. Отделенные таким образом иголки своим видом напоминают кристаллические образования и имеют отдаленное сходство с очень сильно вытянутыми недоразвившимися октаэдрами. Окисление и деформация при обжиме, очевидно, сильно изменили внешний вид поверхностей этих кристаллических образований. Направление их — обыкновенно нормальное к поверхности слитка. Особенно типично и резко это явление проявляется в случае расползания слитка в стали с большим содержанием Ni. В статье „Макроструктура стали“ изображен [1] один из таких пучков иголок от слитка маломагнитной стали весом около 12 пуд., который расползся на моих глазах, после первого пропуска через вальцы прокатного обжимного стана. Состав стали: C — 0,6%; Cr — 3,0%; Ni — 22%. Иголки у этого слитка начинались у самой поверхности, нормально к ней. Там же показан [2] излом другого вида — агрегат зерен. Сталь углеродистая (C — 0,4%). Разрушение этого слитка произошло тоже на моих глазах.

Способ 2-й. Для обнаружения иголок в слитке вообще грубого сложения из объемов той или иной величины, той или другой формы, нет даже надобности доводить его до состояния, при котором он начинает расползаться или разваливаться. Достаточно слиток сломать в холодном состоянии, что легко сделать, когда поперечное сечение его невелико. В той же статье [3] представлен

[1] См. Беляев Н. Н., Макроструктура стали, „Журнал Русского металлургического общества“ 1910, ч. I, стр. 21—38, фиг. 3 (см. также стр. 305—324 и фиг. 3 настоящей книги).

[2] Там же фиг. 2.

[3] Там же, фиг. 1.

излом слитка (в ½ нат. велич.) сечения 120 × 120 *мм* хромоникелевой стали, состава C — 0,45%; Cr — 0,6% и Ni — 2,80%. В изломе ясно видны иголки, направление которых нормально к поверхностям слитка.

На столбчатое или игольчатое сложение слитков в изломе указывал, между прочим, Гоу [1], приписывая образование его медленному затвердеванию стали при отливке. В литературе особенным стремлением к образованию таких иголок отмечена никелевая сталь (при большом содержании никеля). Там же это явление признается вредным и указывается способ к ослаблению этого вреда [2] — возможно быстрое охлаждение стали в изложнице непосредственно после отливки. Очевидно, в этом случае образование иголок связывается не только с Ni, а с большей или меньшей скоростью охлаждения стали после отливки. В действительности, насколько меня убедил практический материал, иголки имеются в изломах слитков различного поперечного сечения, различного химического состава стали и различного способа охлаждения.

Изломы, конечно, различаются между собой резкостью проявления иголок, масштабом самих иголок и распределением их в изломах (площадью, видимо занимаемой ими по отношению ко всей площади излома). На фиг. 2 представлен излом слиточка чистого никеля, сечения 55×75 *мм*. Иголки резко выражены, начинаются они с самой поверхности слиточка, и область видимого игольчатого сложения распространяется на глубину до 20 *мм*, т. е. почти вся площадь (около 90%) резко выраженного игольчатого сложения. Иголки слабо сцеплены между собой и их можно отделять одну от другой без особого труда. Проковка такого слиточка весьма затруднительна, так как он расползается особенно охотно.

Сопоставляя это с тем, что было говорено относительно маломагнитной стали с содержанием никеля около 22% и Cr 3,0%, а также с литературными данными, можно сказать, что никель способствует образованию игольчатого сложения. Принимая же во внимание, что слиточек никеля, сечением 55×75 *мм*, не мог затвердевать медленно, при отливке его в чугунную изложницу, можно заключить, что быстрое затвердевание не мешает образованию игольчатого сложения. Необходимо обратить особенное внимание на то обстоятельство, что иголки начинаются в изломе никелевого слиточка от самой поверхности; это имеет очень большое значение, как увидим впоследствии.

Вид изломов слитков меняется в зависимости от того, как слиток охлаждался после затвердевания: медленно (в печи, в песке, на воздухе) или быстро (в воде). Весьма важно уяснить себе образование как отдельных кристаллов, составляющих кусок стали, так и причину неоднородности строения их.

---

[1] Gow, Iron, Steel and other Alloys, p. 5.

[2] Отмечается, что уничтожить совершенно это явление невозможно.

„Сущность процесса кристаллизации, — говорит проф. А. В. Нечаев [1], — остается для нас мало выясненной. И особенно темен исходный пункт этого процесса — самое возникновение кристаллов. При наблюдении кристаллизации под микроскопом, даже при самых больших увеличениях, никогда не удается проследить группирования частичек в кристаллическом зародыше. Кристаллик, как бы мал он не был, является перед наблюдателем в готовом виде. Процесс его формирования происходит путем молекулярных передвижений вне границ, доступных нашему наблюдению. Мы можем лишь следить за ростом уже образовавшегося кристалла".

„Образование кристаллов, — говорит Браунс [2], — всегда будет оставаться скрытым для нас, но мы можем объяснить его предположением, что находящиеся в растворе мельчайшие частички соединения случайно, т. е. вследствие движения в растворе, занимают такое положение друг относительно друга, что могут соединяться в одну большую частичку—именно кристалл. Мы должны приписать мельчайшим частичкам такую способность к соединению, если хотим составить себе вообще представление о кристаллизации". „Мы можем наблюдать увеличение кристаллов, но не их начальное образование, потому что частички, из соединения которых, по нашему представлению, происходит зародыш кристалла, так малы, что мы не можем сделать их видимыми никаким увеличением, достижимым до сих пор и, может быть, вообще возможным. Все, что мы знаем о развитии кристаллов, относится к их увеличению, к их росту" [2].

Для возможности образования кристаллических зародышей в жидкой среде необходимо довести ее до температуры, при которой она неустойчива, иначе говоря — необходимо переохлаждение ее.

В переохлажденной жидкости кристаллический зародыш, как устойчивую фазу при температуре его образования, можно рассматривать, как результат „встречи нескольких молекул жидкости в такой ориентировке, при которой они могут оставаться соединенными" [3]. Кроме такого самопроизвольного образования зародышей или центров кристаллизации, связанного непосредственно с самой жидкостью, природой ее и состоянием, может быть и такое, при котором первопричиной и центром кристаллизации являются маленькие частички совершенно других тел, ничего общего с кристаллизующимся веществом не имеющие, случайные посторонние вещества, например, пылинки. Марселен [4] наблюдал такие пылинки в центре кристаллизации. Если те или другие посторонние частички или факторы могут облегчать и вы-

---

[1] Проф. Нечаев А. В., Кристаллография, стр. 164.
[2] Браунс Р., Химическая минералогия, СПБ, 1904, стр. 121 и 125.
[3] Морен Ш., Физические состояния материи, стр. 112.
[4] Marcelin R., Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, 8 mars 1909 г.

зывать начало кристаллизации — образование первых кристаллических зародышей, то все же необходимо за самим кристаллизующимся веществом признать способность кристаллизоваться в той или иной форме или совсем не кристаллизоваться, т. е. проявлять свою индивидуальность в этом отношении. В некоторых веществах, как стекло, смола, кристаллизация настолько трудна, что для них невозможно определить предела жидкого состояния и кристаллического, и непрерывный переход от жидкого состояния к аморфному является для них нормальным явлением. Во многих же веществах легко получить более или менее длительное переохлаждение, но трудно помешать кристаллизации возникнуть и распространиться в известный момент. Путем изменения скорости охлаждения можно, тем не менее, многие вещества получить в аморфном состоянии. Трудно кристаллизующиеся вещества при продолжительном выдерживании в интервале температур, наиболее благоприятном для кристаллизации, могут закристаллизоваться [1].

Для большинства аморфных тел это и было достигнуто. При высоких давлениях промежуток температур, соответствующий кристаллическому состоянию, по Тамманну, сведется к 0, и можно было бы любое вещество перевести из жидкого состояния в твердое аморфное через непрерывный последовательный ряд устойчивых состояний.

Искусственно замедляя охлаждение для веществ с сравнительно малой линейной скоростью кристаллизации, можно их закристаллизовать с большим успехом, если это нужно, чем можно ожидать в нормальных условиях — помешать веществу переохладиться. Того же можно достигнуть, если в вещество с малой силой кристаллизации ввести кристаллическую затравку. Препятствием к переохлаждению могут быть сотрясения, помешивания жидкости при температурах ниже температуры плавления ее.

Большинство металлов и сплавов принадлежит к веществам, у которых одновременно линейная скорость кристаллизации очень велика и максимальная сила кристаллизации лежит близ точки плавления. Поэтому получение металлов в стеклообразном состоянии является задачей чрезвычайно трудной, а, может быть, и неразрешимой, так как для получения стеклообразного состояния металлов (и закрепления этого состояния), необходимо пройти область конечных величин самопроизвольной кристаллизации почти моментально. При невыполнении этого условия зарождение центров произойдет и в области температур с большой линейной скоростью кристаллизации. В случае металлов, стало быть, в зависимости от скорости охлаждения их, будет меняться число зарождающихся центров кристаллизации, но не всегда эти центры разовьются до видимых размеров, благодаря очень большим

[1] Морен Ш., Физические состояния материи, стр. 114—115.

линейным скоростям кристаллизации. К моменту полного затвердевания, вследствие нарастания твердой фазы около центров кристаллизации с определенной линейной скоростью кристаллизации, весь кристаллизующийся объем жидкой фазы разобьется на отдельные объемы, число которых равно числу зародившихся центров кристаллизации. Пределом возможного нарастания твердой фазы около центра кристаллизации, является момент стыка отдельных кристаллических объемов, совпадающих с исчезновением жидкой фазы.

Скорость охлаждения будет, таким образом, определять число зарождающихся центров кристаллизации и число объемов, на которое разобьется определенный объем жидкой фазы после затвердевания, а именно: чем быстрее охлаждение, тем больше образуется центров кристаллизации (зарождение центров происходит не вблизи температуры плавления), тем больше будет кристаллических индивидуумов в единице объема и тем меньше будет величина отдельного кристаллического индивидуума, и наоборот, чем медленнее охлаждение, тем меньше образуется центров кристаллизации, тем меньше будет кристаллических индивидуумов (единиц) в единице объема и тем больше будет величина каждого кристаллического индивидуума.

В. УСАДОЧНАЯ РАКОВИНА

Усадочная раковина стремится образоваться в некотором объеме стали тогда, когда он затвердевает во всех точках не одновременно, независимо от того, идет ли процесс затвердевания быстро или медленно.

Усадку стали, т. е. сжатие ее при переходе из расплавленного в твердое состояние, нельзя считать величиной постоянной, так как она, несомненно, зависит от скорости охлаждения, например, при мгновенном затвердевании (теоретическом) она равна 0 (затвердевший объем равен расплавленному объему), при очень медленном (теоретическом) она достигает наибольшей величины. Можно представить себе два одинаковых объема расплавленной стали в виде шаров, из которых один переходит в твердое состояние так быстро, а другой так медленно, что можно считать затвердевание последовательных слоев (от периферии до центра) совершающимся почти одновременно. При этих условиях в обоих случаях раковины не образуются; в первом случае шар после затвердевания сохранит объем, какой он имел в расплавленном состоянии (не даст усадки); во втором — уменьшится в объеме на величину наибольшей усадки.

Очевидно, что рассмотренные два случая затвердевания практически неосуществимы. Поэтому при затвердевании центральные слои шара будут всегда отставать в затвердевании от периферических, и, следовательно, два соседних слоя будут затвердевать не одновременно. При этом, как известно, будет происходить

следующее. Затвердевший первым при некоторой скорости затвердевания наружный слой шара, сжавшись вследствие усадки, образует твердую оболочку для стали, остающейся еще жидкой. Объем оболочки + объем жидкой стали будет меньше первоначального объема на величину усадки того объема жидкой стали, который образовал оболочку. Оболочка не стремится в дальнейшем значительно изменить своих внешних размеров и потому может считаться в этом отношении постоянной. Объем же жидкой стали, затвердевая постепенно в направлении от оболочки к центру, будучи связан внешней постоянной формой оболочки, должен после сжатия вследствие усадки при затвердевании дать пустоту или усадочную раковину как результат уменьшения первоначального объема жидкой стали (после образования оболочки) на величину полной усадки его. Объем усадочной раковины, таким образом полученной, будет равен разности между усадкой всего объема жидкой стали и усадкой той части его, которая образовала оболочку.

При обыкновенных условиях охлаждения вся усадка вследствие затвердевания принимается в 13—14% первоначального объема, усадка оболочки — в 6%, так что на долю усадочной раковины остается 7—8% от первоначального объема. Таким образом, объем усадочной раковины пропорционален объему жидкого металла. Условия охлаждения определенного объема жидкой стали должны влиять на величину усадочной раковины; но так как значительно изменять условия охлаждения при сравнительно больших затвердевающих массах стали трудно, то можно считать, что объем усадочной раковины для определенного объема затвердевающей стали есть величина постоянная при средних нормальных скоростях охлаждения.

Затвердевание болванки определенного веса нельзя рассматривать как затвердевание объема, соответствующего этому весу, и потому нормальный объем усадочной раковины нельзя относить к этому объему. Наполнение изложницы сталью при отливке болванки идет во времени, и к моменту окончания отливки некоторый объем стали в болванке (в изложнице) успеет перейти в твердое состояние. Следовательно, объем усадочной раковины будет определяться не всем объемом стали болванки, а только той частью его, которая к моменту окончания отливки оставалась еще жидкой в изложнице. Раз жидкий объем стали в изложнице к моменту окончания отливки может меняться, будет меняться и величина усадочной раковины в болванке — соответственно тем пределам, в которых может меняться жидкий объем. Отсюда ясно, что отливку болванки надо вести так, чтобы получить по возможности меньший объем усадочной раковины.

Усадочная раковина образуется в том месте болванки, где сталь дольше всего остается в расплавленном состоянии. Положение ее в болванке зависит от тех условий, в которых болванка

охлаждается. Здесь могут сказаться форма болванки, сечение ее, способы отливки и пр.

Различные обстоятельства, складываясь, могут создать условия, при которых усадочная раковина получится в желаемой части болванки. Для практики весьма важно, когда, путем некоторой комбинации определенных обстоятельств, усадочная раковина всегда получается в определенном желаемом месте болванки, так как это вносит однообразие в производство и дает возможность произвести точный учет процента отброса металла из-за усадочной раковины, процента годного для дела металла, а главное — определить более точно вес болванки для определенных изделий. При возможности значительных колебаний в положении усадочной раковины приходится задавать вес болванки с запасом — на случай большого процента отброса из-за усадочной раковины, что как в экономическом смысле, так и в отношении многих удобств работы, представляется нежелательным. Отсюда ясно, что отливку болванки надо вести так, чтобы получать усадочную раковину в желаемом месте.

Далее, желательно создать такие условия для образования усадочной раковины в болванке, при которых она, образуясь в желаемом месте, приобретала бы наиболее выгодную форму, т. е. распространялась бы в желаемом направлении, например, находясь в верхней части болванки, имела бы распространение в ширину, а не в длину (по оси болванки). Получением усадочной раковины соответствующей формы большая часть болванки сохраняется для дела.

Итак, стремления металлургов должны быть направлены к тому, чтобы сохранить по возможности большую часть болванки для дела. Для этого отливку болванки необходимо вести так, чтобы:

1) или не получить усадочной раковины совсем;

2) или обезвредить ее, уменьшив величину ее и получив ее в определенном месте и определенной формы.

Применением динамического прессования жидкой стали металлургия добилась совершенного уничтожения усадочной раковины при отливке болванки. Казалось бы, что такой способ отливки должен был получить наибольшее распространение и вытеснить остальные, менее совершенные способы. А между тем этого не наблюдается. Причин к тому много. Прежде всего введение прессования требует очень больших и дорогих установок, на которые могут решиться только очень крупные предприятия. Экономичность этого способа тесно связана с размерами болванок, вообще с масштабом отливки, а также с назначением материала для изделий, т. е. с его ценностью вообще. Способ этот в высшей степени деликатен и требует очень внимательного и точного выполнения.

Но не только этими и другими подобными причинами объясняется малая распространенность его; есть, должно быть, другие

причины, которые заставляют осторожно относиться к этому методу отливки, ограничивать масштаб его применения и даже в отдельных случаях совсем отказываться от него в пользу других обыкновенных. В отдельной главе о прессовании я немного подробнее остановлюсь на некоторых положительных и отрицательных сторонах прессования.

Г. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КРИСТАЛЛИЗУЮЩЕЙСЯ МАССЫ

Тепловое состояние кристаллизующейся массы влияет на кристаллизацию как в смысле величины образующихся кристаллов, так и в смысле формы их. Так как запас тепла кристаллизующейся жидкой массы определяется условиями внешнего охлаждения, величиной теплоты кристаллизации и теплопроводностью, то интересно выяснить влияние на кристаллизацию именно этих факторов.

При очень медленном внешнем охлаждении жидкой массы создаются однородные условия для кристаллизации во всех точках объема, наружных, средних и внутренних. По достижении всеми этими точками некоторой температуры, последние дают начало нескольким кристаллическим зародышам, которые быстро развиваются в одинаковые правильные кристаллические многогранники, вследствие одинаковых линейных скоростей кристаллизации для всех точек массы и во всех направлениях при нарастании твердой фазы около кристаллических зародышей.

При более быстром внешнем охлаждении некоторой жидкой массы затвердевание ее всегда начинается с поверхности, так что в смысле быстроты охлаждения центральные частицы всегда отстают от наружных. Это отставание тем больше, чем быстрее внешнее охлаждение, чем меньше теплопроводность и чем больше объем охлаждаемой массы. При этих условиях в наружных слоях кристаллизующейся массы появится большее число центров кристаллизации, чем во внутренних, и, стало быть, в наружных слоях мы будем иметь более мелкие кристаллические объемы, чем во внутренних.

Что касается формы кристаллических объемов, то она будет в различных слоях тоже различна — в зависимости от совокупного влияния теплоты кристаллизации, отвода тепла (т. е. теплопроводности) и скорости охлаждения.

При переходе жидкой фазы в твердую, выделяющаяся теплота кристаллизации повышает температуру переохлажденной жидкой фазы до температуры, близкой к температуре плавления, вследствие чего повышается линейная скорость кристаллизации. Чем быстрее охлаждение, тем большее количество жидкой фазы переходит в твердую, тем большее количество выделяется теплоты кристаллизации. Если теплоты достаточно, чтобы поддерживать температуру жидкой фазы вблизи температуры плавления (при

определенном отводе тепла), то кристаллизация идет с максимальной скоростью, причем очевидно, что направление кристаллизации будет противоположным направлению отвода тепла внешним охлаждением и путем теплопроводности. Отсюда—объяснение вытянутой или призматической формы кристаллических объемов, в наружных слоях масс, охлажденных сравнительно быстро. По мере приближения к внутренним слоям изменяются тепловые условия вследствие более медленного протекания процесса затвердевания, более равномерного и медленного отвода тепла по всем направлениям, более равномерного выделения теплоты кристаллизации, а вместе с тем меняются и образующиеся формы кристаллических объемов, приближаясь к формам более или менее правильных многогранников. При очень медленном прохождении процесса затвердевания на такие правильные многогранники разбивается весь объем затвердевшей массы.

При затвердевании сплавов, дающих твердые растворы, в частности сплавов железа с углеродом, новыми факторами, влияющими на величину и форму образующихся кристаллических конгломератов, являются: содержание С, вязкость жидкого раствора и пр.

В противоположность чистым металлам, например, железу, затвердевающим при определенной температуре, сплавы железа с углеродом затвердевают в определенном интервале температур, тем большем, чем содержание С выше. Температура начала кристаллизации (по данным ряда исследователей) зависит от содержания углерода, т. е. от состава жидкой фазы, температура конца кристаллизации зависит от условий охлаждения. Кристаллизация на большом интервале температур, т. е. в течение более продолжительного времени, что имеет место для сплавов с большим содержанием С, очевидно, дает и более крупные, более развитые кристаллические конгломераты, причем они будут тем крупнее, чем медленнее этот интервал температур будет проходиться. Понижение теплопроводности и повышение вязкости с повышением содержания С будут также способствовать кристаллизации, т. е. образованию крупных и развитых форм.

В случае чистых металлов однородная жидкая фаза при затвердевании переходит в однородную твердую фазу — в виде совокупности отдельных объемов различной величины и формы, из которых каждый построен из отдельных однородных кристалликов с своей определенной ориентировкой. Там не может быть сомнения в химической однородности отдельных кристаллических объемов. Как же химически построен затвердевший объем сплава железа с углеродом, т. е. стали? Для этого необходимо себе представить, как идет процесс последовательного перехода жидкой фазы (жидкого раствора) в твердую фазу (твердый раствор) в интервале температур, зависящем от состава, то-есть от содержания углерода.

Установлено многими исследованиями, что состав последовательно выпадающих кристаллов непрерывно меняется, а именно: первые выпадающие кристаллики наиболее бедны углеродом (причем концентрация углерода в них определяется первоначальной концентрацией жидкого раствора) и каждые последующие более богаты, так как выпадают последовательно из жидких растворов большей концентрации С (увеличение которой идет за счет последовательного обеднения железом). Наглядно этот процесс затвердевания представляется в следующем виде.

Жидкая фаза концентрации K (фиг. 3), охладившись до температуры точки a кривой начала выпадения кристаллов твердого раствора, т. е. достигнув состояния насыщения, выделяет первые кристаллы состава точки b кривой конца выделения кристаллов твердого раствора, так как только кристаллы этого состава (концентрации) могут существовать при температуре точек a—b. Вследствие выделения кристаллов b, жидкая фаза, обогатившись одним компонентом за счет обеднения другим, имеет состав точки a_1, т. е. не имеет состояния насыщения при этой температуре и приходит в это состояние, охладившись до температуры точки c. При этом выделяются кристаллы состава точки d, состав жидкой фазы меняется до состава точки c_1, при дальнейшем охлаждении она достигает состояния насыщения при температуре e, выделяет кристаллы состава f и так далее до тех пор, пока жидкая фаза состава e_1, охладившись до температуры точки g, не выделит последних кристаллов состава h.

Конечно, процесс не идет скачками, а непрерывно, т. е. состав выделяющихся кристаллов непрерывно меняется, следуя линии CD, а состав жидкой фазы — следуя линии AB. При таком представлении о ходе процесса кристаллизации сплавов, дающих при затвердевании твердые растворы, необходимо ожидать, что получившиеся в результате затвердевания кристаллы имеют неоднородный состав, причем центральные части их должны быть богаты кристалликами состава b, а наружные — кристалликами состава h.

В случае, например, сплавов железа и углерода, центр будет богат более железом, чем периферия, которая будет более богата углеродом. Такое состояние нельзя считать состоянием равновесия, так как в одной и той же дозе равновесие наступает только тогда, когда концентрация во всех точках ее становится одинаковой. При неодинаковой концентрации возникают силы диффузии, которые стремятся выравнять концентрацию, т. е. привести твердую фазу в состояние равновесия. Поэтому процесс затвердевания по схеме, только что нарисованной, исключающей диффузию, представляется мало вероятной. Несомненно, параллельно с выпадением кристаллов различной концентрации и изменением концентрации жидкой фазы, должны проявиться силы диффузии, под влиянием которых углерод начнет перемещаться от одних частей твердой фазы к другим и из жидкой фазы в прилега-

ющую твердую, если отношение концентраций твердой фазы и жидкой отличны от того, которое требуется необходимым условием равновесия между жидкой и прилегающей к ней твердой фазами

При идеальной диффузии, то-есть при совершенном выравнивании химического состава, процесс затвердевания можно представить в следующем виде. Когда сплав достигает при охлаждении температуры точек *c—d* и выдерживается при этой температуре достаточно долгое время, то диффузией достигается равновесие между твердой и жидкой фазами, причем твердая фаза выравнивается до концентрации точки *d*, а жидкая — до концентрации точки *c*; при понижении температуры до точек *e—f* и достаточном выдерживании достигается диффузией опять равновесие между твердой и жидкой фазами, причем вся твердая фаза достигает концентрации точки *f*, а вся жидкая фаза — концентрации точки *e*. При понижении температуры до точки *h* и достаточном выдерживании твердая фаза во всех точках приобретает концентрацию точки *h*, т. е. концентрацию исходного жидкого раствора, а жидкая фаза отсутствует. Итак, если процесс кристаллизации идет настолько медленно, что в каждый данный момент выпадающие из жидкого раствора кристаллы имеют время выравниваться между собой по составу и приходить в равновесие с примыкающей жидкой фазой, то в результате такого затвердевания получится однородный твердый раствор той же концентрации, какую имел исходный жидкий раствор.

Такой идеальный случай, повидимому, тоже не может иметь места в практике, так как он требует или чрезмерно медленного охлаждения, которое практически осуществить невозможно, или чрезмерно большой скорости диффузии, которой, вообще говоря, ожидать нельзя, особенно когда речь идет о диффузии в твердом состоянии.

Итак, практически мы будем всегда иметь случаи затвердевания при отсутствии идеальной диффузии, но при наличии некоторой диффузии, проявление которой сказывается бо́льшим или меньшим сглаживанием неоднородности состава твердого раствора в разных точках затвердевшего объема стали. Химическая неоднородность твердого раствора, как естественное следствие процесса затвердевания, получила свое наглядное подтверждение в проявлениях дендритного строения затвердевших кусков стали различными реактивами. Устойчивость этого строения в обстановке продолжительного действия высоких температур (например, случаи переработки стали в горячем состоянии: прокатка, ковка и пр.) указывает, с одной стороны, на слабое проявление сил диффузии в твердом состоянии, а с другой стороны, на существование чисто механических преград, ставящих предел для обмена между соседними областями под влиянием сил диффузии, например: окисленных пленок, сернистого марганца, карбидов, газов и пр.

Д. ПРИРОДА И СВОЙСТВА СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ

1. Структура слитка

Структура слитка после затвердевания и последующего полного охлаждения может быть представлена твердым раствором или продуктами неполного или полного распадения твердого раствора в зависимости от скорости охлаждения после затвердевания и химического состава стали слитка. Влияние как химического состава, так и скорости охлаждения проявляется в большей или меньшей степени задержки совершающихся в стали при охлаждении внутренних процессов. Соответствующими комбинациями химического состава и скорости охлаждения можно получать сталь в состоянии как устойчивого равновесия, так и неустойчивого со стремлением перейти в устойчивое при благоприятных к тому условиях. Первое состояние структуры характеризуется продуктами полного распадения твердого раствора, второе — продуктами неполного распадения или твердым раствором. В смысле вызываемых эффектов химический состав и скорость охлаждения необходимо рассматривать как факторы, эквивалентно заменяющие один другого, т. е. известным изменением химического состава можно достигнуть такого же эффекта, как соответствующим изменением скорости охлаждения.

Слиток стали, полученный в обычных условиях производства, мы должны рассматривать как химически неоднородное тело. Неоднородностью своей оно обязано тому, что объем жидкого раствора, занимаемый слитком, для своего затвердевания требует известного времени. Процесс затвердевания, в котором последовательно выпадающие из жидкого раствора частицы твердого раствора или твердой фазы химически закономерно разнородны, определенно ставит неоднородность слитков в разных точках в тесную связь со временем. Время затвердевания для различных точек слитка не может быть одним и тем же, так как тепловые условия в различных частях слитка как зависящие от целого ряда обстоятельств не могут быть одинаковы в каждый данный момент. При значительной разнице во времени затвердевания различных областей слитка значительно разнится и химический состав этих областей. Процесс диффузии, идущий параллельно с процессом затвердевания, хотя и стремится сгладить эту химическую неоднородность, но как процесс очень медленный требует очень большого времени для этого.

В обычных условиях затвердевания слитков, когда затвердевание идет сравнительно быстро, диффузия вряд ли может произвести существенную перегруппировку и вызвать значительное сглаживание химического состава соседних точек и соседних областей слитка.

В силу высказанных соображений, слиток стали за период перехода объема его из состояния жидкого раствора в состояние твердого раствора становится химически неоднородным как в со-

седних точках, так и в соседних областях; например, в наружных и центральных слоях. Эта неоднородность твердого раствора установлена мной в работе «Макроструктура стали в связи с кристаллизацией» [1] экспериментально, как и в другой работе «О булате» [2] нашла подтверждение.

Такое состояние твердого раствора в слитке непосредственно после затвердевания, при котором в различных точках его химический состав неодинаков, не может быть равновесным. Силы диффузии должны возникнуть и проявиться в выравнивании химического состава во всем объеме; неоднородный твердый раствор должен сделаться однородным. Сколько времени необходимо для этого — неизвестно; должно быть очень много; диффузия — в условиях малой подвижности частиц (т. е. в твердом растворе) — идет, конечно, еще медленнее, чем в период затвердевания при наличии жидкой фазы и более высокой температуры. Самое медленное охлаждение слитка после затвердевания, очевидно, является недостаточным по времени для проявления диффузией заметного эффекта. А для обычных практических условий охлаждения слитков значение диффузии и того меньше.

Время в процессе затвердевания слитка стали, являясь причиной химической неоднородности его после затвердевания, является одной из главных причин разбития всего объема слитка на ряд меньших объемов — кристаллов — к моменту полного затвердевания, с присущими каждому объему группировкой частиц и химической неоднородностью. Число этих кристаллов, а стало быть, и объем каждого из них, находится в непосредственной связи со скоростью охлаждения в период затвердевания, как показал в своих работах Таммана, и индивидуальными особенностями кристаллизующегося вещества, главным образом самопроизвольной скоростью кристаллизации и линейной скоростью кристаллизации.

Для большинства металлов линейная скорость кристаллизации очень велика, максимальная же скорость самопроизвольной кристаллизации находится недалеко от точки плавления. В зависимости от скорости охлаждения слитка (а для разных точек его она различна), т. е. степени переохлаждения, будет меняться число зарождающихся центров кристаллизации, не всегда эти центры разовьются до видимых размеров, благодаря очень большим линейным скоростям кристаллизации. К моменту полного затвердевания, вследствие нарастания твердой фазы около центров с определенной линейной скоростью кристаллизации, кристаллизующийся объем жидкой фазы (слиток) разобьется на отдельные объемы, число которых равно числу зародившихся центров и величина которых ограничивается пределом возможного нара-

[1] „Журнал Русского металлургического общества", 1910, ч. I, стр. 21—38 (см., стр. 305—324 настоящей книги).

[2] „Журнал Русского металлургического общества". 1911, ч. I, стр. 445—488.

стания твердой фазы около каждого центра — вследствие стыка отдельных объемов. Реально влияние скорости охлаждения выражается так: чем быстрее охлаждение некоторого объема, тем больше образуется центров кристаллизации, тем больше будет кристаллов в этом объеме и тем меньше будет объем каждого кристалла, и, наоборот, чем медленнее охлаждение, тем меньше образуется центров, тем меньше будет кристаллов и тем больше будет объем каждого кристалла.

Тепловое состояние затвердевающего слитка влияет на кристаллизацию как в смысле величины образующихся кристаллов, так и в смысле формы их.

Так как запас тепла кристаллизующейся жидкой массы определяется условиями внешнего охлаждения, величиной теплоты кристаллизации и теплопроводностью, то интересно выяснить влияние на кристаллизацию именно этих факторов.

При очень медленном внешнем охлаждении слитка создаются однородные условия для кристаллизации во всех точках объема слитка: наружных, средних и внутренних. При некоторой температуре одновременно во всем объеме зарождаются центры кристаллизации — зародыши, которые развиваются в одинаковые кристаллические многогранники, вследствие одинаковых линейных скоростей кристаллизации для всех точек объема и во всех направлениях при нарастании твердой фазы около кристаллических зародышей.

При более быстром внешнем охлаждении слитка затвердевание его всегда начинается с наружных слоев; так как в смысле быстроты охлаждения центральные слои всегда отстают от наружных. Это отставание тем больше, чем быстрее внешнее охлаждение, чем меньше теплопроводность и чем больше сечение слитка. При этих условиях в наружных слоях появится больше центров кристаллизации на единицу объема, чем во внутренних и, стало быть, в наружных слоях мы будем иметь более мелкие кристаллические объемы, чем во внутренних. Что касается формы кристаллических объемов, то она в различных слоях тоже различна — в зависимости от совокупного влияния теплоты кристаллизации, теплопроводности и скорости внешнего охлаждения. При переходе жидкой фазы в твердую выделяющаяся теплота кристаллизации повышает температуру переохлажденной жидкой фазы до температуры, близкой к температуре плавления, вследствие чего повышается линейная скорость кристаллизации. Чем быстрее охлаждение, тем большее количество жидкой фазы переходит в твердую, тем большее количество теплоты кристаллизации выделяется. Если теплоты достаточно, чтобы поддерживать температуру жидкой фазы вблизи температуры плавления (при определенном отводе тепла), то кристаллизация идет с максимальной скоростью и в направлении, противоположном направлению отвода тепла. В этом — объяснение вытянутой, призматической формы кристаллических объемов в наружных слоях слитков, сравнительно

быстро затвердевших. С приближением к внутренним слоям слитка изменяются тепловые условия для них, вследствие более медленного протекания процесса затвердевания, более равномерного и медленного отвода тепла по всем направлениям и более равномерного выделения теплоты кристаллизации; и вместе с тем меняются формы кристаллических объемов, приближающиеся к формам более или менее правильных многогранников. При очень медленном протекании процесса затвердевания на такие правильные многогранники может разбиться весь объем слитка.

При затвердевании сплавов, дающих твердые растворы, в частности — сплавов железа с углеродом, новым фактором, влияющим на величину и форму образующихся кристаллических объемов, является углерод. В противоположность чистым металлам, например, железу, затвердевающим при определенной температуре, сплавы железа с углеродом затвердевают в определенном интервале температур, тем большем, чем выше содержание С.

Температура начала затвердевания (кристаллизации) зависит от содержания С, т. е. от состава жидкой фазы, температура конца кристаллизации — от условий охлаждения. Кристаллизация на большем интервале температур, т. е. в течение более продолжительного времени, очевидно, даст более крупные кристаллические объемы. Понижение теплопроводности и повышение вязкости жидкого раствора с повышением содержания С будут также способствовать кристаллизации, т. е. образованию крупных, развитых форм кристаллов.

В случае чистых металлов, например чистого железа, однородная жидкая фаза при затвердевании переходит в однородную твердую фазу, разбившись в виде твердой фазы на отдельные объемы различной величины и формы. Каждый объем построен из отдельных однородных кристалликов со своей определенной ориентировкой. Там не может быть сомнений в химической однородности отдельных кристаллических объемов.

В случае стали, процесс последовательного перехода жидкого раствора в твердый, при недостаточной диффузии для выравнивания концентраций последовательно выпадающих частиц разной концентрации, ведет к химической неоднородности кристаллических объемов в состоянии твердого раствора.

При одном составе стали слитка (например, при большом содержании Ni или Mn) и медленном охлаждении после затвердевания, или при другом составе стали и более быстром охлаждении после затвердевания, слиток может сохранить в совершенно охлажденном состоянии строение, присущее ему после затвердевания, т. е. картину сложения его из отдельных объемов, различной величины и различной формы с присущей каждому объему структурой твердого раствора — аустенита. Химическая неоднородность последнего в соседних точках может не быть проявлена наглядно протравкой, вследствие малой восприимчивости аустенита к реактивам вообще. В этом случае получается впечатление,

что слиток разбился при затвердевании на отдельные объемы, что каждый объем, однородный химически и структурно во всех своих точках, химически и структурно однороден со всеми объемами слитка и что химическая и структурная однородность сохранилась в слитке после полного охлаждения его. В действительности нет химической однородности в пределах отдельного объема, тем более нет ее в различных областях слитка, при сравнении их в этом отношении, и, стало быть, окончательно охлажденный слиток не может быть химически однороден в разных точках своего объема. Вместе с тем не может быть однородной и структура слитка после затвердевания его в пределах одного объема, при сравнении различных объемов; а в окончательно охлажденном состоянии не может сохраниться структурная картина только что затвердевшего слитка.

2. Прессование

Из всех способов прессования стали во время ее затвердевания в изложнице наибольшее применение и распространение получил способ динамического прессования, предложенный инженером Армэ. При этом способе, как известно, болванка, отлитая сверху в коническую изложницу, продвигается в ней вверх давлением снизу, отчего этот способ и получил название динамического прессования, в отличие от статического, при котором болванка, подвергаемая давлению сверху, остается неподвижной в своей изложнице. При первом способе, т. е. при постоянном заклинивании болванки в изложнице, давление от поршня гидравлического пресса на нижнее основание болванки преобразуется в равномерное радиальное давление на боковую поверхность болванки. Этим давлением болванка все время сжимается, т. е. стремится уменьшиться в объеме.

Преимущества отливки болванок стали с применением динамического прессования перед обыкновенной отливкой без прессования Армэ [3] и последователи его способа видели и видят в следующем.

1. Прессование не дает образоваться в болванках усадочным раковинам, вообще — внутренним пустотам.

Проявлению усадки в виде внутренних пустот препятствуют соответственным усадке сжиманием металла болванки боковым давлением от продвигания и заклинивания ее в изложнице восходящим движением нижнего поршня. Скорость перемещения поршня, которую необходимо согласовать с общей усадкой стали, устанавливается практически (кривая скоростей) в зависимости от целого ряда обстоятельств: состава (и следовательно, общей усадки), веса болванки, времени, необходимого для затвердевания, температуры стали, типа изложницы и пр.

2. Прессование ослабляет ликвацию в болванках.

Вследствие постоянного соприкосновения металла болванки с металлом изложницы, отвод тепла благодаря теплопроводности

идет быстрее, т. е. болванка быстрее затвердевает, а этим сокращается время для ликвации. Быстроте затвердевания способствует еще охлаждение самой изложницы водой. Кроме того, продвигание болванки вверх в более холодную часть изложницы вызывает более энергичное охлаждение верхней головной части болванки, что способствует также уменьшению ликвации в верхней части.

3. Прессование препятствует образованию больших развитых кристаллов, что, очевидно, тесно связано с сокращением периода затвердевания стали и вообще с большей быстротой охлаждения — по только что выясненным причинам.

4. Прессование уменьшает процент отбросов болванки. В среднем, это уменьшение, по сравнению с обыкновенной болванкой, отлитой в изложницу без прессования, принимается в 25% . Признают необходимым от верхней части прессованной болванки отрезать 5—10%, считая эту часть болванки наименее чистой и наименее плотной.

5. Прессование производит механическую обработку стали в болванке, как бы некоторую ковку. Этот вывод делается на основании сравнительных результатов механических испытаний стали, прессованной и отлитой обыкновенным способом.

6. Прессование предохраняет боковую поверхность болванки от надрывов и трещин.

Болванка, затвердевающая в изложнице без прессования, уменьшаясь в объеме вследствие усадки, отстает своей боковой поверхностью от стенок изложницы. Тонкая еще, наружная, затвердевшая стенка (корка) болванки легко может дать рванины и трещины вследствие напряжений от различных причин: неравномерности охлаждения, давления со стороны внутренней жидкой массы в стали, заливов при недостаточно гладкой поверхности изложницы и пр. Прессование, поддерживая все время боковую поверхность болванки в соприкосновении со стенками изложницы, не дает возможности проявиться напряжениям в наружных слоях болванки в форме рванин и трещин.

Фактический материал, накопившийся за время более близкого соприкосновения с динамическим прессованием, побуждает меня сделать некоторые выводы, небесполезные, по моему мнению, для техники.

Материалом для выводов послужило следующее:

1. Наблюдение процесса прессования.
2. Наблюдение обстановки прессования.
3. Исследование прессованных болванок со стороны:

а) внутренних усадочных раковин и пустот;
б) кристаллизации;
в) ликвации;
г) трещин, складок и пр.;
д) механической обработки;
е) механических свойств.

4. Сравнение прессованных болванок с непрессованными тех же плавок.

Материалом для исследования послужила мартеновская основная углеродистая сталь.

№ болванки	Какая отливка	Сорт стали
1	прессован.	пушечная
2	"	мягк. пузыр.
3	"	осевая
4	"	"
5	"	пушечная
6	обыкновенн.	"
7	прессован.	"
8	обыкновенн.	"
9	прессован.	"

Некоторые результаты испытания приведены в таблице 1 и изображены в виде диаграмм на фиг. 4.

Таблица 1

Сравнительное испытание прессованной и непрессованной литой стали

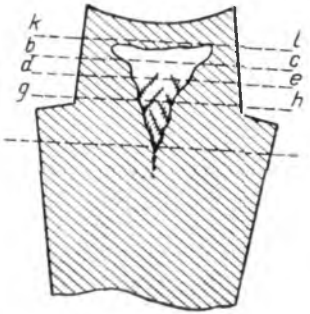
Состав стали 0,43—0,53% C; 0,15—0,19% Si; 0,33—0,39% Mn; 0,011—0,019% S; 0,019—0,025% P.

Образцы, взятые на расстоянии 114 *мм* от поверхности слитка					Образцы, взятые на расстоянии 44 *мм* от оси слитка				
№ образцов по порядку от верха до низа слитка	Временное сопротивление в *кг/мм²*		Сужение площади поперечн. сечения в месте разрыва в %		№ образцов по порядку от верха до низа слитка	Временное сопротивление в *кг/мм²*		Сужение площади поперечн. сечения в месте разрыва в %	
	прессов.	непрессов.	прессов.	непрессов.		прессов.	непрессов.	прессов.	непрессов.
1 (верх) .	53,5	53,5	16,5	23,0	1 (верх) .	—	—	—	—
2	54,5	53,5	31,5	22,3	2	45,8	—	6,3	—
3	53,4	53,0	29,0	23,0	3 .	50,8	47,2	10,8	8,5
4	53,6	53,0	29,0	22,3	4 . . .	28,9	52,3	—	11,5
5	53,5	53,0	27,2	21,0	5	33,5	51,2	7,0	10,5
6	53,0	53,5	30,2	21,5	6 . . .	42,0	51,4	6,2	10,5
7 . . .	53,0	53,5	26,5	19,5	7 . . .	32,5	49,3	4,0	10,0
8	52,4	53,8	31,0	18,7	8	34,0	49,2	5,5	10,0
9	52,5	54,5	31,2	22,3	9	42,6	37,0	6,2	7,7
10	52,0	54,6	31,6	19,5	10	47,0	51,0	9,2	12,3
11 (низ) .	51,6	54,8	28,4	24,5	11 (низ) .	51,0	52,0	16,3	13,5

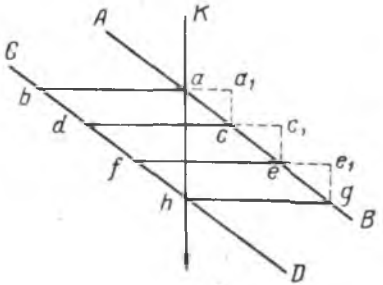
Примечания: 1. Непрессованный слиток был отлит широким концом кверху

2. Значения предела текучести колебались в пределах:

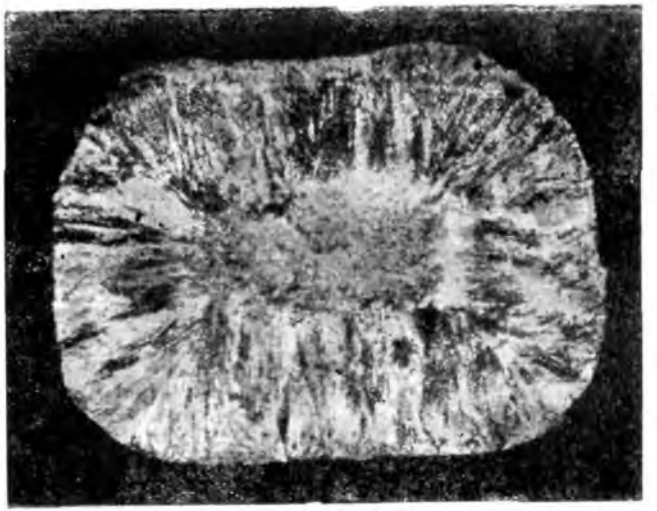
23,0—25,4 *кг/мм²* — для наружн. образца пресс. слитка
24,0—29,0 " " внутр. " " "
25,0—25,3 " " " " непресс. "



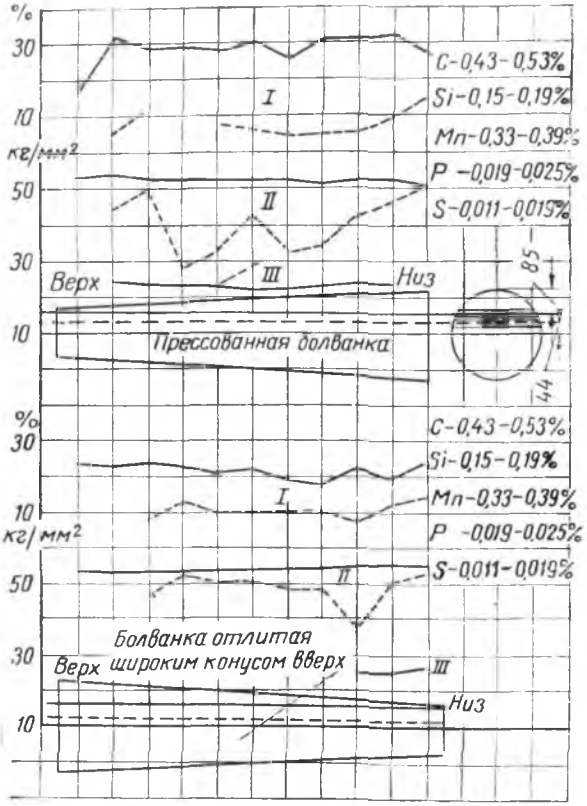
Фиг. 1.



Фиг. 3.



Фиг. 2. Излом слиточка чистого никеля (нат. вел.).



Крайняя пластина I-Сжатие; II-Врем сопротивление
III-Предел упругости
Средняя пластина I-Сжатие II Врем сопротивление
III-Предел упругости

Фиг. 4. Механические свойства прессованного и непрессованного слитков стали в разных сечениях.

ЧАСТЬ II

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ

ВСТУПЛЕНИЕ

В современной технике наряду с изделиями, форма которых получена горячей механической обработкой слитков соответствующего веса и формы (прокатка, ковка, прессование), обращаются изделия, форма которых достигнута литьем (фасонная отливка). И те и другие изделия или части машин, механизмов, сооружений, воспринимая и передавая в условиях работы различные силы, должны сохранять целость, т. е. не деформироваться и не ломаться от них. Для этого материал этих изделий должен быть приведен к такому состоянию, при котором обеспечивалась бы достаточная сопротивляемость его деформирующим и ломающим усилиям независимо от вида и характера их.

В одних случаях признается достаточным состояние материала в изделиях, полученных отливкой без применения термической обработки, в других — с применением термической обработки; в третьих — простая отливка, даже с применением термической обработки, признается недостаточно обеспечивающей изделия от разрушения; и поэтому техника пользуется услугами механической обработки — без или с последующей термической обработкой. Пользуясь механической обработкой в гораздо более широких размерах, чем отливкой, современная техника применяет различную степень этой обработки, т. е. различное отношение площади поперечного сечения слитка к площади поперечного сечения изделия, в связи с требованиями от материала различной степени сопротивляемости силам. Широко пользуясь термической обработкой, современная техника в силу тех же соображений применяет различную степень термической обработки, т. е. комбинации нагреваний и охлаждений. Необходимость пользоваться одновременно обоими видами обработки материала, практически доказанная примерами изготовления технически наиболее ответственных изделий, может найти объяснение только в различном влиянии каждой из этих обработок на материал в отношении приобретения последним требуемых механических свойств. Выяснение индивидуальности влияния каждой из этих обработок и является целью настоящей работы.

Большим препятствием к правильному и быстрому решению этой задачи является неоднородность стали в объеме слитка в отношении кристаллизации, ликвации, усадочных раковин, пузырей, трещин и пр., — т. е. тех явлений, которые определяют природу слитка и являются результатом условий получения стали и обстановки затвердевания ее в определенном объеме. Естественно, что такой слиток не может быть однородным механически

в различных точках своего объема, что подтверждается следующими примерами.

Из середины по высоте трех слитков было вырезано по диску. Из каждого диска, начиная с поверхности по направлению к центру, вырезаны образцы для испытания на разрыв. Все образцы предварительно были отожжены. Поперечные сечения дисков: двух — 21″, одного 48″. Большой слиток и один из меньших отлиты в условиях медленного затвердевания (отливка формовочная), второй меньший — в условиях быстрого затвердевания (отливка в изложницу). Результаты испытания на разрыв сведены в таблице 2 (стр. 354).

Наибольшие колебания наблюдаются для сжатия поперечного сечения, наименьшие для предела упругости и временного сопротивления (слитки 1 и 2), начиная от края к центру, цифры для сжатия постепенно падают; для случая формовочной отливки (сл. 2) эти цифры значительно ниже, чем для слитка, отлитого в изложницу. В слитке 3 колебания предела упругости, временного сопротивления и сжатия гораздо сильнее выражены, чем в слитках 1 и 2; сжатие в некоторых местах поднимается до 61,7% и спускается до 9,5%. Изменение сжатия от края к центру скачками, что указывает на очень большую неоднородность слитка. При выяснении влияния степени механической обработки необходимо следить за изменениями цифр, характеризующих в механическом смысле сталь; а для этого надо знать механическую характеристику исходного состояния ее до механической обработки. Какими же цифрами выразить это состояние в трех выше приведенных примерах, когда эти цифры в пределах одного сечения и в зависимости от способа отливки слитков колеблются в следующих пределах:

	Слиток 1	Слиток 2	Слиток 3
Предел упругости в *кг/мм²*	34,9—36,5	33,3—35,5	19,0—29,5
Временное сопротивление в *кг/мм²* .	61,2—63,9	50,0—56,4	36,0—46,3
Сжатие в %	12,7—36,1	9,8—23,7	9,5—61,7

Казалось бы, что наиболее правильно характеризовать исходное состояние средними цифрами из всех полученных для различных частей объема или сечения слитка, применив тот же прием для последовательно измененных механической обработкой сечений, вплоть до самого малого сечения (например 30 *мм*), включающего в себе характерные черты различных частей исходного сечения или объема.[1]

[1] Остальные главы части II „Сталь“ не сохранились. (*Ред.*).

Таблица № 2

Зависимость механических свойств металла от положения образца в слитке

Слиток № / Положение образца	1. Сечение 22″. Отливка в изложницу				2. Сечение 21″. Отливка формовочная				3. Сечение 48″. Отливка формовочная			
	Предел упругости	Временное сопротивление	Сжатие	Среднее значение сжатия	Предел упругости	Временное сопротивление	Сжатие	Среднее значение сжатия	Предел упругости	Временное сопротивление	Сжатие	Среднее значение сжатия
	кг/мм²		%		кг/мм²		%		кг/мм²		%	
Край 1	36,4	61,5	36,1		34,0	55,5	19,3		20,0	37,5	28,3	
2	35,1	62,3	31,6	31,5	34,1	50,0	16,7	18,7	20,5	40,5	44,0	41,6
3	35,2	62,8	26,7		33,5	52,6	18,6		20,0	39,8	31,0	
4	36,0	61,8	24,4		33,3	51,5	23,7		19,0	38,5	46,2	
5	34,9	62,0	25,8		34,0	51,9	19,0		19,5	38,0	38,2	
6	36,5	62,6	19,2	21,6	33,7	53,8	15,9	17,6	19,5	39,5	61,7	
7	35,7	63,9	16,8		34,0	56,4	11,8		20,5	36,0	46,9	
8	35,1	61,5	20,0		34,4	54,4	12,0		21,0	40,2	29,3	
9	35,1	61,5	21,5	18,1	35,1	53,9	9,8	11,7	20,5	38,5	39,0	
Середина 10	35,7	61,2	12,7		35,5	52,6	13,4		22,5	41,5	19,7	34,3
11		—	—	—	—	—	—	—	24,0	42,8	49,3	
12		—	—	—	—		—	—	23,0	43,5	21,3	
13				—	—		—	—	25,0	43,5	13,7	
14				—	—			—	26,2	46,3	19,0	13,4
15			—	—		—			29,0	45,5	11,5	
16	—								29,5	43,5	9,5	
В среднем	35,6	—	23,5	—	—	—	16,0			—	31,6	—
Колебания химического состава в пределах сечения: C	0,43 —0,51						0,30 —0,45		0,16 —0,30			
Si	0,24 —0,25						0,36 —0,38		0,40 —0,45			
Mn	0,34 —0,14						0,30 —0,34		0,75 —0,97			
S	0,015—0,018						0,012—0,016		0,019—0,089			
P	0,014—0,025						0,005—0,011		0,008—0,064			

ВВЕДЕНИЕ В ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Н. И. БЕЛЯЕВ

I

Практическое значение теоретической разработки вопросов, касающихся стали как материала, свойствами которого техника пользуется в самых широких размерах, чувствуется особенно сильно в последнее время. И поэтому в задачу современного техника должно входить не только удовлетворение требованиям спроса как естественная и обычная дань времени, а постоянная творческая созидательная работа как залог непрерывного и быстрого прогресса.

Реальное воплощение в жизнь творческих идей, как и само рождение их, требуют соответствующей обстановки. Вся совокупность технических знаний приобретена только путем самого тесного соприкосновения с мертвой природой, а постепенное оживление последней в технических производствах и приложениях шло параллельно с накоплением этих знаний. На протяжении целого ряда веков техническая мысль питается результатами накопленного практикой опыта. Поэтому современные храмы науки — технические учебные заведения — и храмы труда — фабрики и заводы, хотя видимо и расходятся в своих целях, но преследуют в сущности главную цель одну — технический прогресс по линии наименьшего сопротивления. Наблюдающаяся, тем не менее, обособленность в творческой работе этих учреждений, выражающаяся отсутствием достаточной технической связи и общения, есть одна из крупных ошибок нашего времени и главный тормоз нашего технического прогресса. Многие представители чистой науки далеки от практических технических вопросов, а многие представители чистой практики столь же далеки от теории. И те и другие, сознательно или бессознательно лишая себя необходимой пищи, лишают себя особенно необходимой взаимной поддержки. На почве такого ненормального положения рождается рутина в науке, рутина в практике, а в результате — застой в технике вообще.

При возведении технических сооружений, при постройке машин, при изготовлении различных металлических изделий вопрос о механических свойствах стали в них имеет существенное

значение, так как это вопрос прочности сооружений, машин и прочих изделий. Сталь в них должна удовлетворять только одному условию: отвечать своему назначению, — будет ли она обыкновенная углеродистая, специальная, дешевая или дорогая. Поэтому, самым правильным и надежным способом для оценки пригодности ее в этом отношении будет служба изделия в нормальных условиях ее работы. Опытным путем можно найти, какая сталь в каких условиях механической и термической обработок будет наилучшим образом соответствовать конечной цели изделия — отвечать своему назначению. Во многих случаях такой способ выбора стали и обработки ее применяется практически: например, в испытаниях броневых плит стрельбой по ним снарядов; снарядов — на пробиваемость по плитам; орудий — стрельбой, на прочность стенок трубы и различных частей лафета, инструментов — резцов, сверл и др. — резанием, сверлением, пилением и пр., бандажей — на изнашивание, пробегом по рельсам; щитов — на пробивание их пулями и т. д. В большинстве же случаев, однако, прибегают к искусственным приемам, создавая для стали такую обстановку для испытания, которая ближе всего подходит к обстановке работы ее в изделиях во время нормальной службы последних. Обстановка эта слагается из сил, температуры и времени, в течение которого они действуют. Силы могут быть различны по величине, характеру, способу приложения и действия. По характеру различают силы разрывающие, сжимающие, скручивающие, скалывающие, изгибающие или комбинированные из них, более сложные; по способу приложения — статические и динамические; по способу действия — силы могут прилагаться один раз или много раз, причем в последнем случае имеет значение также число приложений силы в единицу времени. Температуры могут быть ниже нуля и значительно выше нормальной атмосферной.

Большей частью искусственно создаваемая обстановка не отвечает действительности, так как сталь в изделиях подвергается одновременно самому разнообразному и сложному действию сил, что осуществить простым испытанием не представляется делом легким. Тем не менее, к этому стремятся нередко косвенным образом, путем применения простых механических испытаний, во многих случаях более или менее удовлетворительно разрешая эту сложную задачу.

Условия работы различных частей машин требуют определенного отношения их к тем усилиям, которые соответствующие части воспринимают или передают. Это отношение должно выражаться почти полной неизменяемостью формы, так как части машин, воспринимая и передавая различные усилия, должны при этом сохранить неизменными свои очертания и линейные размеры. В случае допустимости характером работы изменения формы, последнее ограничивается обыкновенно упругим изменением ее, т. е. условием сохранения первоначальной формы при прекращении действия рабочих усилий. Сообразно с характером сил оценка

свойств сопротивления частей машин изменению формы достигается испытанием стали, употребляемой для изготовления этих частей, на разрыв, сжатие, изгиб, скручивание и т.д. с определением элементов данных испытаний: предела упругости, временного сопротивления, удлинения, сжатия и других характерных величин.

Как известно, части машин во время работы не должны ломаться. Практика, однако, дает примеры поломок их, не сопровождающихся часто даже остающимися деформациями. Свойство ломаться без деформации, получившее в практике наименование хрупкости, проявляется сталью особенно часто в условиях динамического приложения сил. Части, работающие с ударом или испытывающие действие сил, прилагаемых с большой скоростью, особенно склонны к поломкам. Естественно, что наряду с испытаниями спокойными и медленно действующими усилиями необходимы испытания стали ударом или очень быстро действующими мгновенными усилиями, чтобы обеспечить частям машин динамическую прочность по отношению к различным внешним силам.

Прочность машины обеспечивается прочностью частей ее при продолжительной работе последних. Сталь, идущая на эти части, должна обладать способностью сопротивляться повторным усилиям различного характера, в большинстве случаев попеременным, при разном числе приложений силы в единицу времени. Так как испытаниями и статической и динамической силами при однократном приложении их не обеспечивается части машины достаточная прочность в отношении повторных усилий, то, естественно, явилась потребность в испытаниях на повторные усилия или на усталость стали. Эти испытания особенно важны еще потому, что ими устанавливаются пределы напряжений для стали, которые можно допускать без опасности ее преждевременного разрушения. Расчет большинства частей машин необходимо вести на данных этих испытаний, а не исходя из данных разрывающих усилий при статическом разрыве, как это, однако, еще имеет место ввиду недостаточно широкого применения испытания на повторные усилия стали.

Задача металлурга — давать сталь высоких качеств, удовлетворяющую условиям нормальной работы изготовленных из нее частей сооружений, машин и прочих изделий. Для надлежащего разрешения этой задачи необходимо:

1) получить здоровую сталь в расплавленном виде одним из современных способов;

2) разлить ее по формам и получить сталь в затвердевшем состоянии в виде слитков;

3) механически обработать сталь прокаткой, ковкой и штамповкой в связи с требованием придать куску стали форму, близкую к форме готового изделия;

4) термически обработать сталь применительно к условиям службы и назначению соответствующего изделия.

Ближайшее ознакомление с последней группой операций в более или менее полном виде в связи с попутным объяснением влияния предварительной обработки и подготовки на свойства стали в изделиях составит задачу дальнейшего изложения. Я позволю себе высказать сейчас же одно очень важное положение, что прочность частей машин обеспечивается с металлургической точки зрения совокупностью целого ряда обстоятельств и что при несоблюдении хотя бы одного из них гарантия прочности изделия сильно понижается. Параллельно с этим понижается гарантия однообразия в прочности одинаковых частей машин или изделий. Это положение приобретает особенное значение тогда, когда техника встречается со случаями изготовления весьма деликатных изделий или с особенно тяжелыми условиями службы последних. Тогда с наибольшей резкостью и рельефностью проявляются несовершенства методов обработки и способа обращения со сталью или допущенные в процессе изготовления переоценка значения отдельных факторов и обстоятельств и несознательное отношение при решении той или иной технической задачи.

II

Современная техника, удовлетворяя требованиям времени, обогащается все новыми специальными сортами стали, имеющими практическое значение, т. е. выполняющими известную механическую работу в виде частей сооружений, машин, сложных и простых механизмов. Сооружения, машины, механизмы и, вообще, разные изделия благодаря этому начали выигрывать в легкости и прочности, поскольку эта прочность зависит от стали и выражается в способности ее не разрушаться, т. е. не ломаться под влиянием динамических и статических сил и не деформироваться, т. е. не давать остающихся деформаций. Преимущества специальных сортов перед обыкновенными только в этом и заключаются, но и этого достаточно, чтобы вопрос о специальных сортах в технике приобрел очень важное значение. Совмещение свойств легкости и прочности — центр тяжести вопроса многих технических сооружений.

Проведение специальных сортов стали в жизнь нелегкая задача: оно требует специальной подготовки в виде предварительного научного освещения многих вопросов внутреннего сложения металла, зависимости между строением и физическими и механическими свойствами, способами видоизменения строения и свойств путем применения термических операций и пр. Здесь нужен, конечно, и опыт, но опыт с научным освещением практических вопросов и явлений. Нужен опыт, измеряемый не временем, а опыт как практическая проверка данных научного анализа, проверка на образцах действительной жизни, т. е. на изделиях, сооружениях, частях машин, механизмов и т. д. Среди непрерывно увеличивающихся численно категорий особо ответ-

ственных, по характеру исполняемой ими работы, изделий, выдающееся положение занимает чрезвычайно обширный класс режущих инструментов, требующих для своего изготовления высококачественной углеродистой и специальной стали. Вопрос об инструментальной стали, в особенности специальной, настолько важен в практическом отношении и настолько интересен в научном, что освещение его с этих двух сторон составляет одну из наиболее благодарных задач нашего времени. Естественное стремление к прогрессу в этом отношении привело к блестящим результатам, и современная техника может гордиться ценным приобретением в виде целого ряда весьма разнообразных сортов инструментальной стали — до быстрорежущей включительно, введением которых во всеобщее употребление сильно повышена производительность станков и понижена стоимость механической работы. Индивидуальные свойства каждого сорта инструментальной стали проявляются в работе инструмента, изготовленного из него. Большая или меньшая работоспособность инструмента зависит (при одинаковых прочих условиях) от более или менее правильного проведения материала этого инструмента через ряд последовательных необходимых тепловых операций. Как реагируют эти операции на соответствующий сорт стали — должны ясно себе представлять как производитель ее, так тем более потребитель: первый — для того, чтобы уметь предложить материал, отвечающий своему назначению; второй — чтобы извлечь из него наибольшую практически возможную работу. К сожалению, часто бывает, что производитель еще недостаточно хорошо знает свою сталь, а потребитель не умеет с ней хорошо обращаться; поэтому сталь, хорошая сама по себе, легко может потерять половину своей технической ценности. И так будет до тех пор, пока практические приемы обращения с инструментальной, машиноделочной и прочей сталью специального назначения не будут поставлены в близкую связь с теоретически обоснованными и практически подтвержденными физико-химическими превращениями и механическими перемещениями в стали под влиянием температурных изменений при нагреваниях и охлаждениях.

Современному технику приходится иметь дело с темпераментом стали. Темперамент стали слагается из ее химического состава и отношения ее к различным термическим и механическим операциям, т. е. к нагреваниям, охлаждениям, или к давлениям в горячем и холодном состояниях.

О химическом составе стали судят по химическому анализу. Последним выясняется обыкновенно только большая часть полного состава стали, в него не входят газы и те случайные примеси, присутствие которых не ожидается. Между тем, газы всегда имеются в стали и в свободном состоянии, и в виде соединений с другими химическими веществами. Вполне точно установлено выделение газов из стали при ее нагревании, установлено, какие газы выделяются, в каком количестве и при каких температурах.

Часто две плавки, одинаковые по химическому анализу, бывают весьма различны по свойствам металла в изделиях благодаря существенному различию в составе содержащихся газов и случайных примесей. Влияние газов недостаточно выяснено вследствие тех трудностей, с которыми связано их определение в стали. Со значительным присутствием газов в стали естественно связывается, прежде всего, меньшая плотность последней, а затем и непосредственное влияние на различные свойства ее в виде соединений. Давно уже серьезно считаются с закисью железа, со свойством водорода обезуглероживать сталь, со способностью азота вызывать хрупкость. Тем не менее, когда на практике встречаются с ненормальными явлениями в стали, совсем забывают о существовании газов потому лишь, что они цифрами не говорят о себе.

Присутствие в стали таких примесей как сера, фосфор, мышьяк, медь, олово, сурьма и других нежелательно—в виду ослабления ими тех качеств, которые хотят получить при выработке стали определенного назначения, несмотря на то, что вредное влияние одних примесей парализуется в достаточной степени иногда соответствующим количеством других, например, влияние серы нейтрализуется марганцем. Присутствие этих примесей в стали есть известный показатель чистоты ее, чистоты в отношении тех посторонних примесей, которые трудно учесть обыкновенными способами, но влияние которых тем не менее сказывается на ее качествах. Наиболее действительным средством против вторжения в сталь газов и вредных примесей при ее изготовлении является, как известно, применение чистых сырых продуктов и ведение расплавления и сплавления их в тиглях или электрических печах, которыми все более широко пользуются в самое последнее время. Так и получается большинство сортов стали специального назначения, т. е. сплавы железа с углеродом с бо́льшим или меньшим количеством других элементов, из которых наиболее употребительными являются: Si, Mn, Cr, Ni, W, Mo, V, Ti и др. Многие сорта стали, однако, получаются и менее чистым способом — в мартеновских печах и, тем не менее, до известной степени получают распространение как более дешевые сорта стали. Химический состав, т. е. количественное соотношение в стали известных химических элементов и соединений — далеко не достаточное условие для проявления сталью определенного механического эффекта в работе. Некоторые специальные элементы влияют не только и даже не столько своим присутствием в стали, сколько присутствием в большем или меньшем количестве во время процесса плавки и отливки, и это последнее обстоятельство для качеств стали может быть иногда гораздо полезнее, чем те остатки соответствующих примесей, которые определяются анализом в готовом продукте после его затвердевания. Так, как известно, действуют Al, Si, в таком же направлении влияют Ti, V и, может быть, все те элементы, которые и в виде составных частей готового продукта признаются сейчас не менее полезными. Наконец, сущест-

вуют и такие элементы, которые совсем не входят в химический состав стали и, тем не менее, пройдя через плавку, одним лишь участием в последней производят свое улучшающее влияние.

Химический элементарный состав не определяет химического состояния стали. Некоторые элементы могут находиться в состоянии различных химических соединений с железом и друг с другом или, равным образом, в различных аллотропических видоизменениях. Например, в отожженной стали углерод образует химическое соединение с железом в виде карбида состава Fe_3C, в закаленной стали того же состава данного карбида не существует. Образование и разложение различных карбидов характерно вообще для специальных сортов стали, содержащих нередко сложные и специальные карбиды, кроме чистого карбида железа. С другой стороны, и само железо может переходить из магнитного аллотропического видоизменения в немагнитное. Для немагнитного видоизменения, например, характерно свойство поглощать углерод при цементации. Каждое химическое состояние стали связано с известными свойствами — физическими и механическими, что вполне естественно и понятно.

При одном и том же химическом элементарном составе и химическом состоянии два куска стали могут, все же, иметь различную структуру, т. е. могут различаться между собой по форме и распределению составных частей и их соединений. А это, как известно, вызывает различные механические свойства. Итак, имея сталь определенного количественного соотношения полезных и вредных примесей, можно ее привести к такому химическому состоянию и структуре, которые обеспечивают наилучший механический эффект. Достигается это применением к стали рационально выбранной термической обработки.

Интересом к термической обработке стали все еще недостаточно проникнуты многие лица, стоящие у дела. Наблюдающееся часто отсутствие правильной постановки в деле термической обработки стали и изделий из стали есть результат пока еще слабого реагирования со стороны практических деятелей на научную постановку способов выработки продуктов потребления, удовлетворяющих определенным механическим требованиям. А между тем научные основы термической обработки стали в настоящее время являются более или менее прочно установленными; в этом отношении незаменимую услугу технике оказали те работники мысли, которые путем систематических исследований установили более правильный взгляд на продукты железного производства и доказали опытным путем всю важность широкого применения научных данных к вопросам чисто практического характера.

Произведенными исследованиями установлено, что нагревание и охлаждение стали сопровождается образованием и разложением химических соединений элементов, входящих в состав ее, аллотропическими превращениями железа и объемными изменениями металла в целом, заключающимися в расширении и сжатии.

Образование и разложение химических соединений, переход элементов из одного аллотропического видоизменения в другое сопровождаются или выделением, или поглощением соответствующего количества теплоты, что проявляется задержками в ходе нагревания и охлаждения стали — при температурах, при которых, или в пределах которых, эти преобразования происходят. Количество тепла, требуемое реакцией превращения, выделяется или поглощается на определенном промежутке температур. Чем меньше выделяется или поглощается его и чем на большем интервале температур это происходит, тем менее рельефно проявляется превращение и тем труднее его обнаружить. Между тем с этими внутренними превращениями в стали связаны изменения физико-химических и механических свойств ее. В условиях заводской практики приходится пользоваться всеми свойствами стали, в зависимости от назначения последней, а потому необходимо знать те условия и обстоятельства, при осуществлении которых различные свойства приобретаются, сохраняются и изменяются. Для этого же необходимо знание критических точек в стали, основанное на умении их обнаруживать и точным образом определять их положение на шкале температур при разных условиях нагревания и охлаждения (влияние температуры нагрева, скорости нагревания или охлаждения и т. п.); также необходимо знание индивидуального характера этих внутренних превращений, совершающихся в металле, и умение воспользоваться ими для сообщения стали определенных технических качеств.

Механические перемещения частиц в стали под влиянием нагревания и охлаждения свободно совершаются в пластичном металле, т. е. при достаточно высоких температурах, и вызывают большие механические давления в стали в непластичном ее состоянии, при сравнительно низких температурах. Результатом этих давлений являются внутренние напряжения в металле; в последних — причина образования трещин при неправильной термической и механической обработке стали. Брак от появления трещин в стальных изделиях при термической и механической обработке их представляет большое зло, борьба с которым может быть успешной лишь при внимательном и серьезном изучении поведения стали под совокупным влиянием двух факторов — температуры и давления.

Из совокупности химических превращений, аллотропических изменений, механических перемещений, при наличности в стали определенных полезных и вредных элементов, слагается структура стали, видимая в микроскоп. Структура меняется с химическим составом и тепловой обработкой, отражая на себе как то, так и другое. Отсюда понятна исключительная роль металлографии и металлографических методов исследования в деле изучения и освещения различных сторон заводских операций, применяемых при тепловой обработке стали.

III

Идея применения термической обработки к стали давно уже осуществлена практически в формах отжига, закалки, отпуска, а иногда и более сложных процессов (например цементация). При изготовлении различных частей машин и изделий, снарядов, брони, режущих и других инструментов этими операциями пользуются в самых широких размерах. Правильная постановка этих операций в применении к некоторым изделиям, как, например, к броне и снарядам, требовала всегда значительных затрат материала, времени и усилий со стороны заводов, изготовлявших их. Благодаря этому, естественно, развилось большое количество секретных мастерских — закалочных, с секретными способами термической обработки и многолетним опытом отдельных лиц. Конечно, накопленный временем и отдельными лицами практический материал весьма ценен, но ценность его была бы во много раз больше, если бы он параллельно научно освещался, так как нам нужен опыт как практическая проверка данных научного анализа на образцах действительной жизни — изделиях, машинах и сооружениях. Такого опыта еще немного, и этим мы обязаны в известной степени более чем безразличному отношению со стороны многих практических деятелей к научной постановке способов термической обработки стали. Вера только в практический опыт отдельных лиц еще сильна, и потому немало времени пройдет, пока наука завоюет себе подобающее место на наших заводах в вопросах термической обработки стали, пока пирометр сделается обязательной принадлежностью в каждой закалочной мастерской. В настоящее время идет большая и упорная борьба между старым течением только опыта и новым — опыта на фундаменте науки. К сожалению, представители академической науки часто очень далеки от практических задач, выпадающих на долю заводских деятелей, а последние далеки от вопросов науки. При этих условиях наука, не соприкасаясь достаточно с запросами жизни, развивается односторонне и теряет постепенно авторитет; практика же, не одухотворяемая наукой, превращается в рутину. Быстрый прогресс возможен только при постоянном тесном общении науки с практикой и при согласном и параллельном развитии их. Это старая истина и в то же время — вечно новая, повторять которую тем не менее следует чаще, чтобы она скорее дошла до сознания всех причастных к технике и к прогрессу в ней. Ставить любую практическую задачу так же легко, как высказывать истину; осуществить же ее так же трудно, как доводить истину до общего сознания — и в этом отношении никогда не следует заблуждаться.

В частном случае задача научной постановки термической обработки стали— одна из таких задач, решить которую удовлетворительно может только время. Наша скромная задача в этом направлении должна ограничиться пока признанием, что 1) благодаря быстрому и блестящему развитию науки о строении

металлов и их сплавов, в частности — стали, вопрос о термической обработке стали поставлен, наконец, на правильный путь, и что 2) идя только этим путем, можно и должно решать различные задания и требования практической жизни, предъявляемые современному металлургу.

Современная постановка термической обработки стали на большинстве заводов неудовлетворительна еще и в том отношении, что, не признавая в термической обработке совокупности самостоятельных, чрезвычайно важных операций, приводящих к качественному улучшению стали лишь при правильном выборе и проведении их, очень мало считаются и с тем, какой путь прошел материал до этих операций, и каким образом он получен. Другими словами, подвергая сталь термической обработке, слишком высоко расценивают самый факт применения термической обработки; от последней ждут иногда чудес и удивляются, когда их не получается. Между тем, в вопросах повышения механических свойств стали и наиболее совершенного использования ее в механическом смысле, термической обработке должно принадлежать определенное место, и определить это место — одна из ближайших задач современного металлурга. Требовать от термической обработки того, чего она не в состоянии дать, — легко; но от этого наши изделия, машины и конструкции не выиграют ни в весе, ни в прочности, ни в работоспособности.

В стремлении к химической и физической однородности в стали, достигаемой химическим составом и соответствующей термической обработкой, металлург не должен забывать и о механической однородности стали. В достижении этой однородности различными способами — его цель и прямая задача. Такими способами являются: получение стали, возможно чистой от вредных примесей и газов, отливка стали с устранением или уменьшением причин, способствующих проявлению неоднородности в строении чистой стали, создание возможной однородности строения в разных направлениях процессами механической обработки в горячем состоянии. Из последних процессов наиболее идеально может выполнить эту задачу ковка, почему кованой стали надо отдать в механическом отношении предпочтение перед другой. Должен оговориться, что не всякая ковка способна дать нужный результат, а только разумно примененная и осуществленная, как и вообще всякий другой процесс.

Чем чище сталь, полученная в слитке, чем однороднее в массе химически и физически построена болванка и чем разумнее применена к ней горячая механическая обработка, тем однороднее в механическом смысле оказывается металл и тем лучше подготовлен он для термической обработки. В этой подготовке к термической обработке — половина успеха применения последней в целях придания стали в изделиях необходимых для нормальной службы их механических свойств. Стремления лучших металлургов всегда были направлены к получению возможно чистой от вредных при-

месей и газов стали. На ковку и другие способы механической обработки в горячем состоянии (прокатку, штамповку) уже давно многие из них смотрели как на средство к улучшению и повышению механических свойств стали. А применять правильные методы термической обработки начали с тех пор, как металлография дала к тому достаточные средства в виде пирометра, критических точек и методов изучения структуры. Не следует, однако, забывать, что в некоторых частных случаях правильное решение задачи приготовления изделий из стали с весьма высокими механическими свойствами удавалось и значительно ранее, даже во времена глубокой древности.

Примером наиболее удачного выполнения этой задачи может служить производство клинков из особого сорта стали — булата (в Индии, Персии, Сирии и Египте это производство наиболее процветало в глубокой древности). Булат получается сплавлением при высокой температуре в тиглях самой чистой руды или самого чистого железа с графитом или древесным углем, и медленным после этого охлаждением расплавленной массы вместе с тиглями. Необходимыми условиями получения хорошего булата считаются: чистота сырых материалов (руды, железа, графита, угля и пр.), особенно в отношении серы, и возможно спокойное медленное охлаждение при затвердевании металла. Застывшие слитки булата проковываются при сравнительно низких температурах специальными способами в клинки, причем хороший булат прекрасно выдерживает ковку несмотря на значительное содержание углерода в металле, плохой же — дает трещины и рассыпается. После закалки при соответствующей темпертуре клинок получает те свойства твердости, упругости и динамической прочности (отсутствие хрупкости), к совмещению которых в изделиях в настоящее время стремятся во всеоружии науки. Качество булата и булатных изделий оценивается рисунками тех причудливых узоров, которые появляются на полированных и протравленных особым способом поверхностях этих изделий и хорошо различаются невооруженным глазом. Характерным в производстве хороших булатных изделий необходимо признать разумное и гармоническое сочетание трех условий: 1) применение возможно чистых сырых материалов, 2) умело поставленной ковки и 3) правильно выполненной термической обработки. Только при одновременном соблюдении этих условий удалось достигнуть удивительного совмещения свойств твердости, упругости и динамической прочности в изделиях, что и было подтверждено нашим ученым Аносовым в 1837 г. получением булатных клинков, по свойствам не уступающим восточным. Как видим, задача металлурга в частном случае булатных клинков решена древними металлургами блестяще. Поэтому современный металлург, отдавая должную дань уважения науке и искусству их, не должен забывать этого удачного образца в важном деле улучшения и повышения механических свойств разнообразных современных изделий.

IV

Современные способы получения стали в бессемеровских ретортах, мартеновских печах, тиглях и электрических печах дают сталь различного состава. Разница в составе сказывается, с одной стороны, естественной разницей в исходных сырых материалах и в способах получения; с другой стороны, искусственно — введением в шихту различного количества углерода — для получения углеродистых сортов стали, большего или меньшего количества примесей (Si, Mn, Ni, Cr, W, Mo, V, Ti и др.) — для получения весьма обширного и разнообразного класса специальных сортов стали. Параллельно с этими полезными примесями, определяющими темперамент стали, ею усвояется большее или меньшее количество вредных примесей (P, S, Sn, As и др). и газов (H, O, N и др.).

Верного и ясного представления о составе стали мы вообще не можем иметь. Такой точный, казалось бы, способ исследования, как химический анализ, не может считаться надежным способом оценки состава стали — в том виде, в каком этот анализ применяется в настоящее время. Прежде всего, он никогда не определяет действительного состава стали, так как в цифрах анализа мы не имеем цифр содержащихся в стали газов. Отсутствие этих цифр, могущих дать представление о чистоте стали в отношении газов, объясняется просто трудностью получения их. Но это не дает права забывать о присутствии газов в промышленных сортах стали и о том влиянии, какое они могут иметь и имеют на различные технические свойства стали. Часто сталь двух плавок имеет один и тот же химический состав в смысле совершенно одинакового содержания обычно определяемых элементов, но весьма различно относится к одинаковым механическим и термическим обработкам; одна, например, хорошо куется, катается, не дает трещин при закалке; другая — дает трещины, рассыпается или расслаивается. Наиболее вероятным объяснением этих явлений может быть различное по количеству и составу содержание газов в обоих случаях. Например, часто растрескивание болванок во время ковки или прокатки ставят в связь с присутствием закиси железа в металле, и это весьма правдоподобно, так как из мартеновских печей в зависимости от хода плавок можно получать сталь с различным содержанием растворенного кислорода. Между тем, благодаря отсутствию в анализах цифр, говорящих, хотя бы приблизительно, о содержании закиси железа или кислорода в стали, подчас очень плохая сталь признается хорошей, пускается в дело и, в конце концов, дает неудовлетворительные результаты. В вопросе о чистоте стали в отношении газов наши знания основаны пока главным образом на вере. Так, мы верим, что тигельная сталь всегда содержит меньше газов, чем мартеновская; относительно стали из электрических печей трудно сказать в этом отношении что-нибудь положительное. Вера, конечно,

имеет известное основание ввиду разницы в чистоте применяемых сырых материалов при тигельном и мартеновском процессах, разницы в обстановке самих процессов (закрытые тигли и открытые для доступа газов ванны), разницы во внешних явлениях при отливке и пр. Но этим не исключается еще возможность в тиглях получать иногда сталь с большим количеством газов, как не исключена возможность того, что чистая в момент изготовления сталь обогащается газами при последующих нагреваниях и в соответствующих для этого обстановках: кислородом при пережигании, азотом при цементации или электрической сварке и т. д.

За последнее время вопросу о газах в стали уделяется особенное внимание, и в целом ряде экспериментальных работ выясняется состав встречающихся в стали газов, количественное содержание и распределение их, порядок и характер выделения их из стали при нагревании в безвоздушном пространстве, а также влияние их на механические и различные физические свойства стали [1]. Параллельно с этим, по мере освещения вопроса о вредном действии того или другого газа на металл, металлургами принимаются меры к наиболее совершенному их удалению из стали или к возможному обезвреживанию. Давно уже пользуются для этого специальными присадками, из которых наибольшее распространение получили Mn, Si и Al. В настоящее время с этой же целью вводят и другие примеси, как, например, V, Ti, Mg, Na, Ca в чистом виде или в виде сплавов, из которых некоторые уже успели зарекомендовать себя и с успехом применяются в практике. Однако отсутствие достаточно надежных химических методов определения газов в стали в условиях заводских лабораторий в большой степени умаляет значение химического анализа в оценке состава стали и несколько тормозит работу по борьбе с газами в стали [2].

Но и в тех случаях, когда возможно учесть при помощи количественного химического анализа элементарный состав стали, как это имеет место по отношению к обычно определяемым полезным и вредным примесям, этот метод, несмотря на очевидную его точность, не может быть признан особенно надежным при оценке доброкачественности стали. Весьма характерным образом это проявляется по отношению к сере и фосфору, т. е. тем именно примесям, которые оказывают наиболее вредное влияние на механические свойства стали. Дело в том, что химический анализ

---

[1] Как отмечает проф. Г. З. Нессельштраус, в металлографической лаборатории Путиловского завода под руководством и при ближайшем участии Н. И. Беляева было выполнено в 1913 г. обширное исследование газов, содержащихся в слитках затвердевшей стали и выделяющихся из расплавленного металла непосредственно после разливки в изложницы. Несколько лет спустя по инициативе Н. И. Беляева было предпринято новое, более тщательное и полное изучение явления выделения газов из застывающей стали особо приглашенным для этой цели Б. В. Старком и его сотрудниками.

не говорит о формах соединения и о характере распределения примесей в металле, между тем как с этим-то тесно связаны все механические свойства. Кроме того, распределение и S и P в стали крайне неравномерно, даже если не иметь в виду прибыльную часть слитка с резко выраженной ликвацией. Сера, когда она встречается в стали в виде сернистого марганца, образует в металле ряд центров или мест наибольшего скопления ее. Поэтому часто химик-аналитик не виноват в том, что полученный анализ дает слишком низкую цифру содержания S в стали, или что поверочный анализ дает другие цифры, иногда сильно расходящиеся с первоначальными: химик производит анализ взятой им стружки, а не куска; стружки же, взятые из одного куска, нередко оказываются далеко не однородными. Эти больные стороны существующего метода определения элементов в стали очевидны для того, — кто имеет дело с микро- и макроскопическими анализами тех кусков или объемов стали, стружки от которых поступают для химического анализа. Между тем, все так привыкли к оценке чистоты стали химическим анализом, что когда случаются поломки частей машин и изделий во время службы, то прежде всего производят определение химического состава материала в месте поломки.

Иногда химический анализ дает удовлетворительный ответ, в большинстве же случае — нет. В моей практике было много случаев, когда химический анализ давал картину вполне удовлетворительного по чистоте материала, а причина поломки была все-таки в нечистоте стали. Практика научила меня не доверяться исключительно цифрам химического анализа и искать других способов для более правильного суждения о чистоте металла и выяснения спорных вопросов, обращаясь к помощи макро- и микроскопического исследования.

На примере серы в стали в виде MnS я постараюсь сейчас наглядно показать, насколько один химический анализ является недостаточно надежным методом в некоторых, к сожалению, довольно частых случаях. Давно уже известно, хотя не всеми еще достаточно прочувствовано, что сера в виде MnS в стали есть нормальное явление и более желательное, чем S в виде FeS. В зависимости от встречающихся относительных количеств S и Mn содержание MnS в стали может быть больше и меньше (например, в мартеновской стали его больше, чем в тигельной). Но при одном и том же процентном содержании MnS скопления и группировки его в металле могут быть весьма различны. Выкристаллизовываясь из жидкого раствора первым при застывании стали, сернистый марганец образует скопления разной величины — в зависимости от соответствующей скорости затвердевания расплавленной стали. Наглядно картина распределения выделений сернистого марганца в толще метала может быть представлена отпечатками на шелковой ткани, пропитанной специальными веществами после соответствующей подготовки поперечных или

продольных разрезов исследуемых слитков [1]. При действии кислотой образующийся в местах значительного скопления серы сероводород (H_2S) оставляет на плотно натянутой по поверхности шлифа ткани черные следы в виде точек, пятен и полос соответственно расположению скоплений сульфидов в металле. На фиг. 1 и 2 даны изображения отпечатков на серу, снятые с сечений болванок: на фиг. 1 — мартеновской стали, отлитой формовочным способом (т. е. с медленным, сравнительно, остыванием), на фиг. 2— мартеновской шведской стали [2]. Сталь во всех случаях довольно близкого химического состава по углероду, причем болванки также приблизительно одинаковые по величине с поперечным сечением: обе первые мартеновские — 24 дюйма в поперечнике, шведская же — 20 дюймов. Из сравнения снимков следует, что наиболее совершенным распределением сернистого марганца обладает шведская болванка и что по характеру охлаждения она приближается к болванке, отлитой в изложницу, и наконец, что наихудшим распределением MnS обладает болванка, наиболее медленно охлажденная.

Что же нам дает химический анализ этих болванок? В табл. 1 сгруппированы данные анализа. Эти данные, представляя собой средние цифры содержания серы в металле, совершенно не говорят о распределении последней по различным сечениям слитков или о групповых скоплениях сульфидов. Практически же распределение серы и групповые скопления выделений ее представляют как раз наибольший интерес. Известно, что частицы MnS, выделившись из жидкого раствора и заняв определенный объем в теле болванки, не разрушаются при последующих операциях с затвердевшей болванкой. Они могут только механически перемещаться вместе с объемом металла, в котором они как бы утоплены. Результатом механической обработки болванки в горячем состоянии является образование ряда более тонких или толстых нитей (прослоек) железа с MnS в середине, который с металлом механически не сцеплен, а сам по себе представляет хрупкое вещество. Несомненно, что присутствие подобных нитей в стали, с чем связано явление так называемых „светловин", весьма нежелательно с точки зрения механических свойств, ко-

---

[1] Как указывает проф. Г. З. Нессельштраус: „способ получения отпечатков на шелку разработан в металлографической лаборатории Путиловского завода под руководством Н. И. Беляева и состоит в следующем. Шелковую ткань (так называемое текинское полотно) обрабатывают раствором из $HgNO_3$ — 5 *г*, HNO_3—3 *г*, H_2O — 100 *г* и после просушки обрабатывают вторично 5%-ным раствором NaCl в воде. Высушенный вторично шелк готов к употреблению и в таком виде может храниться в сухом месте продолжительное время. При травлении стали на серу смоченный в воде шелк накладывают на поверхность шлифа, крепко натягивают, не допуская появления пузырьков воздуха, и вместе с тем сильно смачивают поверхность 2%-ным раствором H_2SO_4 в воде. Отпечаток получается через 5—10 мин".

[2] Н. И. Беляевым также была исследована мартеновская сталь, отлитая в изложницу, но снимок отпечатка не сохранился. (*Прим. ред.*).

торые значительно благодаря этому ухудшаются. Сказанное относится не только к ликвационной части слитка, но и ко всей болванке в целом, так как и здоровая часть болванки построена не так уж идеально, как себе представляет, может быть, большинство.

V

Сталь, полученная одним из применяемых способов в расплавленном виде, после очищения от вредных примесей и газов, поскольку это достижимо при данных условиях, и после дозирования в отношении обыкновенных и специальных примесей поступает для нужд производства в форме, близкой к форме изделия или в виде болванки. В первом случае имеем фасонное литье, получаемое или вливанием расплавленной стали в спокойно лежащую, стоящую форму или же вливанием во вращающуюся форму — при способе центробежной отливки [1]. Таким путем получаются литые изделия, идущие в дело без предварительной обработки механическими средствами в горячем состоянии. Во втором случае болванки механически перерабатываются в форму изделий или промежуточных заготовок. Всякая механическая обработки в горячем или холодном состоянии путем ковки, прокатки, штамповки, волочения и т. п., имеющая целью придать куску стали известную форму, должна быть согласована с темпераментом стали, так как сталь каждой плавки заключает в себе в скрытом состоянии то, что наиболее резко, невыгодно для нее, проявляется тогда, когда для этого создается соответствующая обстановка. К таким проявлениям, имеющим причину как в самой стали, так и в обстановке обработки ее, относятся, например, рассыпание болванок, растрескивание, образование рванин, волосовин, скрытых трещин и напряжений. Наиболее опасными в большинстве случаев практики являются скрытые (внутренние) трещины и напряжения, так как они недоступны непосредственному наблюдению, но могут легко проявиться при термических обработках или даже позднее, во время службы изделий. Некоторые считают, что $^{9}/_{10}$ всех трещин, которые обнаруживаются при закалке инструментальной стали (в виде механически отделанных инструментов), необходимо приписать неправильно произведенной ковке ее.

---

[1] Изготовление стальных изделий путем центробежной отливки приобрело в настоящее время большое практическое значение в целом ряде отраслей нашей промышленности. Тем более ценым является указание на этот способ отливки со стороны Н. И. Беляева, который придавал этому способу отливки большое значение в смысле улучшения качества литой стали (отсутствие усадочной раковины и ликвации). На Путиловском заводе, как указывает проф. Г. З. Нессельштраус, при ближайшем участии Н. И. Беляева еще в 1909 г. производились опыты изготовления путем центробежной отливки изделий, имеющих форму тел вращения, как, например, труб, бандажей, снарядов и т. п. (*Прим. ред.*).

Таблица 1

Результаты анализа на серу трех слитков мартеновской стали

Способ отливки болванки	Место взятия пробы	Химический состав в %					Специальный анализ на серу
		C	Si	Mn	P	S	
Отливка формовочным способом	Анализ плавки . . .	0,46	0,36	0,31	0,016	0,012	Химический анализ стружек, взятых неглубоким сверлением (не более 3 *мм* в глубину) на пятнах и вне пятен из центральной части слитка: 0,44% C, 0,38% Si, 0,30% Mn; 0,017% P, 0,030% S (пятно), 0,42% C, 0,36% Si, 0,29% Mn, 0,012% P, 0,012% S (чист.) Химический анализ стружек из пятен в наружном и промежуточном слоях слитка: 0,032% S, 0,030% S, 0,030% S, 0,031% S (в четырех местах)
	Наружная поверхность слитка	0,44	0,33	0,36	0,009	0,013	
	Промежуточный слой слитка	0,48	0,34	0,33	0,009	0,013	
	Центральная часть слитка	0,50	0,34	0,38	0,013	0,013	
Отливка в изложницу	Анализ плавки . . .	0,46	0,20	0,35	0,025	0,011	
	Наружная поверхность слитка	0,44	0,23	0,33	0,021	0,013	
	Промежуточный слой слитка	0,46	0,24	0,33	0,020	0,014	
	Центральная часть слитка	0,50	0,24	0,38	0,024	0,013	
Шведская болванка	Наружная поверхность слитка	0,46	0,29	0,73	0,024	0,020	
	Промежуточный слой слитка	0,50	0,28	0,75	0,030	0,012	
	Центральная часть слитка	0,52	0,29	0,71	0,024	0,027	

Далее, механическая обработка в горячем состоянии непременно должна быть согласована с характером механической работы стали в частях машин и всевозможных изделий, так как сопротивление механическим силам стали в литом, катаном и кованом виде неодинаково. Практика уже с давних пор отметила эту разницу, предпочитая кованую сталь катаной, а кованую и катаную литой — везде, где только это возможно по конструктивным и экономическим соображениям. С механической точки зрения интересно еще то, что литой металл вообще и особенно фасонные отливки в разных точках своей массы (если только эта масса не очень мала), сильно отличаются по механическим свойствам, а сталь катаная и кованая различно сопротивляются силам в разных направлениях. Чем сталь менее чиста, тем более резко выступает это различие в свойствах по разным направлениям. Но и в самой чистой стали расхождение таково, что его необходимо объяснить разницей внутреннего построения (ориентировки) частиц металла, в разных точках массы — в случаях отливки, и по различным направлениям в случаях катаной и кованой стали, обнаруживающей векториальные свойства как следствие механических деформаций. Еще более характерным, интересным и важным является то обстоятельство, что термическая обработка не в состоянии уничтожить эти отличительные особенности литого и механически обработанного металла, — она лишь несколько сглаживает их. Структурный анализ отливок катаной и кованой стали выяснил причину означенных явлений и научно объяснил разницу в механических свойствах разных точек отливок и по разным направлениям в кованых и катаных кусках как необработанных, так и обработанных термически.

Сообразно тому назначению, которому должно служить и удовлетворять изделие, применяется соответствующая сталь и отвечающая ей и условиям службы изделия термическая обработка. Например, для сверла, которое должно рассверливать дыры в котельных листах с определенной скоростью, применяется обыкновенная углеродистая инструментальная сталь с 1,0—1,2% С. Только после соответствующей термической обработки (закалки и отпуска) сверло приобретает способность удовлетворительно выполнять требуемую работу. Но то же сверло при желании высверлить им дыры в другом более твердом материале и с большей скоростью, может оказаться негодным и должно быть заменено для этой работы другим — из стали другого состава с иной термической обработкой и, весьма возможно, — с другими свойствами, как, например, — не терять своей работоспособности при нагревании во время работы до температуры 550—600° С.

Техника долгое время имела дело только с углеродистыми сортами стали, удовлетворяя ими всякому спросу путем применения соответствующей стали в литом виде или после механической обработки — в катаном, кованом и штампованном виде. Прочность материала в изделиях достигалась не столько индивидуальными

свойствами стали, сколько большими запасами прочности в виде больших поперечных сечений частей машин, механизмов и конструкций, вообще — большой массой их. Желание облегчить конструкции возможно бо́льшим уменьшением их веса, вполне естественное тогда, когда это давало технические удобства и преимущества, встретило серьезные затруднения, прежде всего, в самом материале, так как больше пришлось считаться с физико-механическими свойствами последнего. Но как раз эти то свойства при существовавших способах обращения с материалом и способах применения его в дело непосредственно в литом, катаном или кованом виде не отличались особенным однообразием и не могли дать достаточных гарантий прочности. Тогда начали обрабатывать сталь термически, и первой операцией, с помощью которой стремились внести однообразие в свойства продуктов обработки, явился отжиг, т. е. нагрев до более или менее высоких температур и с несколько замедленным после этого охлаждением.

При помощи отжига старались устранять недостатки отливок (напряжения в них), освобождаться от нежелательных последствий механической обработки давлением в нагретом и холодном состоянии (например, от наклепа) и сообщать стали способность лучше *сопротивляться усилиям, особенно динамическим*, — все это предполагалось осуществить одним, казалось бы, универсальным и вместе с тем сравнительно простым средством, как отжиг. Жизнь, являющаяся великим учителем, однако, с очевидностью показала, что один отжиг, даже в условиях наиболее идеального его выполнения, является недостаточным для улучшения качеств металла во всех отношениях, и что наряду с этой, весьма важной и для всякой стали необходимой термической обработкой в большинстве случаев приходится подвергать сталь и изделия из стали еще закалке и отпуску. В результате создались более сложные и многочисленные приемы термической обработки стали как совокупности ряда отдельных тепловых операций, из которых каждая, в свою очередь, слагается из двух элементов — нагревания и охлаждения, причем условия и характер того и другого могут существенно различаться при разных обстоятельствах.

Понимаемая в таком широком смысле термическая обработка приводит сталь к определенному состоянию структуры или к сочетанию структурных элементов, при котором последняя приобретает улучшенные по сравнению с первоначальными физико-химические и механические свойства. Так как соответствующее изменение структуры и свойств достигается в обстановке применения к стали различных условий нагревания и охлаждения, т. е. разных колебаний температур, то такого рода обработка стали получила название термической или тепловой. С этой точки зрения всякая горячая механическая обработка, как, например, ковка, прокатка или прессование предварительно нагретого до некоторой высокой температуры куска стали есть в то же время и термическая (тепловая) обработка ее, так как здесь имеются налицо главные

элементы термической обработки: нагревание стали до некоторой температуры и охлаждение, начиная с конечной температуры нагрева, с той или иной скоростью. Однако, если подходить к вопросу о термической обработке стали не с чисто формальной стороны, но по существу, никак нельзя совершающееся при горячей механической обработке параллельно с воздействием механических сил влияние на металл переменных температурных условий считать за особую термическую обработку по следующим соображениям. Необходимость нагревать сталь при механической обработке давлением явилась результатом невозможности деформировать большие массы стали механически в холодном состоянии при существующей силе механических средств, т. е. молотов, прессов и прокатных станов. Нагревание стали, понижая предел упругости ее, сообщает ей способность легче деформироваться под влиянием механических сил и тем именно легче, чем нагревание выше. Естественно поэтому, что механическая обработка, преследуя главным образом получение требуемой формы изделия, стремилась получить ее возможно легким путем, пользуясь для этого в качестве вспомогательного средства нагреванием стали до высоких температур. При этом предельная температура нагревания ограничивается только условием, чтобы во время процесса нагревания и последующей механической обработки в стали не происходило химических изменений, окислительных процессов или частичного расплавления, так как несоблюдение означенных условий мешает нормальному выполнению механической обработки, вызывая в металле появление рванин, трещин и т. п. пороков, вплоть до рассыпания или расползания деформируемого куска. Итак, одну из операций термической обработки — нагревание, в случае горячей механической обработки ведут до возможно высоких температур, вполне оправдываемых с точки зрения механической обработки, но не всегда целесообразных и допустимых с точки зрения термической обработки, так как правильная термическая обработка в этих температурах совсем не нуждается и их избегает.

По мере протекания процесса механической обработки стали в горячем состоянии температура деформируемого куска постепенно падает. Наиболее выгодным случаем для механической обработки будет тот, когда температура куска падает очень медленно, т. е. когда она остается достаточно высокой в течение всего процесса механической обработки. Достигается это, с одной стороны, достаточно быстрым проведением самого процесса обработки, а с другой стороны, возмещением теряемой куском стали теплоты от внешнего охлаждения теплотой от преобразования механической энергии в теплоту. Но этот случай является как раз наименее выгодным в отношении условий термической обработки, так как при последней чаще всего избегают медленного охлаждения с высоких температур нагрева как обстоятельства, ухудшающего строение и свойства стали. Отсюда вытекает, что горячая механи-

ческая обработка в той обстановке, в которой она осуществляется в настоящее время на заводах, совсем не считается с внутренней природой стали, ибо для нее температура куска стали и изменение последней во время обработки интересны лишь постольку, поскольку они облегчают процессы деформирования материала для получения стального изделия или заготовки требуемой формы. Тем не менее, делаются иногда попытки использовать температурные условия, в которых находится сталь при горячей механической обработке, с целью сообщения получаемому изделию вместе с надлежащей внешностью и соответствующих его назначению строения и свойств (например, при прокатке рельс). Достигает ли, однако, подобная совместная механическая и термическая обработка преследуемой цели и когда именно?

В тех случаях, когда механически обработанные куски стали в виде изделий подвергаются термической обработке, там термическая обработка при механической обработке теряет всякое значение. В тех же случаях, когда изделия непосредственно после горячей механической обработки должны итти в дело и выполнять известную работу, там пренебрегать температурными условиями горячей механической обработки нельзя, там необходимо рациональное соединение термической обработки с механической — и это будет единственный случай допустимого совмещения механической и термической обработки в одной операции. Если принять во внимание то обстоятельство, что истинная термическая обработка имеет дело с не особенно высокими температурами (редко превышающими 900° С), то станет ясно, что, вообще говоря, совместить механическую обработку стали в нагретом состоянии с рациональной термической обработкой практически не всегда возможно. Одной из главных причин этого остается недостаточная сила механических средств, которыми располагает современная техника, особенно в виду тех больших масс, которые она должна механически деформировать. Но, как всякая задача должна быть разрешена постольку, поскольку это оказывается возможным, так и задача совместной механической и рациональной термической обработки стальных изделий может быть удовлетворительно разрешена в той мере, в какой это позволяют механические средства, крупность обрабатываемых масс, окончательные размеры и формы изделий и прочие обстоятельства технического производства. Слишком часто еще, к сожалению, лицами, осуществляющими процессы горячей механической обработки, совершенно игнорируются температурные условия этих процессов, как не имеющие, будто бы, большого значения на результат обработки. Если с внешней стороны иногда и может казаться, что та или другая сталь допускает безнаказанно варьировать температурные условия при горячей механической обработке в довольно широких пределах, то в действительности это не так: несоблюдение требуемых, согласно установленным научными исследованиями данным, температурных условий ведет ко многим весьма нежелательным

последствиям, выявляющимся иногда сразу в виде брака механической обработки, иногда же гораздо позднее — при окончательной термической обработке или во время службы изделий.

В настоящее время позволительно высказать положение, что теоретически всякое изделие из стали, всякая часть машины должны быть термически обработаны. Необходимость термической обработки вытекает из того соображения, что всякий кусок стали, превращенный при помощи тех или иных приемов в изделие, практически должен дать максимум полезной работы, т. е. должен быть использован наиболее совершенным образом. И все те операции, которые способствуют приведению стали к такому состоянию, должны быть обязательно к ней применяемы. Из этих операций, без сомнения, термическая обработка занимает одно из первых мест в виду того, что она способна вызывать весьма значительные перегруппировки во внутреннем строении стали, связанные с коренными изменениями многих свойств ее. Не менее важной в этом же отношении является другая операция—механическая обработка путем деформирования металла в нагретом или холодном состоянии, необходимость применения каковой к стали вытекает из тех же соображений, как и необходимость термической обработки. Особенно это относится к механической обработке в горячем состоянии, когда сталь обладает значительной пластичностью и однородностью внутреннего строения. Механическая и термическая обработки являются, пожалуй, наиболее действительными средствами к улучшению качества литой стали, дополняя в этом отношении одна другую.

При выяснении значения какой-либо отдельной операции в ряду разного рода обработок и процессов производства легко серьезно ошибиться, переоценивая это значение. Такая ошибка, несомненно, была допущена и по отношению к термической обработке. Так, существовало мнение, что применяя только термическую обработку, можно литую сталь привести к такому же состоянию механической прочности, как и кованую, т. е. механически обработанную. Если бы это мнение было правильно, термическая обработка сильно выиграла бы в своем значении. В действительности же это оказалось не так. С другой стороны, и сейчас еще не редкость услышать мнение, что специальная сталь в силу одного лишь своего химического состава, т. е. присутствия в ней в определенных количествах той или иной специальной примеси, должна обладать лучшими качествами в смысле механической прочности и вязкости, чем простая углеродистая сталь, даже если не применять к ней никакой термической обработки. Нечего и говорить, что подобное утверждение не выдерживает никакой критики, являясь грубым заблуждением. Равным образом, специальная сталь для выявления полностью своих наилучших механических качеств нуждается также и в горячей механической обработке, причем, в виду более сложного химического состава специальной стали и более пестрой по числу одновременно при-

сутствующих в ней элементов структуры как механическая, так и термическая обработка специальной стали требует еще более тщательного соблюдения внешних условий соответствующих обработок, как, например, приложения достаточных внешних сил при механической обработке и применения надлежащих строго ограниченных интервалов температур и скоростей нагревания и охлаждения при термической обработке.

VI

Как известно, процентное содержание примесей в специальных сортах стали может доходить до очень крупных величин. Например, для того чтобы сталь получила свойство немагнитности, требуется присутствие в ней никеля в количестве 27—28%; для того чтобы сталь хорошо сопротивлялась изнашиванию в смысле истирания (в рельсах на закруглениях или в частях черпаков экскаваторов) она должна содержать до 13—14% марганца; в лучшей стали для постоянных магнитов необходимо большое содержание вольфрама и хрома; для того чтобы режущие инструменты могли работать на больших скоростях резания и не теряли режущей способности даже при нагревании до 600° С, необходимо присутствие в стали около 20% вольфрама, от 3 до 5% хрома и около 1% ванадия. Но ошибкой было бы думать, что только наличность в стали известных примесей в известном процентном содержании достаточна, чтобы сталь от этого приобрела требуемые свойства. Необходима, кроме этого, соответствующая химическому составу и назначению стали термическая обработка ее, и это правило, без исключения, надо распространить на все решительно специальные сорта стали. Так, необработанная термически сталь для магнитов окажется весьма непостоянной и после намагничивания начнет быстро терять свои магнитные свойства; сталь с 13—14% Mn без надлежащей термической обработки или износится гораздо быстрее, или же сломается во время работы; наконец, резец из самой лучшей по составу вольфрамо-хромо-ванадиевой стали, не будучи термически обработан, окажется не в состоянии снимать стружку не только в нагретом состоянии, но и на холоду.

Плохое знакомство с новыми сортами специальной стали лиц, пожелавших применить их для практических целей, делало иногда плохую рекламу этим сортам. Приложив к ним старую и, притом, часто плохую мерку, начали употреблять их в дело прямо в сыром, кованом или катаном виде, рассчитывая на чудесное действие присутствующих примесей; при этом наталкивались неминуемо на целый ряд неожиданностей в виде поломок или значительных расходов в связи с большим браком, не окупающихся получаемыми преимуществами, к тому же ничтожными, в механических свойствах. В действительности же дело объяснялось просто тем, что новые сорта стали оказались более чувствительными

к условиям отливки и дальнейших механических и термических операций, чем обыкновенные углеродистые; поэтому в том виде, в каком они выходили из всех означенных операций, неправильно выполнявшихся, они несли в себе много явных и еще больше скрытых недостатков. В первоначальном обращении со специальными сортами стали чувствительнее всего сказались результаты научной неподготовленности практических заводских деятелей. При применении же правильных методов обращения со специальными сортами стали все преимущества последних перед углеродистыми выступают очень рельефно, что будет показано ниже на ряде примеров из практики.

В настоящее время можно считать несомненным, что правильной практической постановкой термической обработки, а также быстрым прогрессом в применении специальных сортов стали техника больше всего обязана научной металлографии в современных формах ее развития. Богатый внутренний мир стали, изменчивый под влиянием весьма разнообразных факторов, изучен в совершенстве при посредстве микроскопа. Я не буду входить в рассмотрение того, как структура стали постепенно завоевывала внимание техники и оживляла сталь в руках изучавших ее практических деятелей. Микроскоп разложил постепенно сталь на составные части — элементы структуры, и наглядно выявил способность их группироваться, видоизменяться и превращаться по определенным законам в гармоническом согласовании с химическим составом, температурой и рядом других факторов. Учение о прямых и обратных превращениях в стали в функции температуры и времени — при посредстве пирометра, послужило прочным фундаментом для постройки на нем теории термической обработки. Идея наиболее совершенной в механическом смысле утилизации стали определенного химического состава казалась близкой к осуществлению в жизни, так как она естественно вытекала из идеи получения наиболее совершенной в механическом смысле структуры. Связь механических свойств стали со строением ее казалась не менее естественной, чем связь их с химическим составом. Когда же практически пожелали установить эту связь, т. е. воспользоваться структурным методом оценки механических свойств, то встретились со случаями, когда этот метод оказывался ненадежным и не давал достаточных гарантий точности. Особенно это чувствовалось тогда, когда сталь в виде некоторого объема должна была сопротивляться динамическим усилиям и силам, прилагаемым к этому объему в разных направлениях. Этим объясняется, между прочим, тот факт, что до настоящего времени структурный метод испытания стали не получил достаточного спроса и распространения. Причину такому явлению я вижу в увлечении преимущественно микроструктурой или строением точки. Металлография до последнего времени имела дело исключительно с большими увеличениями структуры, наблюдаемыми при посредстве микроскопа. Естественно, что в поле зрения микроскопа попадает очень

незначительная площадь шлифа стали — одна точка ее. Строение такой точки, однообразное в пределах данной точки, и одинаковое со строением других точек той же площади, давало право исследователям считать строение объема стали как-будто однородным, вполне одинаковым со строением любой точки его. Однако, такое представление о строении стали, взятой в определенном объеме, оказалось односторонним и несоответствующим действительности. Отрешившись на время от больших увеличений и рассматривая строение стали невооруженным глазом или при помощи лупы, т. е. изучая строение объема стали в целом, пришлось скоро убедиться в том, что сталь, кроме микроскопического строения или строения точки, имеет еще макроскопическое строение или строение объема, отнюдь не одинаковое с первым и, вместе с тем, типичное для всех сортов стали. Значение этой новой структуры, или макроструктуры стали, при оценке механических свойств последней оказалось не менее существенным, чем значение микроскопического строения.

С чувством глубокого удовлетворения я могу высказать сейчас следующее в высшей степени важное положение, являющееся результатом разработки и приложения к практике метода макроскопического исследования стали: давнишнее стремление связать механические свойства стали с ее строением получило в настоящее время практическое осуществление. В связи с этим стремление получить наиболее совершенные в механическом смысле микро- и макроструктуру уже не кажется чем-то нереальным и приобретает глубокий практический смысл. Это стремление станет близким к благоприятному разрешению тогда, когда в практическую жизнь начнут строго и неуклонно проводиться принципы сознательной и теоретически обоснованной термической обработки наравне с разумно поставленной и с практическим назначением изделий согласованной механической обработкой в горячем состоянии. Ибо первая, как будет ясно из дальнейшего изложения, ведет к получению наиболее совершенной микроструктуры, а вторая — к получению наиболее совершенной макроструктуры. А из совмещения обеих наиболее совершенных структур легко родится наиболее совершенное по механическим свойствам изделие.

VII

В вопросе извлечения из стали определенного состава и определенной подготовки наибольшей полезной работы путем термической обработки нельзя пройти молчанием мимо весьма важного вопроса — о внутренних напряжениях в стали, так как он тесно связан с улучшением механических свойств наших изделий. Под внутренними напряжениями надо понимать такие, которые существуют в металле изделий в его спокойном состоянии, т. е. и тогда, когда внешние силы на него не действуют. При деймствии же внешних сил они проявляются вредным или полезным

образом. Примеров наглядного проявления вредных напряжений очень много: все внезапные поломки без видимых причин, отделение кусков от изделий, отскакивание частей изделий с большой силой на некоторое расстояние и т. п. явления, сопровождающиеся самопроизвольным разрушением или деформированием изделий, помимо участия внешних сил. Наименее желательны вследствие представляемой ими опасности те напряжения, которые являются вредными для работы изделий, но не проявляются видимым образом. Развитие в изделиях полезных напряжений — одна из благодарных задач закалки стали. Путь, каким может быть достигнута эта цель, лежит в изучении и научной постановке закалки. Если отжиг имеет главнейшим своим назначением уничтожение вредных напряжений, возникающих в стали при ее остывании после отливки или горячей механической обработки, а нередко и после наклепа в холодном состоянии, то закалка, с другой стороны, с последующим за ней отпуском способна увеличить запас полезной работы, заключенный в металле в виде скрытой энергии вещества.

Отсюда понятно, что отжиг не в состоянии повысить механические свойства стали, как закалка с последующим отпуском. Правильно примененный отжиг предохраняет изделие от случайных поломок и деформаций, уничтожая существовавшие вредные напряжения, предрасположение к излишней хрупкости. Вместе с тем отжиг делает сталь мягкой, способной деформироваться на холоду под влиянием внешних сил, что весьма важно при работах по загибке или штамповке и, вообще, по приданию стали формы изделия в холодном состоянии механическими средствами (резанием, строганием, сверлением и т. д.). Влияние отжига на структуру стали определяется тем, что эта операция приводит металл к состоянию физико-химического и даже полного структурного равновесия, при котором отдельные структурные элементы стремятся к полной дифференциации в виде совершенно обособленных составляющих.

Известно, что микроструктура отожженной углеродистой стали должна выражаться элементами структуры — ферритом и цементитом, как результатом полного распадения твердого раствора углерода в железе при медленном охлаждении. Известно также, что с различными возможными группировками этих элементов структуры связаны колебания в механических свойствах стали: так, например, крупнопластинчатый перлит, большие скопления феррита и цементита понижают динамическую прочность стали (я имею в виду общеизвестное явление перегрева стали). Задачей же правильного отжига является осуществление структурного равновесия, т. е. наиболее совершенное обособление феррита и цементита.

Итак, имея углеродистую сталь различного состава, можно ее привести к состоянию, при котором строение ее будет выражаться равномерным или близким к равномерному распределением зерен

цементита большей или меньшей величины на фоне феррита. В табл. 2 и 3 сопоставлены механические свойства различных сортов углеродистой стали, приведенных к состоянию физико-химического и структурного равновесия, со свойствами этих же сортов стали в сыром виде или при неправильном отжиге.

Таблица 2

Влияние отжига на свойства доэвтектоидной стали

Химический состав в %					Предел упругости в кг/мм²	Временное сопротивление в кг/мм²	Относительное удлинение в %	Сжатие в %	Качество отжига
C	Si	Mn	S	P					
0,32	0,39	0,76	0,013	0,041	34,1 36,4	56,5 62,9	21,6 18,6	58,0 46,4	Правильный отжиг Неправильный отжиг
0,40	0,23	0,55	0,015	0,038	27,7 29,4	51,8 56,6	21,6 19,1	55,0 42,9	Правильный отжиг Неправильный отжиг
0,40	0,30	0,74	0,023	0,038	31,6	54,4	21,5	54,8	Правильный отжиг
0,50	0,20	0,90	0,017	0,047	31,2 34,1	58,4 70,0	18,1 16,6	50,4 37,9	Правильный отжиг Неправильный отжиг

В общем можно высказать следующие положения о влиянии правильного отжига на сталь:

1. Осуществление правильного отжига требует осуществления структурного равновесия, т. е. наиболее совершенного обособления феррита и цементита.

2. Факторами, способствующими осуществлению структурного равновесия, являются: температура нагрева, продолжительность нагревания и скорость охлаждения — в гармоническом сочетании.

3. Наиболее легко осуществляется структурное равновесие в стали эвтектоидной, труднее — в заэвтектоидной и еще труднее — в доэвтектоидной.

4. Правильным отжигом достигается:

а) понижение предела упругости, т. е. способность легко деформироваться;

б) повышение сжатия поперечного сечения, т. е. увеличение степени деформирования без разрушения, или увеличение динамической прочности.

5. Правильный отжиг в значительной мере уравнивает в механическом смысле сталь с различным содержанием углерода.

Таблица 3

Влияние отжига на свойства заэвтектоидной стали

Химический состав в %					Предел упругости в кг/мм²	Временное сопротивление в кг/мм²	Относительное удлинение в %	Сжатие в %	Условия отжига
C	Si	Mn	S	P					
0,85	0,12	0,41	Следы	0,015	44,0	95,0	8,1	13,7	После прокатки (сырой материал)
					38,6	64,0	22,1	55,6	Нагрев до 750° С с медл. охл. (по 10° в 1 час до 630°).
					35,5	64,5	22,8	38,6	„ „ 820° С „ „ „ „ „ „ „ „ „ „
					37,0	67,0	15,7	25,0	„ „ 840° С „ „ „ „ „ „ „ „ „ „
					35,1	83,6	7,4	11,1	„ „ 850° С с выдержкой 2 час. и медленным охлаждением
					36,9	84,6	5,2	13,1	Нагрев до 920° С с медленным охлаждением (по 10° в 1 час до 630°)
1,05	0,29	0,36	Следы	0,025	54,0	100,0	8,1	7,7	После прокатки (сырой материал)
					41,2	70,6	10,8	22,6	Нагрев до 750° С с медл. охл. (по 10° в 1 час до 630°)
					37,5	68,0	15,0	42,5	„ „ 820° С „ „ „ „ „ „ „ „ „ „
					43,6	69,1	14,9	26,8	„ „ 840° С „ „ „ „ „ „ „ „ „ „
					34,5	81,9	9,1	12,7	„ „ 850° С выдержкой 2 час и медленным охлаждением
					39,2	80,5	7,6	9,4	„ „ 920° С с медленным охлаждением

Специальная сталь в отожженном состоянии сплошь и рядом не обладает особенными преимуществами перед углеродистой, обнаруживая большую мягкость и сравнительно невысокие упругие и динамические свойства, так как все ее наиболее ценные качества выявляются лишь после закалки и отпуска.

Закалка, в противоположность отжигу, чрезвычайно резко изменяет картину свойств стали. В закаленном состоянии сталь приобретает большую твердость, способность резать стекло, но зато обладает подчас и весьма значительной хрупкостью и мало пригодна по этой причине в таком состоянии для дела. Благодаря приобретению сталью хрупкости умаляется сильно значение закалки как самодовлеющей операции, и является необходимость применения отпуска к закаленным изделиям. Яркий пример в этом отношении представляет закаленный инструмент, если его пустить в работу, не применив к нему операции отпуска. Между тем, выкрашиванию различных частей в инструментах как результату применения к ним только одной операции—закалки (нередко и без предварительного, крайне необходимого, отжига),— часто придается совершенно неправильное толкование. В нем видят или плохое качество материала, или плохую закалку. Между тем и качество металла, и закалка могут быть вполне безукоризненны, а причину следует искать в неприменении или плохом применении к закаленному инструменту весьма важной термической операции — отпуска.

Отчего зависит свойство стали принимать закалку и каким законам оно подчиняется? Как известно, каждому сорту углеродистой стали соответствует определенная критическая точка, т е. температура, при которой в стали совершается превращение с поглощением тепла при нагревании и с выделением тепла при охлаждении. Это превращение, как большинство химических превращений, происходит с более или менее значительными запаздываниями в зависимости от быстроты изменения температур и некоторых других обстоятельств. При нагревании превращение происходит выше 700° С, например, в пределах 730—775° С, в зависимости от быстроты нагревания и содержания углерода, а при охлаждении, наоборот, — ниже 700° С. Скорость, с которой совершается это превращение при данной температуре, управляется законом общим, вообще, для химических явлений. А именно, эта скорость тем больше:

1) чем рассматриваемая абсолютная температура выше и

2) чем температура более удалена от точки превращения.

Скорость превращения растет очень быстро с температурой, и поэтому практически невозможно нагреть сталь значительно выше точки превращения без того, чтобы превращение не завершилось. При охлаждении скорость превращения, равная нулю непосредственно вблизи точки превращения, сначала растет, переходит через максимум, потом снова уменьшается, приближаясь

к нулю при очень низких температурах. Величина и положение этого максимума изменяются в зависимости от очень многих обстоятельств.

Этим свойством, присущим не только углеродистой стали, но еще в значительно большей мере специальной стали, пользуются широко при закалке последней. Охлаждая сталь быстрым погружением в воду или в другую подходящую охлаждающую среду, ее приводят через очень короткий промежуток времени к низким температурам, при которых никакие превращения больше не возможны.

Быстрое охлаждение как бы фиксирует (хотя и не вполне) состояние стали, в условиях выше точки превращения совершенно отличное от ее равновесного состояния при обыкновенных или довольно низких температурах.

Явления закалки относятся к случаям так называемого ложного равновесия, т. е. такого состояния материальной системы, когда отсутствие каких-либо изменений или превращений в системе обусловливается не тем, что внутренние силы системы находятся в равновесии с внешними условиями, но, наоборот, тем, что при данных внешних условиях превращения вообще не могут совершаться ни в прямом, ни в обратном направлениях. По отношению к физическим и химическим превращениям такому условию удовлетворяют системы, находящиеся ниже температуры начала превращения и обладающие наибольшим возможным запасом энергии. Все такие системы характеризуются тем, что перейти к состоянию истинного равновесия они могут только после того, как в них произойдет экзотермическое превращение (с выделением тепла), которое совершается с большей или меньшей быстротой, как только система будет нагрета до температуры начала превращения. Перейдя через последнюю температуру, система становится снова устойчивой, подчиняясь общему закону Ле-Шателье—Вант-Гоффа об обратимых физико-химических процессах.

Одним из способов для получения металлических систем в состоянии ложного равновесия является быстрое охлаждение их через интервал критических точек. Этот способ основывается на том, что всякое превращение совершается в материальной системе отнюдь не мгновенно, а с некоторой скоростью, иногда и не особенно большой. Поэтому, если охлаждение массы произвести с быстротой, превышающей скорость превращения, то, по крайней мере, часть вещества не успеет подвергнуться превращению, и система по охлаждении окажется в состоянии ложного неустойчивого равновесия. Частным случаем получения системы в состоянии ложного равновесия является закалка в собственном смысле этого слова, сообщающая многим металлическим сплавам и среди них, прежде всего, стали ряд определенных физических и механических свойств, весьма ценных для техники.

В какой мере изменяются различные механические свойства углеродистой стали при ее закалке показывают цифры испытаний

ба разрыв, приводимые в табл. 4 (по данным Бринеля и Вальнерта [1]).

Закалка углеродистой стали приводит к результатам, подобным тем, которые приведены в табл. 4 только в частных случаях изделий, имеющих сравнительно небольшую массу или небольшие поперечные сечения, или в случаях изделий больших масс и больших сечений, но с выступающими тонкими работающими частями или поверхностными слоями, как это имеет место, например, в сверлах, резцах, фрезерах, ножах, напильниках, метчиках, косах, топорах, молотках и т. п. Во всех же тех случаях, когда в сопротивлении механическим силам должны участвовать большие сечения, большие массы, применение закалки уже не может оказать подобного действия (см. табл. 5). Закалка в этих случаях способна значительно повысить механические свойства только поверхностных слоев, и то на незначительную глубину, тем меньшую, чем больше сечение и масса закаливаемого изделия.

В своем механическом влиянии на более глубокие и центральные слои металла закалка может быть скорее уподоблена нормальному отжигу и в этом смысле иногда применяется с успехом (закалка в масле поковок и крупных черновых изделий).

Таблица 4

Влияние закалки на свойства углеродистой стали

Химический состав в %			Механические свойства [2]									
			Закалка в воде при 750° С					Закалка в воде при 850° С				
C	Si	Mn	σ_p в кг/мм²	σ_s в кг/мм²	σ_b в кг/мм²	δ в %	ψ в %	σ_p в кг/мм²	σ_s в кг/мм²	σ_b в кг/мм²	δ в %	ψ в %
0,09	0,005	0,10	13,8	33,5	56,4	15,6	54,0	17,9	41,9	61,8	15,8	65,5
0,25	0,30	0,41	15,7	36,2	58,8	19,6	53,3	15,8	41,6	73,4	5,8	14,3
0,34	0,27	0,49	15,7	40,3	61,8	19,2	51,7	17,7	47,3	90,7	1,3	4,1
0,44	0,28	0,46	19,7	35,4	55,5	17,5	41,1	13,8	57,4	87,9	0,3	2,5
0,65	0,28	0,49	23,6	41,7	85,7	13,2	21,8	—	—	—	—	—
0,79	0,38	0,20	17,8	43,3	91,6	11,5	16,8	—	—	—	—	—
0,94	0,29	0,25	31,5	49,2	99,4	6,2	12,7	35,5	—	96,1	0	0
1,17	0,31	0,21	25,6	53,2	100,4	4,9	6,3	—	—	—	—	—

Способность стали принимать закалку на значительную глубину сообщает ей присутствие некоторых специальных примесей, как, например, Cr, Mn, Ni и др., а также одновременное присутствие

[1] Etude sur les propriétés mécaniques des aciers, 1901.
[2] Механические свойства даны в современных обозначениях. (*Ред.*).

Таблица 5

Влияние массы (сечения) при закалке углеродистой стали

№ образца	Место взятия образца для испытания	Испытание на разрыв: Предел упругости в $кг/мм^2$			Временное сопротивление в $кг/мм^2$			Сжатие в %			Примечание
		А	Б	В	А		В	А	Б	В	
1	У периферии .	47	47	56,5	70	73	83,5	64	59	58	Образцы вырезаны из термически обработанных цилиндров таким образом, что вертикальные оси всех образцов проходят через один и тот же диаметр цилиндра
2	Промежуточный слой	39	39	50	66	68	83	56	59	56	
3	Из центра . .	39	39	47	64,5	66	80	55	59	54	

Сорт стали	Химический состав в %					Условия термической обработки стали
	C	Si	Mn	S	P	
А	0,28	0,68	0,95	0,023	0,035	Исходный материал (три цилиндра) был подвергнут закалке в воде при температуре 780° С и затем отпуску до 650° С Размеры закаливавшихся цилиндров стали: диаметр = 100 *мм*, высота = 300 *мм*.
Б	0,40	0,55	0,77	0,022	0,047	
В	0,44	0,48	0,67	0,024	0,044	

нескольких из них. Наиболее резко это сказывается при достаточно высоком содержании специальных примесей, когда сталь становится самозакаливающейся, т. е. приобретает свойства закаленной стали при не особенно быстром охлаждении. Поэтому применение в машиностроении специальных сортов стали дает возможность полнее использовать ценные свойства закалки в случае больших объемов (см. табл. 6 — *ред.*).

За закалкой обычно следует отпуск как последняя термическая операция, сообщающая большинству изделий требуемые в готовом виде механические свойства. Сталь только после закалки, за немногими исключениями, непригодна для службы в изделиях по своей хрупкости и, следовательно, операция закалки, весьма важная сама по себе, не далает метериал непосредственно годным для службы. Среди различных операций, применяемых при термической обработке изделий, отпуск является наиболее деликатной и ответственной. Так, например, пределы температур, при которых достигается наилучшая закалка или наилучший отжиг, в большинстве случаев не настолько ничтожно малы, как при отпуске, при котором не только необходимо держаться чрезвычайно узких границ температуры, но и продолжительность действия соответствующей температуры имеет первенствующее значение. Современная техника в весьма широких пределах пользуется услугами этих двух взаимно связанных термических операций, дающих возможность столь гибкий по своей природе материал — сталь — заставить служить, удовлетворяя самым разнообразным, казалось бы мало совместимым друг с другом, качествам, какими одновременно должны обладать части машин, сооружений и изделий. Для того чтобы подчинить сталь вполне своей воле, металлургу необходимо уметь обращаться с операциями закалки и отпуска; последние же требуют основательного знакомства с физико-химической и технической сторонами соответствующих процессов — закалки и отпуска. Между тем, научная разработка вопросов, связанных с закалкой и отпуском стали, началась только с недавнего времени, а так как только то надежно, что научно обосновано, то никто, очевидно, не может считать себя во всеоружии знания, когда имеет дело с недостаточно пока освещенными в научном отношении термическими операциями.

Однако и при отсутствии исчерпывающих данных о механизме закалки и отпуска стали, более доступный изучению вопрос о физических и механических свойствах закаленной и затем отпущенной стали в настоящее время можно считать достаточно выясненным в теоретическом и практическом отношениях.

Влияние отпуска, в зависимости от его продолжительности при различных температурах, выражается, вообще говоря, в следующем:

1. Влияние времени при отпуске выражается в сравнительно быстром уменьшении предела упругости и временного сопротивления стали в начале выдержки.

Таблица 6

Влияние массы (сечения) при закалке специальной стали

№ образца	Место взятия образца для испытания	Испытание на разрыв: Предел упругости в *кг/мм²*			Временное сопротивление в *кг/мм²*			Сжатие в %			Примечание
		А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В	
1	У периферии . . .	79	81	84	97	99,5	102	53	42	46	Образцы вырезаны из термически обработанных цилиндров таким образом, что вертикальные оси всех их проходят через один и тот же диаметр цилиндра. Диаметр цилиндра = 150 *мм* Высота цилиндра = 450 „
2	Ближе к центру . .	73	76	81	94	96	101	50	49	44	
3	Еще ближе к центру	66	69	69	95	95	104	50	42	34	
4	Из центра	62	64	—	92	96	102	44	38	38	
5	Как образец № 3 .	65	71	69	93,5	95,5	103	46	40	31	
6	Как образец № 2 .	72	77	80	94	94	101	51	46	45	
7	У периферии .	78	82	85	97	100	102	53	51	44	
	Из центра	77	80,5	81	94,5	98,5	99,5	57	1	5	Образец приготовлен из термически обработанного прутка диаметром 30 *мм* и высотой 180 *мм*

Сорт стали	Химический состав в %							Условия термической обработки стали
	C	Si	Ni	Cr	Mn	S	P	
А	0,32	1,67	2,98	0,56	0,33	0,011	0,020	Исходный материал (три цилиндра и три прутка) был подвергнут закалке в воде при температуре 770° С и затем отпуску до 680° С
Б	0,40	1,67	2,92	0,61	0,33	0,012	0,020	
В	0,47	1,67	2,64	0,62	0,30	0,015	0,021	

2. Скорость падения означенных величин, постепенно убывая, приближается к нулю при вполне определенной, повидимому, продолжительности для каждой температуры отпуска.

3. Период времени, в течение которого достигается предел изменения механических свойств, тем незначительнее, чем выше температура отпуска.

4. Действие продолжительности нагревания при отпуске сказывается тем интенсивнее в отношении понижения предела упругости и временного сопротивления стали, чем температура отпуска выше.

5. Относительное сжатие при различной продолжительности отпуска для одной и той же температуры останется постоянным.

По имеющимся цифровым данным можно придти и к некоторым другим весьма важным и чрезвычайно интересным заключениям, выясняющим роль и значение различных механических величин при оценке свойств закаленной и затем отпущенной стали:

1. Действие отпуска при увеличении его продолжительности при постоянной температуре характеризуется изменением предела упругости (текучести) и временного сопротивления при постоянном относительном сжатии.

2. Скорость падения предела упругости (текучести) и временного сопротивления при постоянной температуре отпуска и увеличивающейся продолжительности нагревания, постепенно уменьшаясь, приближается к нулю при определенной, повидимому, продолжительности для каждой температуры отпуска. Как на первое приближение можно указать на предельные продолжительности отпуска для нескольких температур:

Для 400° С — 48 час.
„ 525° С — 24 „
„ 600° С — 16 „
„ 680° С — 10 „

3. Действие отпуска с повышением температуры при постоянной продолжительности характеризуется уменьшением предела упругости (текучести) и временного сопротивления для всех сортов стали, причем изменение механических свойств пропорционально температуре отпуска до 600° С.

4. Повышение температуры отпуска вызывает сильное уменьшение твердости для всех сортов стали, пропорциональное температуре внутри определенного температурного интервала.

Принимая во внимание, что отношение временного сопротивления к числу твердости сохраняет более постоянное значение, чем отношение предела упругости (текучести) к числу твердости, и что предел текучести изменяется под влиянием отпуска быстрее временного сопротивления, можно сделать вывод, что предел текучести характеризует влияние отпуска в большей степени, чем число твердости Бринеля.

Что же касается изменения микроструктуры закаленной стали при отпуске, то последнее характеризуется закономерным обособлением феррита и цементита из распавшегося твердого раствора углерода в железе. Процесс этот идет до конца при повышении температуры отпуска почти до приближения к критической точке стали, для всех же прочих более низких температур отпуска— ограничен определенным пределом, достигаемым с увеличением продолжительности нагревания.

VIII

Ознакомившись в кратких чертах с отличительными особенностями каждой из тепловых операций, из совокупности которых слагается термическая обработка металлов, в частности — стали, обратимся теперь к общему рассмотрению значения термической обработки стали в целом, руководствуясь высказанными выше соображениями.

Каждая тепловая операция, из совокупности которых слагается термическая обработка стали, состоит, как известно, из двух элементов — нагревания и охлаждения, причем условия и характер того и другого, как, например, температура и скорость охлаждения, меняются с основным характером операции и целым рядом других обстоятельств, среди которых индивидуальные особенности стали, т. е. ее химический состав, масса, форма куска и пр., имеют большое значение. Этими же обстоятельствами определяются в известной мере и внешние условия или обстановка термической обработки, которую составляют: нагревательные приборы — печи для осуществления нагревания стали, охладительные приспособления — баки или ванны, различная охлаждающая среда — воздух, масло, вода и измерительные приборы, пирометры, контролирующие температуру, а иногда и регулирующие ее, и, наконец, различные технические приспособления и вспомогательные устройства применительно к особым условиям работы, имеющим место в каждом частном случае.

В связи с назначением стали после соответствующей термической обработки производится проверка тех свойств ее, которые необходимы для выполнения ею своего назначения, путем установленных методов и приемов испытания. Среди последних общеизвестны механические испытания, химический анализ, магнитные испытания, определения электропроводности, удельного веса, коэфициентов расширения, теплопроводности и других.

С того времени, как строение стали сделалось доступным непосредственному наблюдению методом микро- и макроскопическим и была установлена закономерная связь строения с температурой, испытание различных свойств стали получило значение для установления связи этих свойств со строением. Как и можно было ожидать, связь оказалась самая тесная, почему вышеуказанные методы испытания получили большое распространение

наравне с микроскопическими и термическими (пирометрическими) при разрешении вопросов, связанных с оценкой результатов термической обработки. Ввиду этого значение термической обработки с точки зрения ее пользы и необходимости лучше всего иллюстрировать несколькими наглядными примерами из заводской практики.

Во многих случаях осуществление требуемой конструкцией формы изделия или достижение ее в более чистом виде связано самым тесным образом с термической обработкой, преимущественно с отжигом. Например, многие работы по загибке, холодной штамповке и прочие требуют предварительного приведения стали в такое состояние в отношении ее внутреннего строения, при котором соответствующие механические операции делаются выполнимыми наиболее легким, простым и надежным способом. Так, при изготовлении резьбовых калибров иногда нельзя нарезать резьбу чисто без рванин и зазубрин только из-за того, что перед этим заготовка для калибра недостаточно хорошо была отожжена. После надлежащего отжига той же заготовки резьба на калибре нарезается чисто и без всяких затруднений.

Подвергая термической обработке углеродистую сталь средней твердости, можно значительно повысить предел упругости и сжатие поперечного сечения данной стали, чем обеспечивается большая динамическая прочность и вязкость ее при одинаковых с необработанной термически сталью временном сопротивлении и относительном удлинении. Это, имеющее весьма существенное значение, обстоятельство явилось лучшим доводом в пользу применения термической обработки к некоторым очень ответственным изделиям массового производства, для которых механические свойства материала в сыром виде, непосредственно после штамповки и т. п. горячей обработки их не гарантируют требуемой от изделия прочности и механической однородности валовых партий. Различие механических свойств углеродистой стали трех составов до и после термической обработки, заключавшейся в закалке в воде и последующем высоком отпуске (до 650° С), резко выявляется в нижеследующих данных табл. 7.

Преимущества, которые дает термическая обработка, особенно рельефно выявляются при применении ее по отношению к специальной стали. От многих изделий специального назначения, например, магнитов и режущих инструментов, требуются особые свойства (постоянная напряженность магнитного поля, сохранение режущей способности в нагретом состоянии и т. д.), получить которые без применения стали, содержащей специальные примеси в известных количественных соотношениях, невозможно. Однако наличием в стали тех или иных специальных примесей в определенных дозах обеспечивается только возможность получения нужных свойств от соответствующей стали, но никак не самые свойства. Для того чтобы получить эти свойства, необходимо сталь, заключающую в себе требуемые примеси, еще правильно термически обработать. Таким образом, сталь, пригодная для

Таблица 7

Влияние термической обработки на углеродистую сталь, механически обработанную штамповкой в нагретом состоянии

Химический состав и термическая обработка / Механические свойства	0,35% C; 0,40% Si; 0,90% Mn; 0,024% S; 0,054% P		0,48% C; 0,57% Si; 0,83% Mn; 0,027% S; 0,080% P		0,52% C; 0,52% Si; 1,00% Mn; 0,026% S; 0,067% P	
	A Охлаждение на воздухе после штамповки	B Закалка при 800° в воде и отпуск при 600° C	A Охлаждение на воздухе после штамповки	B Закалка при 760° C в воде и отпуск при 650° C	A Охлаждение на воздухе после штамповки	B Закалка при 760° в воде и отпуск при 600° C
Предел упругости в *кг/мм²*	40,7	64,4	47,6	67,8	53,0	93,0
Временное сопротивление в *кг/мм²*	78,0	77,6	88,9	88,9	104,6	105,1
Относительное удлинение в %	18,0	17,4	18,2	17,6	12,7	12,7
Сжатие в %	39,9	65,5	34,3	52,9	19,0	42,0

Таблица 8

Влияние термической обработки на углеродистую и специальную сталь

Сталь	Щит	Обработка	Толщина щита в *мм*	Дистанция, с которой испытан щит	Результаты испытания	
					Характер разрушения	Выпучина в *мм*
Углеродистая	A	Без обработки	13,7	36 *м* или 50 шагов	Не пробит	7
	B	Термическая обработка	13,7		Не пробит	3
Специальная	C	Без обработки	10,0	36 *м* или 50 шагов	Сквозная дыра	—
	D	Термическая обработка	6,9		Не пробит	2

магнитов по своему химическому составу, даст действительно доброкачественные постоянные магниты только лишь после надлежащей термической обработки, сталь быстрорежущая по составу сделается быстрорежущей на самом деле, т. е. способной в виде изделия соответствующей формы сохранить свою режущую поверхность непритупленной при достаточно больших скоростях резания — также лишь после определенной термической обработки, в противном же случае она и при обыкновенных скоростях и температурах откажется резать. Одним словом, возможность извлечь из стали различные свойства как механические, так и физико-химические, находится в несравненно большей зависимости от термической обработки, чем от химического состава.

Хорошей иллюстрацией к только что сказанному могут служить помещенные в табл. 8 результаты испытаний стальных щитов из углеродистой и специальной стали, испытанных стрельбой в термически необработанном состоянии и после правильной для них термической обработки. Применение специальной стали без термической обработки, как видно из табл. 8, не должно иметь места, так как это не только не дает каких-либо преимуществ, а скорее приводит к отрицательным результатам. Этим обстоятельством, между прочим, объясняется сравнительно медленное распространение специальных сортов стали до того момента, когда термическая обработка перестала быть искусством, и быстрее после того, как были открыты научные основания этой отрасли металлургии.

Приведенными примерами далеко не исчерпываются случаи, когда при помощи термической обработки решают вопросы большой практической важности. Но и этих примеров достаточно, чтобы утверждать, что без термической обработки стали техника не только не может обойтись, но что, наоборот, прибегать к помощи термической обработки для улучшения качеств стальных изделий следует гораздо чаще, чем это делают до настоящего времени.

Как я уже указывал выше, теоретически всякое изделие, всякая часть машины, вообще всякий объем стали, участвующий в работе и подверженный действию тех или иных сил, должен быть термически обработан. В стремлении к совершенству, столь естественному для техника, должны быть использованы все средства, и по отношению к объему стали должны быть поэтому применены все операции, которыми он может быть приведен или хотя бы приближен к наиболее совершенному состоянию.

IX

Не менее важной по оказываемому на строение и свойства стали влиянию, чем термическая обработка, является другая операция — механическая горячая обработка (ковка, прокатка), необходимость применения которой к стали давно общепризнана и оценена. Этими обработками, дополняющими одна другую далеко не исчерпывается еще задача улучшения стали. В объеме стали концентри-

руется влияние целого ряда факторов; здесь имеют значение: процесс получения стали в расплавленном виде (в состоянии жидкого раствора), способ отливки, условия затвердевания и остывания объема литой стали, способы и условия деформации объема при горячей механической обработке, отчасти и условия холодной механической обработки объема и поверхностных слоев металла и, наконец, знакомые уже нам условия термической обработки стали. Если на свойствах стали, а стало быть и на строении ее, может отражаться влияние ряда обстоятельств, выяснение значения каждого из них является крайне необходимым. Иначе легко может быть допущена переоценка значения отдельных операций и обработок, отчего может произойти ряд недоразумений, приводящих иногда к нежелательным последствиям. В наименее благоприятных условиях с этой стороны находится именно термическая обработка как последняя в ряду других операций над сталью, после которой объем стали в форме изделия (или части изделия) должен проявить те или другие качества сообразно с назначением последнего. Если объем стали после произведенной над ним термической обработки не проявит нужных качеств или проявляет их не в той степени, какая ожидается, или же, что еще хуже, если при самой термической обработке обнаружатся нежелательные явления (например, коробление, образование трещин и т. п.), то все это обычно относят за счет последней по времени операции, т. е. термической обработки, хотя во многих случаях она меньше всего является причиной этого. Сказанное подтвердим на нескольких примерах.

Известно, что Д. К. Чернов впервые наглядно показал, какое большое значение имеет термическая обработка стали в смысле влияния на изменение строения стали[1].

Основные положения, высказанные Д. К. Черновым еще в 1868 г., явились краеугольным камнем, на котором впоследствии укрепилось настоящее учение об обращении со сталью при высоких температурах. Правильность своих теоретических взглядов и умозаключений Д. К. Чернов подтвердил и практически, производя термическую обработку по своему способу 40-фунтовых орудий, изготовлявшихся Обуховским заводом. После этой обработки по способу Д. К. Чернова, орудия, признанные до того негодными по своим механическим качествам, оказались настолько прочными, что выдерживали безукоризненно весьма тяжелые испытания. Однако в связи с этими результатами применения термической обработки для улучшения качеств орудийной стали Д. К. Чернов был склонен несколько умалить значение ковки и вообще механической обработки давлением как операции, могущей также способствовать улучшению механических качеств

---

[1] В статье под названием „Критический обзор статей гг. Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д. К. Чернова исследования по этому же предмету".

стали. Такое умаление значения ковки со стороны авторитетного металлурга, каким являлся для всего мира Д. К. Чернов, несомненно способствовало тому, что во многих случаях термической обработке приписывалось гораздо большее значение, чем она заслуживала того в действительности. В настоящее время не считаться с влиянием ковки и вообще горячей механической обработки на повышение механических свойств стали, конечно, нельзя в виду накопившегося фактического материала. Но зато теперь впадают часто в другую крайность, переоценивая значение механической обработки. Сплошь и рядом предъявляемые требования большой степени механической обработки, под которой понимают отношение площади сечения слитка к площади сечения изделия при изготовлении различных изделий, в особенности значительной массы, являются чрезмерными и, кроме вреда, ничего не приносят делу. Такие ни на чем не основанные требования вытекают из совершенного незнакомства с индивидуальными особенностями слитка как исходного материала для изделия. С этой именно стороны мнение Д. К. Чернова о значении ковки для улучшения механических качеств стали имеет тем не менее ценность как предупреждение от чрезмерного увлечения этой операцией.

Влияние всех перечисленных факторов, как, например, термической обработки, механической обработки давлением и степени механической обработки на сталь особенно рельефно выступает в цифрах механических испытаний соответствующим образом обработанной стали. Помещаемые ниже диаграммы дают наглядное представление о влиянии означенных факторов на углеродистую сталь как в отдельности, так и по совокупности (см. фиг. 3[1]—5. *Ред.*).

В качестве чрезвычайно показательного примера, иллюстрирующего, насколько важно при ковке считаться с индивидуальными особенностями изготовляемого изделия и с качеством материала исходного слитка, приведем следующий. Коленчатая ось, как известно, одна из ответственных частей машины и одна из трудных поковок для кузницы. При изготовлении последней, стремясь получить требуемую форму наиболее простым, быстрым и экономичным образом, прибегают часто к способам, которые понижают прочность стали и вызывают преждевременную поломку изделия во время работы. Коленчатые оси автомобильных и аэропланных двигателей, равно как и коленчатые оси лафетов горных пушек и т. п. чрезвычайно ответственных изделий, должны обладать весьма высокими механическими качествами. Материал готовой коленчатой оси должен удовлетворять высоким требованиям проч-

---

[1] Химический состав сталей, свойства которых представлены на фиг. 3 следующий (в %):

	C	Si	Mn	S	P
Сталь A	0,21	0,17	0,31	0,021	0,035
Сталь B	0,54	0,19	0,15	0,011	0,028
Сталь C	1,33	0,19	0,21	0,012	0,015

(*Прим. ред*).

ности, обладая пределом упругости при растяжении не менее 85—100 *кг/мм*². По этой причине коленчатые оси и валы изготовляются из специальной стали, чаще всего никелевой и хромоникелевой, и подвергаются затем термической обработке с принятием необходимых мер к осуществлению этой операции с наибольшей тщательностью, так как того требует сложная форма изделия. Несмотря на это, будет получаться значительный брак при термической обработке, и неизбежны случаи частых преждевременных поломок при работе соответствующих осей и валов как результат неправильного обращения с материалом при отковке последних и вообще при нерациональном способе ковки.

Подобный случай из практики иллюстрирует фиг. 6, изображающая протравленный на макроструктуру разрез части коленчатой оси, состоящей из трех колен: двух концевых трубчатой формы, в целях облегчения конструкции, т. е. уменьшения веса, и среднего к ним перпендикулярного. Очевидно, наиболее опасным местом в оси является сечение вблизи сгиба. Для получения правого и левого концевых отростков оси берут заготовку прямоугольного сечения и надрубают ее острым ножом с двух сторон в нагретом состоянии в противоположных углах, после чего удаляют надрубленные части, а из оставшегося куска получают поковку. Из последней путем внешней отделки на механических станках получают затем готовую ось; почти совсем отделанную ось подвергают термической обработке, после которой ось требует лишь незначительной окончательной отделки и шлифовки. Необходимость механической обработки на станках до термической обработки вызывается тем, что в термически обработанном состоянии материал оси приобретает слишком большую твердость и трудно поддается обработке инструментом. При таком способе изготовления коленчатых осей — с надрубкой и удалением угловых частей заготовки и с предварительной обточкой центрального колена,—наиболее опасная при термической обработке и во время службы изделия часть оси оказывается и наименее прочной, так как получена из наименее прочных центральных слоев исходной заготовки или слитка.

Пример неудачной поковки в указанном смысле представлен на фиг. 7, изображающей протравленный на макроструктуру разрез оси с ликвационными загрязнениями в наиболее опасных местах.

Недостаточным знакомством со строением и свойствами стали в слитках со стороны практиков кузнечного дела объясняется также и следующий применяющийся нередко способ изготовления многоколенчатых осей и валов для больших судовых машин. Слиток довольно крупного веса проковывают в заготовку плоского сечения, длины, близкой к длине оси. Затем механическими средствами на станке вырезают из заготовки части в шахматном порядке, а в дальнейшем выковывают требуемой формы ось без особых затруднений. Если в небольшой оси, для изготовления которой

берется небольшого сравнительно веса слиток такой прием опасен и чреват нежелательными последствиями при термической обработке (закалке) и работе изделия, то тем более он опасен при получении большого коленчатого вала из слитка крупного веса, центральные слои которого очень рыхлы и механически слабы. Вырезание кусков при поковках, обнажающее и выводящее наружу наименее здоровые части слитка, равно как вообще применение острых ножей, разрезающих металл совершенно не считаясь с расположением волокон в нем, во многих случаях является недопустимым с точки зрения рационального использования материала Практика показала, что коленчатые оси и валы, получаемые из плоских заготовок с вырезанием отдельных частей их, стоят в работе гораздо хуже, чем те же изделия, получаемые горячей штамповкой, при которой цельность наружных поверхностных наиболее здоровых слоев металла не нарушается, обеспечивая большую прочность в самых опасных по форме сечениях.

Отсюда с несомненностью следует, что, получая кусок стали в виде болванки или сырой заготовки, кузнец может из него сделать и прочное и непрочное изделие, — в зависимости от того, как он будет с ним поступать. Термическая обработка часто не в силах уменьшить или уничтожить то зло, которое является результатом невежества кузнеца. В таких случаях только лишь изменением способа ковки можно добиться хороших результатов, т. е. прекращения значительного брака при закалке и увеличения срока службы готовых изделий. Таким образом, необходимо признать, что прочность изделия какой-либо машины, механизма и т. п. с металлургической точки зрения обеспечивается совокупностью целого ряда обстоятельств, и что при несоблюдении одного из них гарантия прочности их сильно понижается. Параллельно с этим понижается и гарантия однообразия в прочности одинаковых частей машины или изделий. Это положение становится особенно важным тогда, когда техника встречается со случаями особо деликатных изделий или частей машин с очень тяжелыми условиями работы. Тогда с наибольшей резкостью и рельефностью проявляются несовершенство методов и способов обращения со сталью, переоценка значения отдельных факторов и обстоятельств и несознательное отношение при решении технической задачи, несмотря на всю важность последней.

X

Изделие, часть машины или сооружения, предназначенные выполнять известную работу, заключают в себе характерные черты тех промежуточных процессов и операций, которыми они создаются. При том разнообразии целей, которым должны служить изделия и части машин, естественно ожидать разнообразия в способах производства их, т. е. в процессах и операциях, их создающих.

Экономические соображения часто требуют упрощения в производствах; высокие требования, предъявляемые часто к изделиям и частям машин в условиях их службы, требуют, наоборот, усложнений в производствах. Техника стремится приноровиться к различным случаям и требованиям практической жизни созданием соответствующего характера и обстановки производства. Упрощения, оправдываемые экономическими соображениями, и усложнения, оправдываемые высокими требованиями спроса, не всегда достигают цели, т. е. не всегда действительно дают экономию и изделия высокого качества. И причин тому много.

Как я уже упомянул, получение изделия в форме окончательного продукта производства требует ряда промежуточных процессов и операций. Руководители последними недостаточно объединены идеей сознательного производства; поэтому каждый из них интересуется производством известных изделий лишь постольку, поскольку оно укладывается в рамки производимых им операций, не устанавливая связи ни с предшествующими, ни с последующими операциями. При таком характере работы, т. е. при отсутствии качественного интереса к изделию, производство не может быть ни достаточно экономичным, ни достаточно надежным, и это справедливо тем в большей степени, что производство в силу предъявляемых к нему требований должно быть более деликатным.

Весь интерес производителя большей частью сводится к тому, чтобы в известный промежуток времени пропустить через определенные операции возможно большее количество соответственных сырых продуктов и, притом, для этой операции создать такую обстановку, при которой это можно осуществить с наименьшими усилиями, расходами и, по возможности, с меньшим техническим контролем. Если понимать производство именно так, мало считаясь с индивидуальными качествами исходных продуктов и с особенными свойствами создаваемых изделий, то нужно быть готовым к тому, что эти особенности одних и свойства других проявятся в наименее желательной форме для производителя, т. е. понизят производительность и качество производства. Необходимо обстановку для операций приноравливать к свойствам и особенностям перерабатываемых продуктов и получаемых изделий, а не наоборот — заставлять последние приспособиться к создаваемой обстановке. Но для этого надо быть хорошо знакомым как с особенностями самых продуктов, так и с тем, в какой зависимости от различного направления известных операций и процессов находятся изменения в качествах и свойствах получаемых промежуточных продуктов производства и окончательных изделий. Это знание приобретается соприкосновением с наукой, непосредственным опытом, поставленным на данных науки, и тесным объединением лиц технического персонала (сталеваров, прокатчиков, кузнецов, механиков и пр.) вокруг идеи осуществления не только количественного, но и качественного производства.

Узкая специализация в пределах определенных технических областей, являясь желательной в видах более быстрого развития этих областей, только тогда может оказаться достаточно продуктивной, когда она энциклопедична, т. е. когда техник-специалист может свободно пользоваться знаниями технических областей, примыкающих к области его специальности — для освещения, обобщения и вообще дальнейшего развития вопросов своей специальности. Объединение техников-специалистов на почве совместного решения одного общего практического вопроса необходимо внесет в производство элемент энциклопедичности, сделав производство более сознательным и надежным. Совместная творческая работа требует объединения в сознании, что быстрый прогресс достигается научной мыслью и широкой постановкой опыта в тесном и постоянном согласовании с результатами научных исследований. Иначе говоря, практический деятель, техник-специалист, должен осуществлять процессы и операции сообразно с тем, как учит вести их современная наука, и совершенствовать их путем широкой постановки разумных опытов. Практическое производство должно быть в то же время большой лабораторией, в которой каждый работник осуществляет задачу, имея дело не с мертвым, а как бы с живым материалом и не уподобляясь автомату. Стремлением к достижению такого идеала должен быть заражен каждый сознательный техник, работая исключительно в пределах своей компентенции, но будучи связан общностью интересов с работниками других специальностей, обслуживающих данное производство.

В частности, при практически правильной постановке термической обработки необходимо знание истории изготовления тех изделий, которые поступают для обработки, т. е. необходимо участие лиц, практически осуществляющих операции термической обработки во всех стадиях изготовления соответствующих изделий. Участие это должно выражаться главным образом в установлении для каждого типа изделий того порядка и способа изготовления, которые наилучшим образом отвечают характеру службы изделия. Это особенно важно при установлении новых производств и при введении новых методов работы по изготовлению тех или иных изделий. В этот период технического творчества, предшествующий периоду многократного массового воспроизведения продуктов этого творчества в валовом однообразном производстве, крайне важно также согласовать интересы производителя и потребителя, т. е. технически наиболее совершенным образом создать изделие, вполне соответствующее своему практическому назначению.

Последнее возможно лишь при условии более тесной технической связи между производителем и потребителем. До настоящего времени связь эта в большинстве случаев ограничивалась техническими условиями, которые ставит потребитель производителю, заказывая ему материал, изделия или, наконец, машину. Прои-

водитель стремился удовлетворить техническим условиям и формально считал свою задачу выполненной, когда это ему удавалось, совершенно не интересуясь вопросом о целесообразности и жизненности тех или иных требований, содержащихся в технических условиях.

Затронутый сейчас вопрос о технических условиях на сталь и изделия из стали является настолько значительным и наболевшим, что на нем необходимо остановиться несколько подробнее и попытаться осветить его во всей широте, так как он самым тесным образом связан с состоянием наших знаний о механических свойствах стали, идущей на изготовление всевозможных изделий. Как известно, прочность изделий непосредственно связана с прочностью тех материалов, из которых они изготовлены. Прочность материала выражается в способности сопротивляться различным силам — статическим и динамическим. В большинстве случаев сопротивляться — значит не давать остающихся деформаций и не разрушаться под действием тех механических сил, влиянию которых подвержены части машин, сооружений и вообще изделий в условиях их работы или службы. Каждому ясно, что остающаяся деформация недопустима там, где между определенными точками в изделии должно сохраняться известное постоянное расстояние, как недопустима поломка таких частей, которые должны выполнять определенную постоянную работу не разрушаясь.

Недеформируемость и неразрушаемость частей изделий в условиях их нормальной работы не исключает, конечно, деформации и разрушения их в условиях ненормальной работы, так как всякий материал, а, следовательно, и всякая часть машины, как бы прочно она ни была сделана, может быть разрушена механическими силами. И весь вопрос заключается лишь в величине этих сил и в способах их приложения. Так, например, столкновение поездов дает наглядную картину разрушения и деформации различных стальных изделий и частей их в условиях ненормальной работы их. Я остановлюсь немного на четырех жертвах столкновения поездов в виду поучительности данного примера. Передо мною четыре одинаковых по размерам колеса (но с таким же результатом могли бы быть четыре оси, бандажа, рельса, паровых котла и пр.), причем каждый из них несет на себе отпечаток разрушительной силы. Из этих четырех колес в результате каждое пострадало, но в неодинаковой степени, а именно:

1) одно разбилось пополам, мало продеформировавшись;
2) другое разбилось пополам, сильно продеформировавшись,
3) третье цело, но сильно деформировано;
4) четвертое цело, но слабо деформировано.

Предстоит решить, которое из этих четырех колес прочнее; иначе говоря — который из четырех однотипных экземпляров надо признать наиболее стойким и прочным на случай нового столкновения поездов. Пока неизвестны условия, в которых упо-

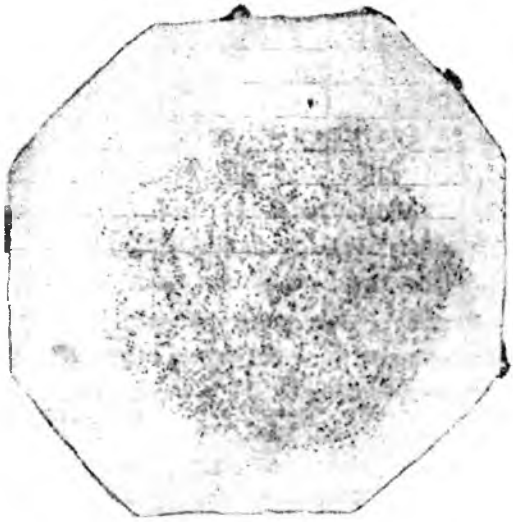
мянутые четыре картины получились, все колеса могут считаться и одинаково прочными и одинаково непрочными. Этим исключается возможность делать заключения на основании одного только внешнего вида пострадавших колес без знания тех условий, при которых изменения наружного вида колес произошли. Для меня совершенно ясно, что все четыре картины можно получить всего с одним колесом или, иначе говоря, с четырьмя одинаковыми во всех отношениях колесами, заставив их работать только в разных условиях. К сожалению, опыт с колесами не может быть осуществлен практически, так как по условиям столкновения поездов явление, как вполне понятно, неповторимо и невоспроизводимо, но зато другой опыт, я думаю, наглядно подтвердит правильность только что сделанного заключения. Если взять тонкий лист самой мягкой стали и выпускать в него пули с различных расстояний, то можно получить следующие картины: с расстояния нескольких шагов пуля будет выштамповывать круглые отверстия в листе, с некоторого расстояния она станет только прорывать лист, образуя при этом большую выпучину, с еще большего расстояния пуля будет вызывать только большую выпучину без всякого прорыва листа и, наконец, с очень большого расстояния станет оставлять лишь небольшой след на листе в виде очень слабой выпучины. Имея рядом, для сравнения, четыре листа мягкой стали с различными на каждом листе следами разрушения в зависимости от разных расстояний обстрела, я позволю себе задать вопрос: который из четырех листов оказался наиболее прочным? Если прочностью считать непробиваемость листа, то можно ответить, что только при известных условиях лист может быть прочным, при других же условиях обстрела лист окажется недостаточно прочным. Подобным же образом решается и вопрос о большей или меньшей прочности колес, различно пострадавших при столкновении поездов вследствие неодинаковой силы удара по отношению к каждому из них.

Этими примерами я хотел показать, что говорить о прочности или о механических свойствах материала применительно к условиям службы его в виде изделий можно лишь заставляя его работать в нормальных условиях. Чрезмерная перегрузка в работе не только не дает возможности делать правильные заключения, а скорее только усложняет и затемняет картину.

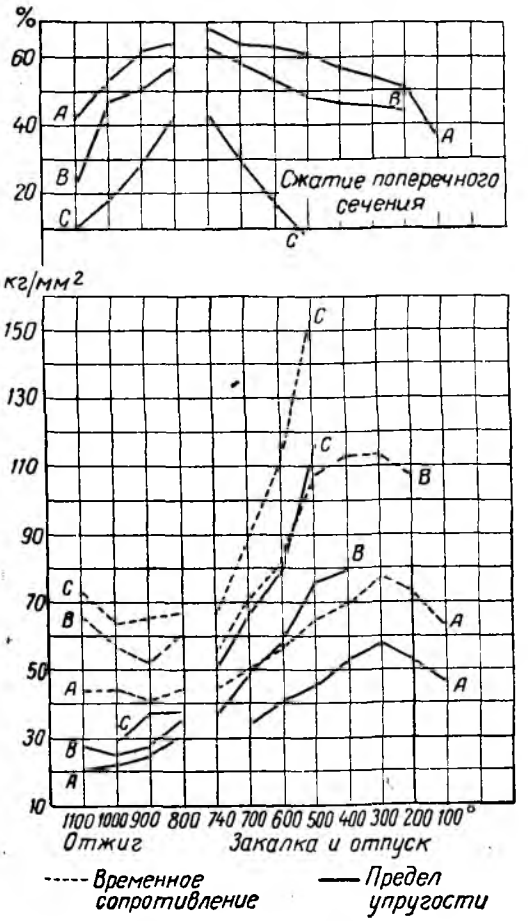
Приведу еще пример. Форма частей изделий, а также и самих изделий в целом, требует часто от стали свойства давать большие остающиеся деформации без разрушения. На этом свойстве основана загибка частей в холодном состоянии, придание выпуклой или вогнутой формы холодной штамповкой и пр. Наоборот, при службе этих же частей и изделий не допускается никаких остающихся деформаций. Совмещение двух прямо противоположных свойств — наибольшей деформации при получении формы и наименьшей деформации во время службы нередко выражается в современных изделиях характерно большим весом их, придавае-

мым исключительно в целях увеличения запаса прочности. Между тем, в таких случаях могла бы быть достигнута значительная экономия в материале надлежащим применением термической обработки стали, а иногда и применением термически обработанной специальной стали, обладающей, смотря по надобности, высокой крепостью, упругостью или вязкостью. Другими словами, гарантия безопасности в виде достаточного запаса прочности изделия может быть получена не за счет увеличения инертной массы изделия, но, что гораздо важнее и удобнее, за счет увеличения полезной работы внутренних сил, благодаря применению термической обработки стали.

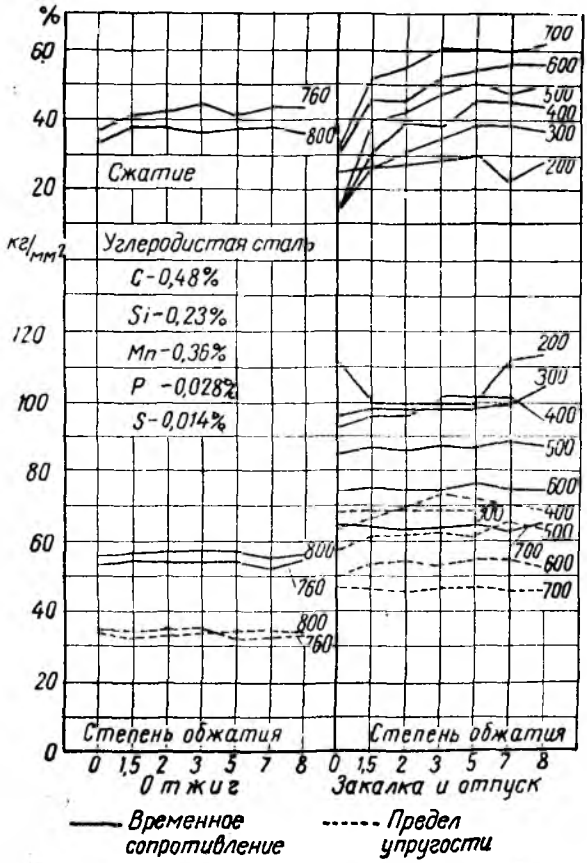
Фиг. 1. $^1/_{10}$ нат. вел.



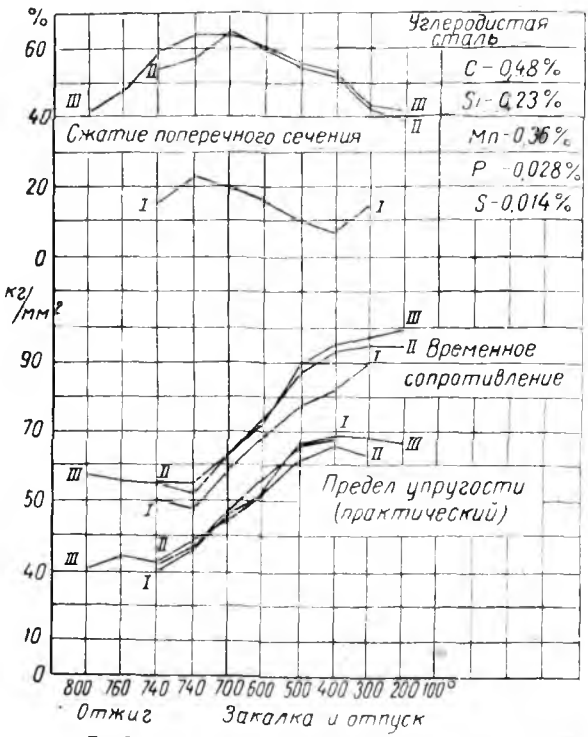
Фиг. 2. $^1/_8$ нат. вел.


%
60
40
20
A
B
C
Сжатие поперечного сечения
кг/мм²
150
130
110
90
70
50
30
10
1100 1000 900 800 740 700 600 500 400 300 200 100°
Отжиг
Закалка и отпуск
Временное сопротивление
Предел упругости

Фиг. 3.



Фиг. 4. Влияние степени механической обработки на свойства стали.



Фиг. 5. Влияние термической обработки на свойства литой и кованой стали.

Фиг. 6. $^{2}/_{3}$ нат. вел.

Фиг. 7. $^{1}/_{3}$ нат. вел.

ПРИМЕЧАНИЯ РЕДАКЦИИ К СТАТЬЯМ Н. И. БЕЛЯЕВА

ПРИМЕЧАНИЯ К СТАТЬЕ „МАКРОСТРУКТУРА СТАЛИ В СВЯЗИ С КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ"

Печатается по тексту, опубликованному в „Журнале Русского металлургического общества" № 1, 1910, стр. 21—38.

ПРИМЕЧАНИЯ К СТАТЬЕ „СТАЛЬ"

1. Печатается по посмертному изданию книги Н. И. Беляева „Сталь Кристаллизация термическая обработка и механические свойства", Научное химико-техническое издательство, Л. 1925.

Здесь приводится I часть и небольшой отрывок II части (остальные главы этой части остались неразысканными) сохранившихся черновых рукописей и отрывков большого труда Н. И. Беляева под названием „Сталь", подготовленного к печати и не найденного в связи со смертью автора. Публикуемые части сочинения Н. И. Беляева даются в редакции акад. Н. Т. Гудцова.

2. Работами советских ученых и, в первую очередь, чл.-корр. АН СССР Я. И. Френкеля и проф. В. И. Данилова выяснена природа жидкости и расплавленных металлов, и тем созданы условия для создания физической теории кристаллизации. Советскими учеными также впервые проведен точный кинетический расчет процесса кристаллизации, правда, при постоянстве скорости образования центров кристаллизации и линейной скорости роста.

Советским ученым акад. А. А. Бочваром на основе работ Д. К. Чернова выяснены основные закономерности наиболее сложного процесса кристаллизации, наблюдаемого в слитках реальных металлических сплавов. А. А. Бочвар также установил ряд закономерностей развития дендритной кристаллизации в сплавах в связи с диаграммой состояния.

3. По мнению выдающегося советского ученого проф. Н. А. Минкевича (Свойства, тепловая обработка и назначение стали и чугуна, Госмашметиздат, ч. I—II, 1932, стр. 84—85), метод прессования по Армэ и др., устраняя полностью или частично усадочную раковину, не уменьшает рыхлости и ликвационной зоны и даже перемещает их ближе к середине.

Поскольку для стали качественной или высококачественной эти дефекты недопустимы, то этот метод практически не применяется.

ПРИМЕЧАНИЯ К КУРСУ ЛЕКЦИЙ „ВВЕДЕНИЕ В ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ"

1. Печатаемая в настоящем сборнике работа Н. И. Беляева „Введение в изучение термической обработки стали" представляет собой запись его лекций, читавшихся в течение ряда лет студентам металлургического отделения Петербургского политехнического института (ныне Ленинградский политехнический институт).

Эта работа почти полностью приводится по книге Н. И. Беляева „Сталь. Кристаллизация, термическая обработка и механические свойства", стр. 45—104, Л. 1925.

2. Подробные исследования в области изучения газов в стали были проделаны в течение последних 15—20 лет чл.-корр. АН СССР А. М. Самариным.

АЛЕКСАНДР ЛЬВОВИЧ БАБОШИН

Александр Львович Бабошин (1872 — 1938 гг.)

А. Л. БАБОШИН (1872—1938)

Девяностые годы прошлого века ознаменовались для России крупным промышленным подъемом. „Промышленный подъем 90-х годов был связан в первую очередь с усиленным железнодорожным строительством. За десятилетие (1890—1900 годы) было выстроено свыше 21 тысячи верст новых железнодорожных путей. Железным дорогам требовалось огромное количество металла (на рельсы, паровозы, вагоны)“. . .[1]

Как и во всяком новом деле, в железнодорожном строительстве появились различные затруднения, в том числе неудовлетворительная стойкость металлических изделий, в особенности рельсов, бандажей и железнодорожных осей. Для борьбы с этими затруднениями при Министерстве путей сообщения была создана, так называемая, Рельсовая комиссия. Кроме того, для исследования свойств металла при Институте инженеров путей сообщения была организована испытательная станция.

По заданию Рельсовой комиссии испытательная станция произвела ряд исследований, направленных к улучшению качества металла, применявшегося для рельсов и других железнодорожных изделий. В числе работ, выполненных с этой целью, общее внимание привлекли исследования молодого талантливого горного инженера А. Л. Бабошина, которому в дальнейшем было суждено стать одним из выдающихся представителей русской школы металлографии и заведующим первой кафедрой по этой специальности в нашей стране.

Александр Львович Бабошин родился 23 ноября 1872 г. на хуторе Титове Богоявленской станицы Донской области. Его отец, по специальности портной, происходил из крестьян Рязанской губернии. Среднее образование Александр Львович получил в Ростове на Дону в реальном училище. Из-за тяжелых материальных условий, начиная с 5-го класса он давал уроки и этим поддерживал свое существование. В 1891 г. он поступил в Петербургский горный институт, который окончил в 1896 г. по горнозаводскому (металлургическому) факультету. Далее он отбывал воинскую повинность в инженерных

[1] История Всесоюзной Коммунистической партии (большевиков). Краткий курс, Госполитиздат, 1945, стр. 7.

войсках с 1896 по 1897 г. в качестве инженерного кондуктора. В начале 1898 г. Александр Львович поступил на работу в испытательную станцию Института инженеров путей сообщения. В течение 10 лет, до 1908 г., он выполнил ряд научно-исследовательских работ, результаты которых опубликованы в трудах Рельсовой комиссии Министерства путей сообщения. К этому периоду относятся следующие печатные работы А. Л. Бабошина: „Связь между химическими и механическими свойствами рельсов и их службой в пути" (1903 г.), „Отчего ломаются и сминаются наши рельсы" (1904 г.), „Хрупкость стали и новый метод ее измерения" (1904 г.), „Микроструктура твердых рельсов в связи со службой их в пути" (1905 г.) Хрупкие марганцовистые рельсы. Случай излома рельса под пассажирским поездом на Вологодской линии Николаевской ж. д." (1907 г.). Эти годы, как указывал сам Александр Львович, „являются годами научно-исследовательской работы и то же время подготовительными к педагогической деятельности" [1]. Однако в его научной работе был перерыв: в 1902 г. он был арестован за сочувствие революционному движению и заключен в тюрьму в Кресты, где пробыл 4 мес.

Педагогическая работа А. Л. Бабошина началась в 1907 г. после публичной защиты диссертации при Институте инженеров путей сообщения на тему „Служба рельсов в пути в связи с их внутренним строением (структурой), химическими и механическими свойствами". Получив звание адъюнкта, он начал читать в том же институте лекции по технологии строительных материалов. Его преподавательская работа в Институте инженеров путей сообщения продолжалась непрерывно до 1920 г.

Одновременно Александр Львович с 1909 г. был приглашен в Петербургский горный институт на должность преподавателя для чтения лекций по металлографии и термической обработке железа, стали и чугуна.

Параллельно с педагогической работой продолжалась его практическая и научно-исследовательская деятельность. В период с 1912 по 1916 г. он работал в отделе по испытанию и освидетельствованию заказов Министерства путей сообщения в качестве инженера-инструктора на металлургических заводах России, принимая самое близкое участие в налаживании процессов термической обработки на заводах (отжиг бандажей, осей, стального литья и пр.). Он участвовал также в разработке технических условий на железнодорожные изделия (рельсы, оси, бандажи, рессоры, и пр). Его практическая деятельность сочеталась с научно-исследовательской работой в лабораториях Института инженеров путей сообщения.

О результатах его работы в этот период можно судить по его докладам в Русском металлургическом обществе, в деятельности которого он активно участвовал. Например, 10 мая 1912 г. он сделал

---

[1] Цитируется из автобиографии А. Л. Бабошина, написанной в 1937 г. за 3 мес. до его смерти.

доклад на тему „Смятие (текучесть) рельсов“ [1], 5 марта 1915 г. он доложил на заседании общества результаты своего исследования о структурно свободном цементите в мягкой стали [2]. К этому же периоду относятся его работы об отжиге бандажей [3] и влиянии отжига на структуру доэвтектоидной стали [4]. В исследованиях этого периода можно видеть главную идею автора, которая заключается в установлении связи между службой изделий, структурой металла и условиями тепловой и механической его обработки. По существу эта идея является развитием основных принципов металлографии, установленных еще в работах Д. К. Чернова. Подтверждением этого могут служить слова самого Бабошина, который впоследствии писал: „Раз под влиянием теплоты изменяется структура, значит должны изменяться и свойства (твердость, упругость, хрупкость, электропроводность и пр.), ибо *структура металла определяет все его свойства*. Изменение свойств обязательно происходит через структуру, причем это одинаково верно как для термической, так и для механической обработки... Наука о тепловой обработке и об обработке стали вообще, с указанной точки зрения, обязана своим основанием гению русского ученого и металлурга Дмитрия Константиновича Чернова — „отца“ металлографии железа. Он первый указал (1868 г.) на существование тех предельных температур (точки *a* и *b*), от которых зависит способность стали принимать или не принимать закалку, изменять или не изменять свою структуру. Он первый заложил научный фундамент под изучение структуры и свойств металла в зависимости от тепловых и механических факторов обработки. До него нельзя было говорить об обработке, как о факторе, определенным образом отражающемся на структуре и свойствах металла. Металл обрабатывался ощупью при полном отсутствии каких бы то ни было принципов обработки. Общие принципы обработки нам даны Д. К. Черновым. С течением времени, путь, им намеченный, лишь углублялся и расширялся, но направление его остается прежним. Общие принципы обработки, данные нам Черновым, остаются незыблемыми“ [5].

Во всех своих работах А. Л. Бабошин следовал этим принципам, считая себя учеником и последователем Д. К. Чернова.

Значительную часть своих работ дореволюционного периода Бабошин посвятил изучению причин неудовлетворительной работы рельсов. В особенности много времени заняло исследование вопроса о смятии (текучести) рельсов. Он собрал материал по большому числу рельсов, обнаруживших явление смятия при эксплоатации,

---

[1] „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, ч. I, 1912, стр. 532—543.

[2] „Журнал Русского металлургического общества“ № 5, ч. I, 1915, стр. 561—571.

[3] „Журнал Русского металлургического общества“ № 5, ч. I, 1913, стр. 687—705.

[4] „Журнал Русского металлургического общества“ № 6, ч. I, 1915, стр. 691—708.

[5] Бабошин А. Л., Термическая обработка обыкновенных и специальных сортов стали, Оргаметалл. М. 1926, стр. 16.

и путем сопоставления микроструктуры и механических свойств с результатами эксплоатации установил связь между величиной зерна и строением перлита со службой рельса. Оказалось, что крупное зерно и резко диференцированный крупный перлит чаще всего наблюдаются у рельсов, давших значительное смятие. Изучение связи структуры с механическими свойствами привело автора к заключению, что самым чувствительным к изменению структуры свойством является предел упругости, определяя который можно иметь суждение о структурном состоянии металла.

С этой работой, а также с другими, связаны исследования факторов, влияющих на величину зерна в стали. Этот вопрос рассматривается в связи с критическими точками Чернова в работах: „О точке *b* Чернова" (1911 г.) и „Еще о точке *b* Чернова" (1916 г.). Бабошин показал, что рост зерна происходит не пропорционально температуре нагрева. Для каждой стали существует интервал температур при нагревании, выше которого начинается интенсивный рост зерна.

Все работы Бабошина характеризуются чрезвычайной основательностью и тщательностью методики. В его работах в особенности нашел широкое развитие микроскопический метод, которым он пользовался чрезвычайно плодотворно. Его микрофотографии выполнены безукоризненно с технической стороны и хорошо подобраны для доказательства выдвигаемых автором положений.

Примером умелого использования микроскопического метода может служить работа Бабошина о структурно свободном цементите. В этой работе он установил, что в мягкой стали с малым содержанием марганца может появиться структурно свободный цементит в обычных заводских условиях, так как для этого нет надобности в очень медленном охлаждении. Заметное количество его получается уже при скорости охлаждения 10° в минуту. Наличие свободного цементита вызывает хрупкость изделий из мягкой стали. Для предупреждения образования структурно свободного цементита Бабошин рекомендует производить отжиг с ускоренным охлаждением (на воздухе) или вводить в сталь больше 0,6% марганца.

Постоянное общение Бабошина с заводами и произведенные им исследования привели к накоплению богатого фактического материала. К этому времени благодаря работам ряда выдающихся русских ученых, в особенности Н. С. Курнакова, А. А. Байкова, Н. И. Беляева, Н. П. Чижевского, В. П. Ижевского, М. Г. Окнова и др., произошло значительное развитие теоретических знаний и практических данных о свойствах и обработке металлов и сплавов. Этому способствовала оживленная деятельность Русского металлургического общества, во главе которого стояли Д. К. Чернов (почетный председатель), М. А. Павлов, Н. С. Курнаков, А. А. Байков, Н. А. Иосса, Н. И. Беляев и др. Общество издавало журнал и созывало заседания, где делались доклады и происходила оживленная научная дискуссия. В мировой литературе к этому времени также накопилось много данных, разбросанных в журналах и отдельных изданиях.

Появилась необходимость собрать и обобщить весь этот громадный материал, создать единую стройную систему и изложить накопившиеся данные в последовательном виде. За эту работу взялся А. Л. Бабошин, который вложил в нее свою чрезвычайную систематичность, упорство и весь свой богатый практический опыт и эрудицию. Этому труду он посвятил лучшие годы жизни и отдал ему всю свою энергию и необыкновенную работоспособность. Его классический труд „Металлография и термическая обработка железа, стали и чугуна" в четырех частях начал издаваться в 1917 году, в котором вышли I и II части. В следующем 1918 г. вышла III часть. Последняя, IV часть, была издана в 1926 г.

Таким образом, издание труда Бабошина фактически произошло после Великой Октябрьской социалистической революции. Этот труд имел большое значение для распространения знаний об обработке металлов и воспитания многих поколений советских металловедов. Приступая к своему труду, Бабошин писал, что он преследует две цели: „С одной стороны, мне хотелось дать руководство для студентов специальных учебных заведений, с другой, мне хотелось также, чтобы книга моя могла служить пособием для инженеров и техников вообще. Первая цель требует ясности, последовательности и научности изложения, обобщающих выводов и возможной краткости, без загромождения книги цифровым материалом. Вторая цель, помимо ясности и последовательности изложения, требует возможно полного освещения *связи между теорией и практикой*, возможно полной иллюстрации книги практическими примерами. Должен сознаться, что эта вторая цель для меня особенно дорога"[1].

Книги Бабошина представляют также интерес с методической точки зрения; ни один вывод он не делал без подтверждения фактическим материалом. „Я стремился, — писал он, — каждый свой вывод подкреплять указанием на те именно факты, на основании которых этот вывод сделан, предоставляя читателю самому судить, надежен ли данный вывод или нет. Если вывод сделан на основании того или иного опыта, я старался каждый раз отмечать в каких условиях этот опыт производился"[2].

Книги Бабошина написаны удивительно ясным, простым и понятным языком при сохранении в то же время строгой научности изложения. Для Бабошина металл не является чем-то постоянным и неизменным. Он пишет, что „внутренняя энергия металла, как и живого организма, непостоянна — она изменяется"[3]. Это изменение Бабошин в образной форме характеризует в следующих словах: „Подобно живому организму, металл рождается, растет (запасается силами для работы), работает, утомляется, переутомляется и, наконец, умирает. При выплавке и отливке в форму металл рождается (сырой металл).

---

[1] См. предисловие к I части книги „Металлография и термическая обработка железа, стали и чугуна", 1917.

[2] Там же.

[3] Металлография и термическая обработка железа, стали и чугуна, ч., III, 1940, стр. 388.

Это — еще слабый ребенок, его нужно укрепить, наделить силами; и мы наделяем его силами путем обработки — механической или термической“ [1].

Свойства металла по Бабошину являются результатом развития, начиная с плавки. Бабошин пишет: „Металл, как и ребенок, может родиться здоровым, более или менее сильным, способным к развитию, но может родиться хилым, требующим тщательного ухода, либо совершенно неспособным к развитию, тогда он умирает уже в самом начале. Одна из главнейших задач хорошей выплавки и отливки и состоит в том, чтобы придать металлу способность к дальнейшему укреплению; надо сделать его таким, чтобы в дальнейшем он не требовал слишком большого ухода или не оказался совершенно неспособным к работе“.

Одна из основных задач металлографии, по мнению Бабошина, заключается в установлении взаимной связи в звеньях следующей цепи: „обработка → структура → свойства → отношение к службе. Эта схема, эта цепь с последовательными звеньями, говорит о том, что при данном составе всякое изменение в обработке металла, отражается соответственным образом на изменении структуры, изменение структуры соответственно отражается на изменениях в свойствах, а изменения в свойствах соответственно влияют на отношение металла к службе“ [2].

Из приведенных примеров, а их можно дать гораздо больше, видно, что громадный материал, собранный Бабошиным, изложен в его книге не в виде собрания различных сведений и данных. Его труд представляет стройную научную систему.

Вот почему этот труд Бабошина получил такое широкое распространение и популярность в нашей стране. Его труд является выдающимся произведением, единственным в своем роде. В предисловии к I части Бабошин писал, что при создании своих книг он не имел образца ни в иностранной, ни в русской литературе. Издание труда Бабошина показывает, насколько далеко шагнула русская наука в области металлографии за сравнительно короткий период своего существования. Замечательной особенностью труда Бабошина является чрезвычайная насыщенность его практическими примерами из громадного опыта автора. Кроме заводского опыта, в его книгах можно найти подробные и точные данные о способах исследования металлов микроскопическим, макроскопическим, дилатометрическим и другими методами.

После Великой Октябрьской социалистической революции в научной деятельности А. Л. Бабошина наступили значительные изменения. Помощь и содействие, которые советское правительство оказывало высшим учебным заведениям и научным работникам, создали широкую возможность для дальнейшего развития его творчества.

---

[1] Металлография и термическая обработка железа, стали и чугуна, ч. III, 1940, стр. 388.

[2] Там же.

В 1919 г. в Ленинградском горном институте была учреждена новая кафедра — „Металлография и термическая обработка“, во главе которой на должности профессора и заведующего кафедрой становится А. Л. Бабошин. Несмотря на все трудности того времени, кафедра получила необходимое оборудование и условия для развития. До 1930 г. основная деятельность Александра Львовича происходила в Горном институте. Кроме преподавательской и организационной работы на новой кафедре, в этот период Бабошин занимался подготовкой IV части своего основного труда, а также научной работой. К этому времени относятся опубликованные им работы „Обработка стали и точки *a* и *b* Чернова“ (1922 г.), „Методы испытания и технические условия приемки металлов и изделий из них“ (1923 г.), „Применение металлографического метода к изучению службы металлических изделий, машин и сооружений в разных областях техники“ (1923 г.), „Предел пропорциональности (упругости) как мерило качества стали“ (1924 г.), „О пределе упругости в связи с теорией пластических деформаций и теорией поверхностного натяжения в металлах“ (1924 г.) и т. д. В этих работах в основном проводится развитие идей автора о связи между структурой, свойствами и службой изделий. Бабошин делит все свойства на активные и пассивные по отношению к службе изделий Иначе говоря, он различает свойства чувствительные или недостаточно чувствительные по отношению к заданному фактору. Например, сопротивление на удар (ударная вязкость) зависит от величины зерна в стали, которое также отражается на службе изделий. В то же время величина зерна мало сказывается на твердости. Поэтому твердость — свойство пассивное, а ударная вязкость — активное.

По Бабошину предел упругости — активное свойство, а предел текучести — пассивное. Отсюда вывод: в технические условия нужно включать такие свойства, которые активны по отношению к условиям работы данных изделий, что уточняется соответствующими опытами. Этой же идее на конкретных примерах посвящен целый ряд работ Бабошина, опубликованных позднее, вплоть до 1928 г. В этот период (1925—1927 гг.) Бабошин работал в Ленинградском областном научно-техническом совете металлопромышленности в качестве председателя металлургического сектора, а также в Комитете эталонов и стандартов Главной палаты мер и весов. Деятельность его в этих организациях заключалась в разработке стандартов и технических условий на различные изделия и методы их испытаний. Кроме того, Бабошин провел большую работу по обследованию заводских лабораторий металлопромышленности, в результате чего составлены два сводных доклада, оставшиеся, к сожалению, не напечатанными.

Как уже упоминалось, в 1926 г. была издана IV часть его основного труда под названием „Термическая обработка обыкновенных и специальных сортов стали“. Эта книга, ввиду большого перерыва после издания первых трех частей и необходимости значительных дополнений, вышла в расширенном виде против первоначального плана.

Для характеристики деятельности А. Л. Бабошина во второй половине 20-х годов следует отметить его работу „Основные процессы при получении высокосортных чугунных отливок“ (1929 г.). В этой работе, отличающейся от основного направления его научной деятельности, рассмотрены методы повышения прочности чугунных отливок.

Эта работа является очень характерной в том отношении, что она показывает, как автор ставит и решает задачу исследования.

Сравнивая структуру заэвтектоидной стали со структурой чугуна, Бабошин пишет: „. . .какая форма цементита желательна в заэвтектоидной стали? — мелкие зернышки. Иглы и оболочки вокруг зерен (клеток) — это формы, сильно ослабляющие сталь“ [1]. От этой нежелательной формы цементита в стали избавляются соответствующей механической или термической обработкой. Но в белом чугуне это нельзя осуществить. „Единственно, что мы можем сделать — это совсем избавиться от цементита, разрушив его, превратив его в графит“ [2]. Далее, разбирая условия образования графита в чугуне, Бабошин указывает, что исключительное значение для прочности имеет форма графита. Критикуя диаграммы Маурера и Клингенштейна, он продолжает: „Измельчение графита является одним из главнейших факторов, определяющих свойства чугуна в отливке, гораздо более важным, чем та или иная основная масса этого чугуна. И об этой измельченности диаграммы Маурера и Грейнера — Клингенштейна ничего не говорят. Вот, почему, повторяем, мы не может довольствоваться этими диаграммами“ [3].

Чтобы получить мелкую форму графита, Бабошин рекомендует применять перегрев жидкого чугуна и быстрое охлаждение при отливке в кокильных формах. Но тогда получается отбел. Следовательно, нужно после этого сделать отжиг, который при надлежащем подборе состава чугуна обеспечивает получение мелко раздробленного графита. Статья иллюстрируется микрофотографиями, а также таблицами механических свойств, подтверждающих правильность идеи автора и высокие механические свойства чугуна после отливки в кокиль и отжига.

С 1928 по 1932 г. А. Л. Бабошин работал во Всесоюзном институте металлов в качестве ответственного руководителя отдела термической обработки металлов и транспортных изделий. Самой значительной работой, проведенной им в Институте металлов, является создание теории флокенов. Эта теория построена на большом экспериментальном материале, полученном Бабошиным вместе с его сотрудниками.

Работа началась в 1928 г. и закончилась в декабре 1930 г. Исследование производилось в очень широком плане с использованием микроскопического, макроскопического, дилатометрического

---

[1] „Металлург“ № 1, 1929
[2] Там же.
[3] Там же.

и рентгенографического методов. Кроме того, производились определения механических свойств изделий, пораженных флокенами, и здоровых. Сопоставляя и анализируя полученные данные, Бабошин приходит к выводу, что флокены тесно связаны с резко выраженной дендритной ликвацией. Исследования дилатометрическим методом показали, что флокеночувствительная сталь имеет дилатометрическую кривую с перегибом в критическом интервале при охлаждении. Изучая параллельно изменения структуры при охлаждении в критическом интервале, Бабошин показал, что перегибы на дилатометрических кривых соответствуют разным положениям критических точек при охлаждении в осях дендритов и междуосном пространстве. Следовательно, в соседних участках происходят неодновременные и неодинаковые структурные и объемные изменения, что создает в металле внутренние напряжения и появление волосных трещин. Совпадение результатов исследования, полученных разными методами, подтверждает выводы автора. Теория флокенов, созданная Бабошиным, не потеряла своего значения до настоящего времени. Она построена на точно выполненных экспериментах и безусловно отражает действительную картину. Полученные впоследствии данные о влиянии других факторов (водород) не противоречат, а скорее дополняют взгляды Бабошина.

Кроме работ по теории флокенов, Бабошин занимался в Институте металлов целым рядом других исследований, связанных с производством канатной проволоки, кардной проволоки, вагонных колес и другими вопросами. Результаты этих работ опубликованы в трудах Ленинградского института металлов и в периодической печати в 1931—1935 гг.

В феврале 1931 г. А. Л. Бабошин перешел на работу в Ленинградский военно-механический институт на должность профессора и заведующего кафедрой металловедения. Кроме того, он работал в Институте точной механики и оптики (с декабря 1931 г.) и в Институте инженеров гражданского воздушного флота (1932 г.) в качестве профессора и заведующего кафедрой.

Этот период своей деятельности Бабошин посвятил переработке и подготовке второго издания своего основного труда — курса „Металлография и термическая обработка железа, стали и чугуна". Второе издание труда Бабошина, значительно переработанное и дополненное, начало выходить в 1934 г. (I часть). II часть вышла в 1936 г. и III часть издана уже после смерти автора в 1940 г.; IV часть его труда осталась незавершенной.

Кроме педагогической деятельности и работы над переизданием своего основного труда, Бабошин продолжал в этот период исследования в области природы легированных сталей в Ленинградском военно-механическом институте.

С 1934 г. А. Л. Бабошин участвовал в работе Комиссии по металловедению при Академии Наук СССР.

Александр Львович Бабошин скончался 5 января 1938 г. Смерть постигла его неожиданно. В 5 час. дня он сдал в редакцию окон-

чательно выправленную им рукопись III части своего труда, а в 7 час. вечера его не стало.

Самой главной особенностью творчества А. Л. Бабошина являлось его постоянное стремление установить связь между теорией и практикой. „Связать, возможно шире и глубже, металлографию с практикой, писал он в предисловии к своему труду, — было одним из моих заветных желаний".

Все работы А. Л. Бабошина были неразрывно связаны с практической деятельностью. Его труды оказали значительное содействие развитию социалистической промышленности. Он создал себе прочный памятник своими замечательными трудами.

В особенности часто имя д-ра техн. наук проф. А. Л. Бабошина вспоминают с благодарностью его многочисленные ученики, работающие в промышленности и в научных учреждениях Советского Союза.

СПИСОК ТРУДОВ А. Л. БАБОШИНА

1. Бабошин А. Л., Хрупкость стали и новый метод исследования, 36 стр., т. М. П. С., СПБ 1904.

2. Бабошин А. Л., Отчего ломаются и сминаются наши рельсы? Служба рельсов в связи с их внутренним строением, химическими и механическими свойствами, 37 стр., СПБ 1905.

3. Бабошин А. Л., Связь между химическими и механическими свойствами рельсов и их службой в пути, 37 стр., 1 л черт., СПБ 1905.

4. Бабошин А. Л., Микроструктура твердых рельсов в связи со службой их в пути, 39 стр., 14 л. рис., СПБ 1906.

5. Бабошин А. Л., Хрупкие марганцовистые рельсы, 46 стр., 3 л. черт., СПБ 1907.

6. Бабошин А. Л., Служба рельсов в пути в связи с их внутренним строением (структурой), химическими и механическими свойствами, дисс., 1907.

7. Бабошин А. Л., О точке *b* Чернова, „Журнал Русского металлургического общества", № 2, ч. I, 1911.

8. Бабошин А. Л., Осевая сталь. Служба паровозных и вагонных осей в связи с их микроструктурой, химическими и механическими свойствами, „Записки Русского технического общества" № 8—9, 1909, стр. 226—237; „Журнал Русского металлургического общества" № 6, ч. II, 1910, стр. 990—992 (реферат).

9. Бабошин А. Л., Смятие (текучесть) в рельсах, „Журнал Русского металлургического общества" № 4, ч. I, 1912, стр. 532—543.

10. Бабошин А. Л., К проекту технических условий на поставку листового железа для паровозных огневых коробок, Министерство путей сообщения, 10 стр., СПБ 1912.

11. Бабошин А. Л., Об отжиге бандажей, „Журнал Русского металлургического общества" № 5, ч. I, 1913, стр 687—705.

12. Бабошин А. Л., Влияние отжига при разных условиях нагрева и охлаждения на структуры доэвтектоидной стали, „Журнал Русского металлургического общества" № 5, ч. I. 1915, стр. 691—708.

13. Бабошин А. Л., Структурно свободный цементит в мягкой стали, „Журнал Русского металлургического общества“ № 5, ч. I, 1915, стр. 561—571.

14. Бабошин А. Л., Термическая обработка стальных изделий, 1916.

15. Бабошин А. Л., Еще о точке *b* Чернова, „Журнал Русского металлургического общества“ № 1—2, ч. I, 1916, стр. 75—78.

16. Бабошин А. Л., Обработка стали и точки *a* и *b* Чернова, „Вестник металлопромышленности“ № 10—12, 1922, стр. 1—11.

17. Бабошин А. Л., Методы испытания и технические условия приемки металлов и изделий из них, „Вестник металлопромышленности“ № 9—12, 1923; „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, ч. I, 1923, стр. 101—104.

18. Бабошин А. Л., Применение металлографического метода к изучению службы металлических изделий, машин и сооружений в разных областях техники, „Вестник металлопромышленности“ № 9—12, 1923; „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, ч. I, 1923, стр., 104—105.

19. Бабошин А. Л., Предел пропорциональности (упругости) как мерило качества стали, „Журнал Русского металлургического общества“ № 4, ч. I, 1924, стр. 143—158, № 6, стр. 181—195.

20. Бабошин А. Л., О пределе упругости в связи с теорией пластических деформаций и теорией поверхностного натяжения в металлах, „Журнал Русского металлургического общества“ № 8, 1924, стр 228—244.

21. Бабошин А. Л., Котельное железо; обработка, структура, свойства, технические условия на приемку и условия службы, Труды регистра СССР, 31 стр , М. 1925,

22. Бабошин А. Л., Исследование причин массовой дефективности котельных листов Ижорского завода, 1925 г.

23. Бабошин А. Л., Термическая обработка обыкновенных и специальных сортов стали, 558 стр., Оргаметалл, М. 1926.

24. Бабошин А. Л., Еще и еще раз о рельсах, „Уголь и железо“ № 16, 1927, стр. 62—71, № 17, стр. 71—81.

25. Бабошин А. Л., К характеристике прошлого и настоящего наших технических условий на рельсы, в кн. „Исследование рельсового дела в СССР“, ч. I, М. 1928, стр. 48—64.

26. Бабошин А. Л., Об относительном удлинении и относительном сжатии (сужении) как технических характеристик пластичности металла, в кн. „Лаборатории металлопромышленности“, М. 1928, стр. 153—163.

27. Бабошин А. Л., Основные положения для выработки технических условий на тянутую стальную проволоку для канатов, в кн. „Сталепроволочное производство в СССР“, М. 1928, стр.163—171.

28. Бабошин А. Л., Проект нормализации микроскопических методов испытания стали, в кн. „Лаборатории металлопромышленности, М. 1928, стр. 17—18.

29. Бабошин А. Л. Обследование заводских лабораторий Ленинграда, 1928.

30. Бабошин А. Л., Основные процессы при получении высокоскоростных чугунных отливок, „Металлург“ № 1, 1929, стр. 106—114.

31. Бабошин А. Л., К природе флокенов (флейков, белых пятен, хлопьев) в хромоникелевой и хромистой стали, „Металлург“ № 2, 1929, стр. 205—216.

32. Бабошин А. Л., Теория образования флокенов в хромоникелевой и никелевой стали, „Металлург“ № 4, 1931, стр. 353—378, № 5, стр. 523—549, № 6—7 стр. 656—670.

33. Бабошин А. Л., Металлография и термическая обработка железа, стали и чугуна, ч. I—III, изд. 2-е, Металлургиздат, М. 1934—1940 (1-е изд. 1917—1918).

34. Бабошин А. Л., Дендритная сегрегация в легированной стали в связи с образованием флокенов (теория образования флокенов) и изучением природы этой стали вообще.

35. Бабошин А. Л., Смирнов А. В., Туляков А. П. и Нормарк О. И., Природа флокенов в связи с исследованием турбинных дисков, „Сообщения Всесоюзного института металлов“ № 3—4, 1931, стр. 27—37.

36. Бабошин А. Л. и Смирнов А. В., Исследование кардной проволоки, „Сообщения Всесоюзного института металлов“ № 9, 1931, стр. 18—27.

37. Бабошин А. Л. и Туляков А. П., Колеса Гриффина (состав, структура, свойства и отношение к службе), в кн. „Труды Института металлов“, вып. 21, Л. 1931.

38. Бабошин А. Л., Смирнов А. В. и Масалов Н. П. Исследование материалов для некоторых ответственных частей текстильных машин, „Сообщения Института металлов“ № 8, 1931, стр. 34—35, № 9, стр. 18—27.

39. Бабошин А. Л., Смирнов А. В. и Масалов Н. П., Исследование обработки и свойств канатной проволоки, „Вестник металлопромышленности“ № 4, 1935, стр. 23—44, № 5, стр. 3—20.

СМЯТИЕ (ТЕКУЧЕСТЬ) В РЕЛЬСАХ[1] [1]

(Из химической испытательной станции Института инженеров путей сообщения)

А. Л. БАБОШИН

Вопрос о смятии (текучести) в рельсах для меня далеко не нов. Еще в 1904 г. я высказался по этому вопросу довольно определенно, а в следующем 1905 г. еще более определенно [2]. И если я сейчас возвращаюсь опять к этому вопросу, то к тому меня побуждает, помимо тех дополнений, которые я намереваюсь внести в этот вопрос, еще одно чрезвычайное обстоятельство.

Я разумею поставку рельсов одним русским заводом на одну из казенных русских железных дорог и те результаты, которые при этом получились. Этому заводу недавно был дан громадный заказ на рельсы, на сумму в несколько миллионов рублей. Завод поставил рельсы, но эти рельсы, почти сейчас же по укладке их в путь, начали сильно сминаться.

По условиям поставки на наши железные дороги, если рельсы износились ранее 10 лет службы они должны быть безвозмездно заменены новыми поставщиком-заводом. Однако упомянутые рельсы сминаются так быстро и в таком необычайном количестве, что дорога, снимая негодные рельсы на целые сотни верст, не успевает заменить эти негодные рельсы новыми того же завода, а вынуждена покупать новые рельсы других заводов.

Рельсы у нас, как и везде, принимаются от заводов на основании определенных технических условий приемки. Если рельсы упомянутого завода оказались (и притом в таком грандиозном масштабе) неудовлетворительными в службе, то уже невольно является вопрос — правильны ли те нормы, на основании которых эти рельсы были приняты от завода агентами казны? Если же принять во внимание, что часть тех рельсов упомянутого завода, непригодность которых к службе достаточно выяснилась, была изготовлена этим заводом уже после выработки и утверждения в законодательном порядке новых технических условий (по новым техническим условиям рельсы начали приниматься с 1906 г., окончательно же новые технические условия вошли в силу с 1 января 1908 г.) и принималась от завода по новым техническим

---

[1] Доклад, читанный в Р. М. О. 10 мая 1912 г.

[2] См. мою работу „Служба рельсов в пути в связи с их внутренним строением (структурою), химическими и механическими свойствами“, 1907 г.

условиям, то тот же вопрос является и по отношению к этим новым техническим условиям. Рельсы, о которых идет речь, не хрупки (не ломаются), а только сминаются.

Более чем плачевный результат службы упомянутых рельсов и притом еще рельсов, принятых по новым техническим условиям, произвел, повидимому, громадное впечатление на официальные сферы. Началась обычная в таких случаях суета. Стали вопрос исследовать, отчего это произошло. Министерство путей сообщения командировало своих представителей, с одной стороны, на инкриминируемый завод, с другой, — на другие заводы, а в конце концов были сняты с пути 21 рельс (13 рельсов с ярко выраженным смятием и 8 рельсов новых, не бывших в пути) и присланы в лаборатории Института инженеров путей сообщения для исследования всех их химических, механических и структурных свойств.

Вопрос об упомянутых рельсах обеспокоил не только официальные сферы, но проник и в общество. Газеты «Новое время» и «Речь» писали об этих рельсах. Потому-то вопрос о смятии (текучести) рельсов, помимо его принципиального значения, несомненно приобретает, в связи с упомянутой поставкой и ее крайне плачевными результатами, некоторую остроту и является вопросом злободневным.

В своем докладе я буду касаться главным образом принципиальной стороны вопроса: о смятии (текучести) в рельсах вообще, а не только в рельсах, о которых только что говорилось. Эти последние рельсы для меня являются только частным случаем основных общих причин смятия, — случаем, впрочем, чрезвычайно ярким и характерным. Скажу только, что при изучении этих рельсов я имел редкий случай, по своей выразительности, проверить ранее высказанные мною взгляды на причины смятия (текучести) в рельсах.

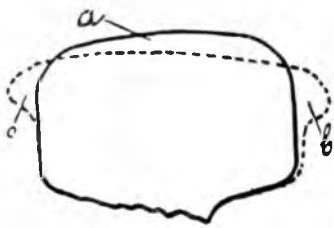
Рельсы относятся к таким изделиям, которые во время работы претерпевают интенсивные и разнообразные напряжения. Эти напряжения, вызываемые движением колес, которое к тому же никогда не бывает плавным, а сопровождается ударами, в случае недоброкачественности материала рельсов, приводят: а) или к нарушению сплошности металла — излому (проявлению хрупких свойств металла рельса), или б) к износу головки рельса без такого нарушения сплошности. В понятие «износ» рельса необходимо вносить ясность и определенность. Износ головки рельса лучше всего можно определить налагая на профиль изношенного рельса профиль нормального рельса (до износа) и измеряя разницу при помощи планиметра. Необходимо различать „общий износ“ рельса (площадь a, фиг. 1), „смятие“ или „текучесть“ (сумма площадей $b + c$) и „стираемость“ $a - (b + c)$.

Таким образом, износ рельса = сумме текучести и стираемости. При текучести = 0,0 износ рельса = стираемости и наоборот, — при стираемости = 0,0, износ = текучести.

Разделяя абсолютные величины „общего износа", „текучести" и „стираемости" рельса на число миллионов тонн прошедшего по рельсу груза, мы получим относительные величины, относящиеся к 1 миллиону. тонн прошедшего груза.

Хрупкость, смятие (текучесть) и стираемость — три понятия, которыми определяется понятие „плохой" по службе рельсов.

Хрупкость, смятие и стираемость — каждое из этих явлений вызывается своими особыми причинами и на этом основании каждое из них должно быть изучаемо отдельно. В противном случае (т. е. при смешивании в одну кучу всех плохих рельсов: хрупких, смятых и стертых) могут получиться (и получались) крупные ошибки при суждении о причине дурной службы рельса.



Фиг. 1.

В литературе по вопросу о причинах дурной службы рельсов в пути наблюдается крайнее разномыслие. Но я не ошибусь, если скажу, что одна из причин этого разномыслия лежит, как это ни странно, в неясном разграничении понятия „плохой" по службе рельсов, в замене этого сложного понятия понятием определенным.

Свой доклад я исключительно ограничу исследованием вопроса о смятии (текучести) рельсов, не касаясь ни хрупких, ни тех рельсов, которые подвергаются износу в смысле стирания их головок.

По обычным представлениям сминаются (текут) только те рельсы, которые мягки, причем под мягкими рельсами понимаются рельсы малоуглеродистые, с низким временным сопротивлением при разрыве, имеющие малую твердость, определяемую обычными методами (самый распространенный из этих методов — метод Бринеля). Но это неверно. Свойство текучести рельса в пути не зависит от твердости металла в указанном смысле. Текут и твердые в этом смысле рельсы [1].

По моим представлениям причины смятия (текучести) рельсов в пути лежат не в химическом составе их, а, следовательно, не в той или иной твердости по Бринелю (зависящей от этого химического состава), а главным образом в структурных особенностях металла рельсов и в тесно связанном с этими структурными особенностями пределе упругости металла.

---

[1] В 1904 г. я писал: „Очень распространено мнение, что сминаются только мягкие (малоуглеродистые, с низким временным сопротивлением или низким числом твердости по Бринелю) рельсы. К мягким рельсам относятся поэтому с предубеждением, и когда видят смятый рельс, то называют его мягким. Мне хотелось бы обратить особенное внимание на неправильность подобного мнения и даже вред его для дела" (см. труды Рельсовой комиссии, книга „Выводы", стр. 11).

Под структурными особенностями я разумею исключительно: 1) величину зерна и 2) величину, форму и взаимное расположение основных элементов микроструктуры рельсовой стали, к каковым элементам я отношу только феррит и перлит, составляющие самое тело металла. Всякие посторонние включения, как-то: шлаки, сернистый марганец, пузыри и пр., сюда не относятся.

Феррит и перлит составляют тело всякого рельса—и хорошего, и дурного, и сминаемого и не сминаемого. Количественные отношения между ферритом и перлитом (при углероде в рельсовой стали 0,3—0,7%), вообще говоря, не определяют качества рельсов как изделий. Только величина, форма и взимное расположение этих основных структурных составляющих определяют качество рельсов как изделий.

Но кроме величины, формы и взаимного расположения основных элементов микроструктуры, качество стали в изделиях определяется прежде всего величиной зерна (клетки).

Под зернистостью (клеточной структурой) понимается распадение твердого раствора в аустенитовой области (т. е. выше точки Ac_3, или выше линии GOS) на участки большей или меньшей величины, в зависимости от термических и механических условий обработки стали. При условиях обычного (медленного) охлаждения стали, внутри этих участков (зерен), а также на границе между отдельными зернами, в интервале температур от Ar_3 до Ar_1 выделяются продукты так называемой вторичной кристаллизации, т. е. упомянутые основные элементы микроструктуры — феррит и перлит.

Что такое зерно в стали, какова его сущность, нам пока неизвестно. Нельзя, например, определять зерно в стали по Тамманну: „как агрегат кристаллитов, образовавшийся из одного центра кристаллизации". Нельзя потому, что распадение стали на зерна совершается в аустенитовой области, где сталь представляется в виде совершенно однородного твердого раствора; никаких кристаллитов в этой области не образуется. Кристаллиты образуются при переходе стали из жидкого состояния в твердое (первичная кристаллизация), но, раз образовавшись, кристаллиты в аустенитовой области остаются неизменными. Зерна же (клетки) изменяют свою величину в аустенитовой области в широких пределах. Законы роста зерна в зависимости от температуры[1] нам более или менее известны в настоящее время.

Так как сущность зерна в стали ускользает от понимания, то в последнее время появилось представление о зернистости как самостоятельном, самодовлеющем роде структуры. В сущности, в этом последнем смысле высказался Осмонд еще в 1904 г. „Клеточная структура характеризуется наличностью петель (или зерен), назависимо от природы (аморфной или кристаллической)

[1] См. мой доклад в „Журнале Р. М. О." „О точке *b* Чернова" (2-я книга, 1911 г).

вещества, составляющего эти зерна, при наличности других промежуточных между ними веществ, или без них"[1]. Еще более определенно высказался об особом „зернистом состоянии вещества" А. А. Байков в докладе Р. М. О. под названием: „Возникновение и распространение превращений в стали" (8 декабря 1910 г.).

Что чистое или почти чистое (свободное от углерода) железо, равно как сталь, содержащая 0,5% и более углерода, состоят из зерен — в первом случае — феррита (см. фиг. 2, относящуюся к сломавшейся железнодорожной оси из сварочного почти безуглеродистого железа; темные включения принадлежат шлаку), а во втором — перлита (см. фиг. 3, относящуюся к быстро смятому в пути рельсу, C = 0,55%) с оболочкой феррита — всякий знает.

Если взять сталь промежуточную, содержащую 0,2—0,4% C, то здесь дело как бы другое: зерен в такой стали мы не видим (см. фиг. 4, относящуюся к сломавшейся железнодорожной оси: C = 0,27 Mn = 1,04%). На последнем снимке мы наблюдаем крупные выделения продуктов вторичной кристаллизации (увеличение снимка небольшое, всего в 69 раз), но зерен не видно. Фиг. 4 дает представление об обычном строении стали с содержанием углерода 0,2—0,4%. С изменением углерода в этих пределах несколько изменяется количественное отношение между ферритом и перлитом. В зависимости от термической и механической обработки стали в широких пределах может изменяться величина кристаллов феррита. Но в общем все же строение остается, подобно фиг. 4, без видимых следов зерна.

Однако, отсутствие зерна в этом последнем случае — только кажущееся явление. В действительности всякая сталь состоит из зерен. И если мы обыкновенно не видим их в стали, содержащей 0,2—0,4% углерода, то это происходит оттого, что в этом случае зернистость замаскирована продуктами вторичной кристаллизации: ферритом и перлитом.

В том случае, когда продукты вторичной кристаллизации получают более или менее правильную ориентировку, что обыкновенно наблюдается при перегреве стали, зернистость ясно выступает при любом содержании углерода в стали.

В поисках за зерном мне удалось проследить зернистость во всякой стали, и притом в стали не искусственно полученной, а натуральной, самой обыкновенной. Я иллюстрирую это рядом снимков.

Рядом с фиг. 4, в которой, как я говорил, не наблюдается видимого зерна, можно поставить фиг. 5, относящуюся к быстро смятому в пути рельсу. Сталь почти того же состава (C = 0,28, Mn = 0,71%), как и фиг. 4, но с ясно выраженной зернистостью. Эта ясно выраженная зернистость несомненно обязана правильной ориентировке продуктов вторичной кристаллизации (вид-

---

[1] F. Osmond, Ch. Fremont et G. Cartand, Rev. de Met., p. 11, 1904.

манштеттово строение), получившейся благодаря сильному перегреву рельсовой болванки.

Фиг. 6 и 7. Обе относятся к сломавшимся железнодорожным осям почти тождественного состава. Первый снимок (фиг. 6) относится к оси состава C = 0,39, Mn = 1,04 %. Второй снимок (фиг. 7) относится к оси состава C =0,38, Mn = 1,08%. Первый снимок с ярко выраженным зернистым и видманштеттовым строением. Второй снимок для меня является особенно ценным. На нем зернистость с первого взгляда не видна. Однако достаточно немного всмотреться, чтобы увидеть в центральной части снимка несомненное зерно (*abc*) с неясно выраженным видманштеттовым строением внутри него. Эта структура несомненно является промежуточной ступенью между ясно выраженной зернистостью, как на фиг. 6, и отсутствием видимой зернистости, как на фиг. 4.

Между величиной зерна и величиной продуктов вторичной кристаллизации (величиной кристаллов феррита) существует несомненная связь. Чем крупнее зерна, тем крупнее ферритовые кристаллы, т. е. о величине зерна можно судить по величине кристаллов феррита. Поэтому осевую сталь (фиг. 4) без видимых следов зерна, но с несомненно крупными кристаллами феррита (увеличение в 69 раз), надо считать не только крупнокристалличною, но крупнозернистою.

Вернемся теперь к смятию (текучести) в рельсах. Смипаемым (текущим) в пути рельсам свойственна крупнозернистая структура. Если сопоставить в этом смысле быстро смятые в пути рельсы с рельсами доброкачественными (хорошо и долго служившими) по возможности одного и того же состава, то разница в величине зерна [1] резко бросается в глаза.

Фиг. 8 при линейном увеличении в 150 раз относится к рельсу доброкачественному состава C = 0,52 Mn = 0,57%. Фиг. 3 при линейном увеличении в 190 раз относится к рельсу, быстро смятому в пути, состава C = 0,55 Mn = 0,41%. Фиг. 9 относится также к быстро смятому в пути рельсу, но с меньшим содержанием углерода (0,38%). Все три снимка относятся к центральным частям головок. Структура первого рельса мелкозерниста и приближается к структуре нормально отожженной стали. Структура второго и третьего рельсов (смятых), наоборот, — очень крупнозерниста и сильно удаляется от структуры нормально отожженной стали. В шейке рельсов зерна обыкновенно несколько мельче, чем в середине головок с той, однако, существенной разницей, что у доброкачественных рельсов зерна в шейке всегда ясно деформированы, вытянуты в направлении прокатки, тогда как у смятых рельсов этого явления в шейке обыкновенно не наблюдается или наблюдается в весьма слабой степени. О зерне вверху головок будет сказано ниже.

---

[1] Что такое „крупное“ или „мелкое“ зерно в рельсах, какова их точная мера, об этом см. мою работу „Служба рельсов...“ (1907 г.).

Говоря о том, что сминаемым рельсам свойственна крупнозернистая структура, не должно забывать следующих, на мой взгляд важных, соображений.

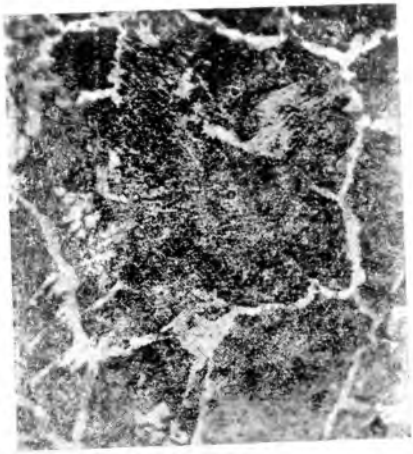
Идеалом структуры в смысле величины зерна для всех ходовых кованых или катаных изделий, не подвергающихся специальной термической обработке и не содержащих в себе какой-либо специальной примеси, в частности рельсов, является нормально отожженная сталь, т. е. сталь, нагретая немного выше точки Ac_3. Плохие изделия по величине зерна сильно отходят от такой нормально отожженной стали. Степень, в которой зерно удаляется от идеала, у каждого рода изделий своя. Каждому роду худых изделий свойственна своя как бы предельная величина зерна.

Если сопоставить в этом отношении рельсы с железнодорожными осями, то плохие оси, вообще говоря, будут (и должны быть) гораздо более крупнозернистыми, чем плохие рельсы. О разнице между ними можно судить по фиг. 5 и 6. Заведомо плохой рельс, смятый на первом году службы (фиг. 5), имеет более мелкое зерно, чем заведомо плохая ось (фиг. 6). Мне не приходилось наблюдать среди плохих рельсов зерна более крупного, как на фиг. 5, между тем как среди плохих осей приходилось наблюдать зерно еще более крупное, чем на фиг. 6. Для рельсовой стали зерно фиг. 5 является уже как бы пределом зернистости, тогда как для осевой стали эта величина зерна еще далеко не предел. По существу оно и должно быть так: рельсы при работе испытывают гораздо большие и более разнообразные напряжения, чем оси. А потому в осях допустима более крупная величина зерна. Этим объясняется и тот, как бы на первый взгляд непонятный, факт, что часто доброкачественные оси имеют довольно крупное зерно, тогда как доброкачественные рельсы имеют зерно гораздо более мелкое.

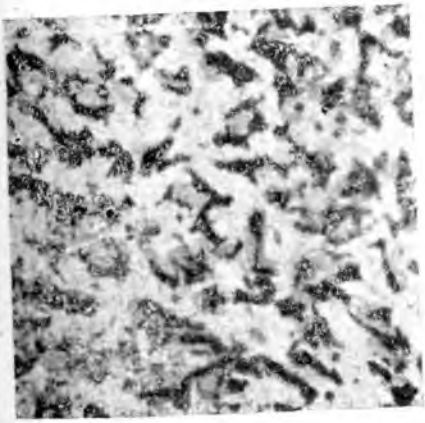
Однако одной крупнозернистостью нельзя объяснить смятие рельсов. Не надо забывать, что крупнозернистость присуща и другой категории плохих рельсов, а именно, — рельсам хрупким, ломающимся без всяких следов предварительного вытекания металла. Обыкновенно крупнозернистость почти исключительно связывают с хрупкостью изделий, а не с текучестью металла, хотя это безусловно неверно. В свое время я очень долго не мог найти объяснения этим фактам: почему крупнозернистость в одном случае приводит к смятию (текучести) рельсов, а в другом к излому [1], т. е. к результату совершенно противоположному, ибо текучесть металла и хрупкость его мы привыкли считать как бы двумя противоположными плюсами. Разгадка этого была найдена, когда я стал изучать внутреннее строение зерен в том и другом случае, т. е. в конце концов строение перлита.

[1] Здесь мы подразумеваем хрупкость обыкновенную — излом как результат удара, — а не „вибраторную“, проявляемую, например, в железнодорожных осях.

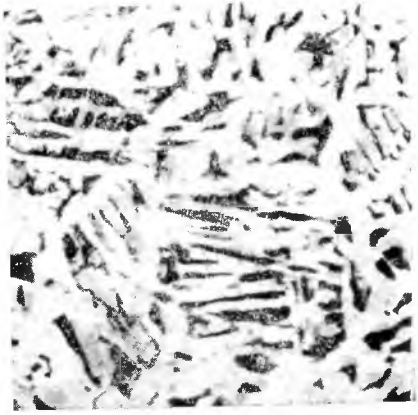
Фиг. 2. × 150.



Фиг. 3. × 190 (уменьшено ×2/3). (C = 0,55; Mn = 0,4%).

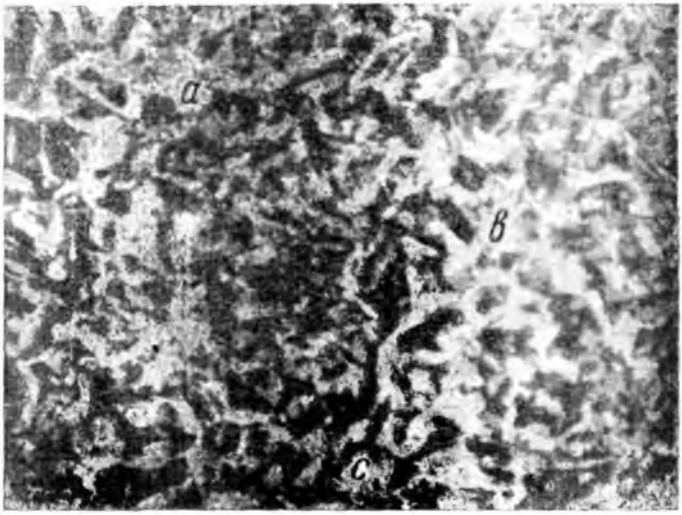


Фиг. 4. × 69. (C = 0,27; Mn = 1,04%).

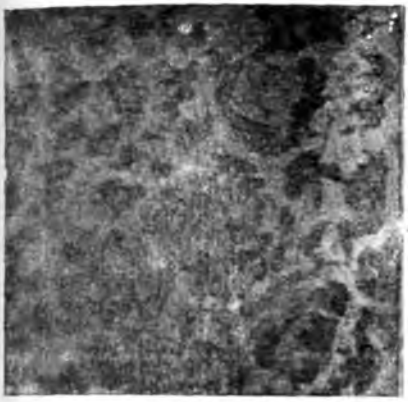


Фиг. 5. ×69. (C = 0,28; Mn = 0,71%).

Фиг. 6. × 69. (C = 0,39; Mn = 1,04%).

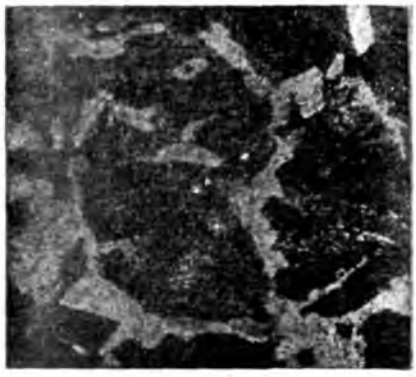


Фиг. 7. × 69. (C = 0,38; Mn = 1,08%).



Фиг [illegible] × 150 (C = 0,52 Mn = 0,57%).

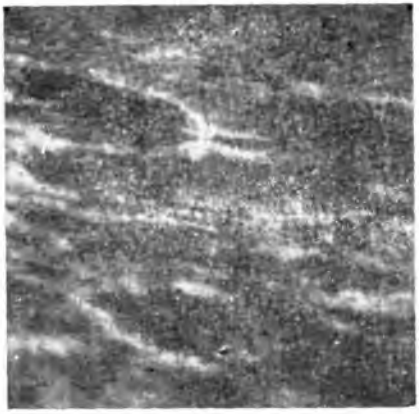
Фиг. [illegible] × 190. (C = 0,38%).



Фиг. 10. × 330. (C = 0,51; Mn = 1,22%).

Фиг. 11. × 530 (уменьшено × 3/4).

Фиг. 12. × 530 (уменьшено × 3/4).



Фиг. 13. × 190.

В доброкачественных и смятых рельсах [1] встречаются следующие формы перлита: 1) точечный или сорбитообразный, 2) тонкий пластинчатый и 3) ярко выраженный, сильно диференцированный пластинчатый перлит.

На фиг. 10 можно видеть строение так называемого точечного или сорбитообразного перлита. Точечный перлит, по нашему мнению, есть просто сорбит. Сорбит, как всем известно, не есть определенная структурная составляющая, сорбит не есть фаза, сорбит — просто неясно выраженный перлит (переходная ступень). Точечный перлит не надо смешивать с так называемым зернистым (об этом ниже). Точечный или сорбитообразный перлит редко встречается в рельсовой стали. Гораздо чаще встречаются другие две формы перлита.

Под „тонким пластинчатым" я разумею такой пластинчатый перлит, который при линейном увеличении около 300 раз хорошо виден глазом, но на фотографическую пластинку с трудом передается не только при этом увеличении, но часто даже и при увеличении гораздо большем (до 500 раз).

Ярко выраженный, диференцированный пластинчатый перлит виден, можно сказать, при всяких увеличениях и при увеличении в 100 — 150 раз уже довольно отчетливо передается на фотографическую пластинку.

На фиг. 11 и 12 даны эти формы пластинчатого перлита при увеличении в 530 раз.

Перлит доброкачественных рельсов есть перлит сорбитообразный (точечный) или приближающийся к таковому (тонкий пластинчатый — чаще всего).

Рельсам сминаемым (текущим) свойственен ярко выраженный, диференцированный пластинчатый перлит, иначе говоря такой перлит, который, наоборот, удаляется от сорбита, приближаясь к структурному рановесию составляющих его феррита и цементита.

Необходимо заметить что этому обстоятельству, т. е. формам перлита, не придают, вообще говоря, никакого значения при суждении о технических свойствах издельной стали (за исключением, впрочем, так называемого „зернистого" перлита — самого бесполезного в практическом смысле перлита).

Что это действительно так, показывают многочисленные работы Гийе. Можно сказать, нет стали, над которой не работал бы Гийе. И тем не менее этот исследователь, говоря о стали с перлитовой структурой, совсем не делает попытки к выделению различных форм перлита и к изучению свойств их. Между тем как в практическом смысле это чрезвычайно важно.

Выше я говорил, что „точечный" перлит не надо смешивать с так называемым „зернистым". Хотя „зернистый" перлит не встречается ни в рельсовой ни в какой-либо другой издельной

[1] Над строением зерна у хрупких рельсов мы совсем не останавливаемся.

стали, тем не менее я позволю себе на нем остановиться по некоторым основаниям. Совер [1] и Ле-Шателье [2] этого рода перлиту дали такое определение: „Зернистая (гранулярная) форма перлита характерна для стали, ковка или прокатка которой была окончена при низкой температуре, близкой к точке превращения, или которая была нагрета (отожжена) при этой температуре“.

Это определение привело к целому ряду недоразумений. Авторы, на мой взгляд, очевидно имели в виду „точечный“ перлит (сорбит) в первой части своего определения и настоящий „зернистый“ перлит во второй части.

При проковке или прокатке, как бы ни была низка температура, нельзя получить „зернистого“ перлита, а можно получить только „точечный“ (см. фиг. 10), который мы причисляем к сорбиту. „Зернистый“ же перлит можно получить только путем весьма продолжительного отжига при низкой температуре (немного ниже 700°).

Так как проковка или прокатка при низкой температуре, давая „точечный“ перлит в то же время несомненно улучшает механические свойства металла, то на этом основании, смешивая „точечный“ перлит с „зернистым“, стали приписывать „зернистому“ перлиту высокие механические свойства „точечного“ перлита (сорбита). На этом же основании „зернистый“ перлит стали искать в булате. Но „зернистый“ перлит не только не есть „точечный“, но полная ему противоположность. Точечный перлит — это сорбит и, как таковой, является далеким от структурного равновесия, зернистый же перлит — идеал структурного равновесия.

История „зернистого“ перлита, особенно у нас в России, довольно поучительна. Одно время этот вопрос был за границей и у нас до некоторой степени модным. Им занимались за границей Геренс и Бенедикс. Оба — исключительно с теоретической стороны, с точки зрения условий образования „зернистого“ перлита. Русские авторы занимались „зернистым“ перлитом и с теоретическими и с практическими целями (главным образом с практическими). Капитан Н. Т. Беляев [3] и проф. Ижевский [4], приписывая зернистому перлиту высокие механические свойства, предположили, что булатная сталь как раз представляет собой замечательный пример ярко выраженного структурного равновесия, иначе говоря, что булатная сталь по своему строению является „зернистым“ (сферолитным, четковидным) перлитом.

Инженером Н. И. Беляевым [5] на Путиловском заводе были произведены опыты, с одной стороны, с целью выяснения условий образования „зернистого“ перлита, а с другой,— с целью определения его механических свойств. Последний автор пришел в конце

---

[1] „Горный журнал“, март, 1903.
[2] Revue de Métall. № 4, 1904.
[3] „Кристаллизация, структура . . .“, 1909.
[4] См. Ж.Р.М.О., № 5, 1910.
[5] См. его статью „О булате“, Ж.Р.М.О. № 4, 1911.

концов к заключению, что „зернистый“ перлит никоим образом не может находиться в булатной стали, так как последняя обладает, как известно, высокой степенью упругости. Зернистый же перлит таковой отнюдь не обладает. „Этому требованию (т. е. высокой степени упругости) в наименьшей степени может удовлетворить сталь, приведенная к состоянию наиболее совершенного обособления феррита и цементита, т. е. к состоянию структурного равновесия“ (стр. 471).

Словом, высокие механические свойства „зернистого“ перлита, в которые верили почти все, и, между прочим, вначале и последний автор, Н. И. Беляев, оказались по меньшей мере преувеличенными.

Мне кажется, к такому заключению можно было притти без всяких опытов, на основании просто логического построения. В самом деле: факт несомненный, что сорбитовая сталь обладает высокими механическими свойствами. Опыты Стэда и Ричардса в 1903 г.[1] и в 1905 г.[2] с несомненностью показали, что сорбитовая сталь обладает, с одной стороны, высокими упругими свойствами, а с другой — высоким сопротивлением повторным и попеременным напряжениям. Далее, мною в 1904—1905 гг. было показано в отношении рельсовой стали [3], что удаляясь от сорбита и переходя к ярко выраженному, диференцированному перлиту, иначе говоря, приближаясь к структурному равновесию, сталь все более и более теряет свои упругие свойства [4]. Следовательно, дойдя до предела структурного равновесия, т. е. до „зернистого“ перлита, сталь никоим образом не может получиться с высокими упругими свойствами, а только с низкими, что и подтвердили опыты Н. И. Беляева.

Вернемся, однако, к рельсам и спросим себя: можно ли связать те структурные особенности, которые присущи сминаемым рельсам, с механическими свойствами их? Впрочем, это вопрос праздный. Связь между структурой рельсов и механическими свойствами их должна [5] быть. Вопрос только в том, какая это связь?

---

[1] „Sorbitic steel rail“, „Journal of ihe Iron . . .“ 1903.

[2] „Overheated steel“, „Journal of the Iron . . .“, сентябрь, 1905.

[3] „Служба рельсов в пути в связи с их внутренним строением“, (1907 г.)

[4] На разницу в механических свойствах между различными формами перлита определенно указывал Арнольд в 1905 г. По Арнольду удаление от сорбита сказывается на понижении временного сопротивления. Мы полагаем, что разница между различными формами перлита не этим характерна, а характерна разницей в пределе упругости. Это не одно и то же. Несомненно, что временное сопротивление с удалением от сорбита понижается, но только в степени значительно меньшей, чем предел упругости.

[5] Для меня всегда было nonsens'ом, когда я слышал, что между службой рельсов в пути и их структурой, или между службой рельсов в пути и их механическими свойствами (все равно) нет связи. Немногого стоят тогда и эта структура и эти механические свойства, если их нельзя связать между собой и со службой изделия. Как это ни странно, но как раз к такому

Из всех механических свойств, которыми обычно характеризуются качества рельсов (временное сопротивление, предел упругости, удлинение, сужение при разрыве, сопротивление удару, твердость по Бринелю и пр.), только предел упругости очень тесно связан и со структурой, с одной стороны, и с сопротивлением рельса смятию в пути, — с другой.

Рельсы со смятием головок, в противоположность рельсам доброкачественным, имеют очень низкий предел упругости (почти всегда ниже 20 *кг/мм*², опускаясь иногда до 9,5 *кг/мм*², как в рельсах того завода, о котором я говорил в начале этой статьи). И это независимо от того, тверды ли эти рельсы или мягки в обычном смысле, т. е. углеродисты ли они, или мало углеродисты, с высоким числом твердости Бринеля, или низким — все равно. Как раз те рельсы, о которых я говорил в начале этой статьи, тверды в обычном смысле. Содержание углерода в них достигает до 0,6% и даже выше. Но эта твердость не помешала им иметь поразительно низкий предел упругости, опускающийся до 9,5 *кг/мм*² при временном сопротивлении около 70 *кг/мм*², и не помешала им быстро смяться в пути.

Причина смятия рельсов, по моим взглядам, лежит в структуре металла в вышеуказанном мною смысле. А эта структура тесно связана с пределом упругости металла. Причин смятия поэтому не две или несколько (разумею причины главнейшие, существенные), а одна.

Низкий предел упругости у текущих рельсов дает нам ключ к пониманию явления текучести в рельсах. Это явление текучести мы наблюдаем и на микроструктуре смятого рельса. Зерна металла у верхнего края головки такого рельса бывают всегда вытянуты (см. фиг. 13, относящуюся к тому же рельсу, как и фиг. 3) в направлении действующего усилия (давления колеса), чего никогда не наблюдается или наблюдается в значительно меньшей степени в рельсах доброкачественных, хорошо сопротивляющихся износу. Это не значит, конечно, что зерна мелкозернистого с высоким пределом упругости металла не способны деформироваться при действии на них растягивающих усилий, а это значит только, что мелкие зерна хорошего рельса значительно лучше сопротивляются этим растягивающим усилиям, почему металл в этом последнем случае и не течет под давлением колеса. Если доброкачественную мелкозернистую сталь подвергнуть более сильному напряжению, например растяжению до разрыва, то в месте разрыва мы будем наблюдать такую же деформацию зерна, как в верхней части головки смятого рельса просто под давлением колеса.

---

nonsens'у пришла русская Рельсовая комиссия (1900—1905 гг.) как коллективное целое.

„Комиссия должна была, к сожалению, констатировать, что надежды ее на обнаружение определенной зависимости между службой рельсов, химическим составом и различными механическими свойствами не оправдались“ (см. труды Рельсовой комиссии, доклад председателя в книге „Выводы“, стр. 313).

Деформируя металл в верхней части головки, мы несомненно повышаем его предел упругости, низкий в первоначальном состоянии, что и объясняет тот факт, что всегда у образца, вырезанного из верхней части головки смятого в пути рельса, предел упругости оказывается значительно выше, чем в образце, вырезанном из средины головки. Поэтому при суждении об упругих свойствах металла смятого рельса надо вырезать образцы из середины головки, а не из верха.

Сильно деформируя металл в верхней части головки, мы не только повышаем его предел упругости, низкий в первоначальном состоянии, но и превращаем металл из пластичного (тягучего) в хрупкий. При сильной деформации металла на холоду значительная часть живого сопротивления вещества теряется (иначе говоря: кинетическая энергия частиц переходит в потенциальный вид), что и делает металл хрупким. Вот почему, мне думается, бо́льшую часть расколов (трещин), иногда наблюдаемых в сильно смятых концах рельсов, надо относить не к усадочным раковинам, а на счет этого именно обстоятельства.

Говоря о пределе упругости и его связи с текучестью металла я все время подразумеваю так называемый предел пропорциональности, определяемый при разрыве нормального образца с помощью зеркального прибора Мартенса.

Вопрос о пределе упругости в стали с практической точки зрения является чрезвычайно важным и поэтому я позволю себе несколько остановиться на этом вопросе.

Как известно, французская Комиссия по выработке методов испытания предложила следующие определения предела упругости.

1) Теоретический предел упругости — максимальная нагрузка (точка A, фиг. 14), отнесенная к 1 *мм*^{2} первоначального сечения, при которой еще не получается постоянного удлинения (остающейся деформации), т. е. если устранить действие этой нагрузки, то образец приходит к своим первоначальным размерам (по крайней мере в течение $^1/_4$ часа) с точностью до $^1/_{1000}$ *мм* при первоначальной длине образца 200 *мм*.

2) Предел пропорциональности — нагрузка, отнесенная к 1 *мм*^{2} первоначального сечения, соответствующая точке P (см. фиг. 14), ниже которой удлинение почти пропорционально нагрузкам (с точностью до $^1/_{1000}$ *мм* при длине 200 *мм* и при изменении нагрузки в 1 *кг* на 1 *мм*^{2} первоначального сечения).

3) Видимый предел упругости — нагрузка, отнесенная к 1 *мм*^{2} первоначального сечения, соответствующая точке F (фиг. 14), выше которой удлинения растут без заметного увеличения нагрузки [2].

На практике обыкновенно определяется видимый предел упругости, причем определение точки F, как говорит та же Комиссия, представляет известную точность только в случае железа и стали отожженных, когда диаграмма имеет ясно выраженную площадку.

В стали закаленной или механически обработанной площадки не наблюдается, и определение точки F тогда довольно произвольно.

Видимый предел упругости (точка F) определяется остановкой, или падением манометрических столбиков или рычагов в машинах для испытаний, или же просто по диаграммам самопишущих приборов как точка излома или нарушения плавной кривой.

Англичане «видимый предел упругости», нызывая его „yield point" (точка излома), определяют как напряжение, соответствующее первой большой и почти внезапной деформации.

„Теоретический" предел упругости и „предел пропорциональности" обыкновенно на практике отождествляются [1].

Предел пропорциональности очень точно, по крайней мере для практических целей, определяется при разрыве образца с помощью зеркального прибора Мартенса[2].

Но, повторяю, для практических целей, при суждении о технических свойствах стали считается вообще достаточным определять только „видимый предел упругости", и этого взгляда придерживаются не только практики, но и люди науки[3].

Вот против этого-то взгляда, по моему мнению, необходимо протестовать. Если обратиться к пределу упругости рельсовой стали, то здесь мы встречаемся со следующими фактами. По данным механической лаборатории Института инженеров путей сообщения, предел пропорциональности одного смятого рельса для образца, вырезанного из середины головки, равен 9,5 *кг/мм**. Тогда как видимый предел упругости, определенный по диаграмме самопишущего прибора, для того же рельса равен 45,5 *кг/мм*². В другом случае, тоже смятого рельса, предел пропорциональности = 14,6. Видимый предел упругости = 47,2. И тот и другой случай относятся к рельсам твердым, с содержанием около 0,6% C, но к заведомо плохим с сильно выражен-

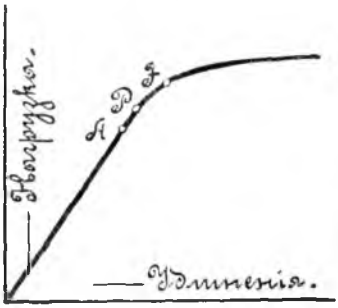
---

[1] Unwin, Testing of Materials of Construction. Fremont, в статье „Mesure de la limite elastique des metaux", Bull. de la Soc. d'enc"., сентябрь, 1903, говорит, что в действительности никто не знает, какая разница между пределом пропорциональности и теоретическим пределом упругости. Одни помещают предел пропорциональности выше теоретического предела, тогда как Lebasteur помещает его ниже.

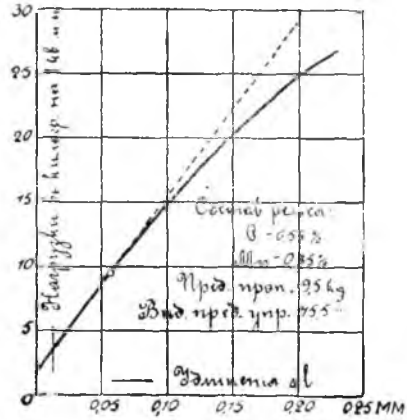
[2] Fremont предлагает определять предел упругости (начало деформаций) по структурному признаку. При начале остающихся деформаций образец меняет свою структуру. Однако наблюдение предела упругости в этом случае требует очень тщательной шлифовки поверхности образца. Кроме того, изменение структуры ясно заметно только у стали с площадкой. Для стали с неясно выраженным переходом за предел упругости (постепенными деформациями) необходимо вести наблюдение в микроскоп. Все это лишает метод Fremont практичности.

[3] Сошлюсь для примера на „Sixth report to the alloys research committee on the heat treatment of steel" покойного Roberts Austen, дополненный проф. William Cowland в „Institution of Mechanical Engineers" 1. 1904.

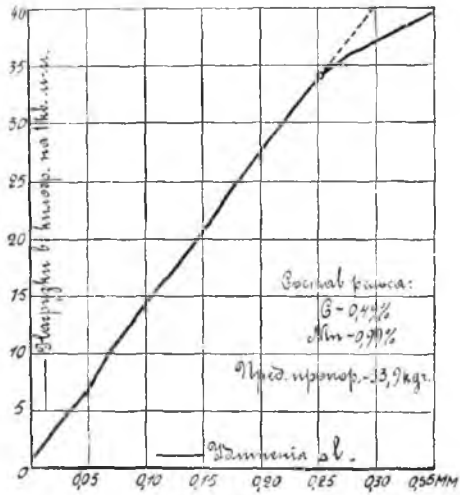
* Структура этого рельса дана на фиг. 3.



Фиг. 14.



Фиг. 15.



Фиг. 16.

ным вытеканием металла. Если бы мы захотели судить об этих рельсах на основании разрывной пробы с определением только видимого предела упругости, то мы должны были бы оба эти рельса отнести к хорошим рельсам, ибо и временное сопротивление (около 70 *кг мм*²), и удлинение (около 15%), и сужение (около 30%), и сопротивление удару (бабой) не отличает их от нормальных, хороших рельсов. На самом же деле и структура их (чрезвычайная крупнозернистость) и отношение к службе говорят совсем о другом.

Из этих примеров (и многих других, — их можно привести сколько угодно) я заключаю, что для случаев, когда металл подвергается вытеканию, видимый предел упругости не имеет связи со структурой металла. А раз это так, значит видимым пределом упругости в данном случае нельзя руководствоваться, а должно руководствоваться только пределом пропорциональности.

Внимательно изучая разрывные диаграммы 170 рельсов трудов Рельсовой комиссии (1900—1905 гг.), я пришел к следующему выводу.

Все диаграммы довольно резко разделяются на два типа.

1) Первый тип диаграмм относится к сильно смятым в пути рельсам. Этот тип характеризуется плавной кривой большого радиуса, постепенно отклоняющейся в направлении оси абсцисс (см. на фиг. 15 вычерченную мной диаграмму этого типа по данным механической лаборатории Института). Предел пропорциональности здесь лежит очень низко. Очевидно, что видимый предел упругости в этом случае будет значительно выше предела пропорциональности.

2) Второй тип диаграмм относится к рельсам, совсем не подверженным смятию (рельсы доброкачественные или типично хрупкие). Этот тип отличается от первого типа тем, что кривая имеет резкий поворот, начиная от предела пропорциональности, лежащего в этом случае значительно выше (см. примерную диаграмму этого типа на фиг. 16). Этот тип приближается к типу диаграмм с „площадкой"; последняя (площадка), как известно, характеризует нормально отожженную сталь. При этом типе, очевидно, расхождение видимого предела упругости и предела пропорциональности может быть и не столь значительное, как в диаграммах первого рода.

Конечно, кроме этих двух типичных диаграмм должны быть (и они действительно есть) промежуточные случаи, когда диаграмма соединяет в себе особенности того и другого типа.

Я обращаю внимание на то, что не потому нельзя пользоваться видимым пределом упругости, что он обыкновенно выше предела пропорциональности, а потому, что это величина неопределенная: в одном случае он может находиться значительно выше, а в другом почти совпадать с пределом пропорциональности.

Мне неоднократно приходилось поражаться той путанице, которая существует в литературе по вопросу о влиянии той или

иной термической или механической обработки на механические свойства стали и в особенности на ее предел упругости. Возьмем, например, самый обыкновенный случай: как влияет отжиг на предел упругости стали.

По данным Howe, приведенным в его сочинении „Metallurgie de l'acier", отжиг понижает предел упругости. Из 26 образцов, приведенных в данной им таблице, только 3 образца стали повысили, благодаря отжигу, свой предел упругости. Остальные образцы все понизили. Это понижение = 2,9 — 29,5% при самом разнообразном составе стали; при C = 0,15 — 1%.

По опытам Бринеля и Вальберга[1], тщательно произведенным с точным определением предела пропорциональности, влияние отжига на предел упругости как раз обратное. Отжиг не понижает, а повышает предел упругости стали против ее естественного состояния.

Сначала мне эти противоречия казались весьма странными и только после того, как отдашь себе ясный отчет в указанных типах диаграмм, эти противоречия объясняются весьма просто. Дело в том, что данные Howe, очевидно, относятся к „видимому" пределу упругости, а данные Бринеля и Вальберга, как они и сами говорят, к „пределу пропорциональности". Если предположить, что сталь в ее естественном состоянии (до отжига) в распоряжении всех авторов имела все те типические особенности структуры, которыми, например, характеризуются текущие рельсы, т. е. если эта сталь была крупнозерниста и с хорошо дифференцированным перлитом, то тогда данные Howe для естественного состояния стали, как относящиеся к „видимому" пределу упругости, сильно повышены против действительного предела упругости (предела пропорциональности), иначе говоря, эти данные сильно повышены против соответствующих данных Бринеля и Вальберга. После отжига сталь дает диаграмму второго типа. В этом случае предел пропорциональности и видимый предел упругости могли если не совпадать, то по крайней мере расходиться не в такой значительной степени, как до отжига. Нет ничего удивительного поэтому, что Howe после отжига получил вместо повышения предела упругости, как это следовало получить, — понижение.

Я разобрал случай отжига стали; такая же путаница и неразбериха существует в вопросе о влиянии закалки стали и пр.

При наличности такой путаницы неудивительно, что при оценке технических свойств стали к пределу упругости относятся в большинстве случаев весьма равнодушно. В технических условиях не только на поставку рельсов, но многих и многих других изделий совсем нет норм для предела упругости. Между тем, это одна из важнейших величин. Не могу не сослаться здесь на

[1] Об этих опытах см. Leon Guillet, „Trempe, recuit, revenu", 1909.

авторитет известного специалиста по сопротивлению материалов Н. П. Петрова. В 1906 г., в заседании Инженерного совета, в котором обсуждались новые технические условия на поставку рельсов, Н. П. Петров заявил: „Занимаясь этим вопросом (т. е. изучением службы рельсов) с 70 годов, я прихожу к тому заключению, что предел упругости, как справедливо полагает и горный инженер Бабошин, имеет громадное значение“ (см. Журнал № 18 заседаний Инженерного совета от 15—22 марта 1906 г.).

Вот по этим-то основаниям я и считаю необходимым протестовать против общераспространенного мнения, что для практических целей достаточно определять видимый предел упругости.

Связывая смятие (текучесть) рельсов с основными элементами структуры стали, я исключаю серьезное влияние на текучесть металла посторонних включений, всегда в большем или меньшем количестве присутствующих в ней, как-то: шлаков, сернистого марганца, а также влияние мелких пустот (пузырей), равно как влияние сегрегации примесей. Я не вижу ни фактических, ни логических оснований приписывать всем этим факторам существенное значение в вопросе смятия.

Что касается до крупных пустот — усадочных раковин, то по этому поводу необходимо заметить следующее. Присутствие закатанной усадочной раковины внутри головки рельса, даже довольно крупных размеров, видимой простым глазом, само по себе не может вызвать смятия (текучести), если металл рельса удовлетворителен в структурном отношении. Среди рельсов, исследованных Рельсовой комиссией (1900 — 1905 гг.) вы найдете 12 рельсов с трещинами усадочного происхождения. Почти все они очень долго служили: 4 рельса из них служили по 24 года. Но замечательно то, что все они по структуре мелкозернисты. Это и подтверждает именно ту мысль, что усадочная пустота (закатанная) сама по себе не вызывает смятия.

Другое дело, если усадочная раковина помещается в рельсе плохо обработанном (крупнозернистом). Здесь деформирование металла, являющееся следствием структуры, несомненно будет ускорено присутствием усадочной пустоты. Конечно, усадочная раковина нежелательна ни в каком случае. Тем не менее не следует переоценивать ее значение, как это часто делается. Приведенные мною факты несомненны и с ними надо считаться.

Перехожу теперь к вопросу о смятии (текучести) в рельсах в связи с их прокаткой на заводах, с одной стороны, и в связи с новыми техническими условиями на поставку их,— с другой.

Нет сомнения, что те структурные особенности, которые присущи сминаемым рельсам, и весьма низкий предел пропорциональности их теснейшим образом связаны с условиями фабрикации рельсов. Условия фабрикации рельсов слагаются из двух важнейших факторов: а) условий нагрева болванок перед прокаткой и б) условий прокатки. При фабрикации рельсов необхо-

димо: избегать перегрева болванок (не говоря уже про пережог) и необходимо катать рельсы при возможно низких температурах.

Доброкачественные рельсы должны быть закончены прокаткой отнюдь не выше 950° (относя эту температуры к самой горячей медленно охлаждаемой части рельса), или, иначе говоря, не выше точки *b* Чернова, если эту точку понимать так, как мы ее понимаем (см. мой доклад в Журнале Р. М. Общ., 1911 г.).

В рельсах с сильным смятием головок неизбежно встречаешься с ненормальностями структуры, обусловленными или слишком горячей прокаткой, или же с комбинацией горячей прокатки и перегрева болванок. И то, и другое в большой степени имеет место, например, в рельсах того завода, о котором я говорил в начале статьи.

Правильный нагрев болванок и прокатка их при надлежащих (низких) температурах несомненно ведут к замедлению темпа производства, а через это к удорожанию фабричной стоимости продукта. Чтобы получить более дешевый продукт, заводу приходится торопиться, но, разумеется, в ущерб качеству этого продукта, т. е. в ущерб потребителю.

Вот взгляд на этот счет американского инженера Иорка [1]:

„В течение последних 40 лет, — говорит он, — все усовершенствования в механической обработке стали, особенно рельсовой, были в направлении увеличения производительности. В то время как 40 лет тому назад выход 150 *m* в 12 часов считался хорошим для стана, в настоящее время производительность поднялась до 1200 *m*. Это увеличение выхода металла — главная причина плохой службы рельсов. Ныне рельс, имеющий вес 100 фун. на ярд, проходит через 15—20 ручьев, тогда как раньше рельс, имеющий 60—65 фун. на ярд, проходил 30 и более ручьев“.

Последний тип, указанный инженером Иорком, как раз соответствует типу рельсов того завода, о котором я говорил в начале статьи (24 фунта на погонный фут), которые, однако, прокатаны только в 19 ручьях.

Иорк считает необходимым вести прокатку по методу систематической обжимки металла. 14″ болванка по Иорку, чтобы быть прокатанной в 24-фунтовый рельс, требует 32 прохода. Ныне 22″ болванка, весящая 2 *m*, катается в 4 рельса при 15—20 проходах. Ясно, что значительно более высокая начальная температура прокатки и менее эффективная работа на материал, в результате приводят к худшим качествам рельсов. Под взглядом инженера Иорка безусловно можно подписаться. Но говоря о нашем рельсовом производстве, к уже сказанному необходимо присоединить еще специально русские условия, усугубляющие все воз-

---

[1] См. „The physical qualities of steel in relation to its mechanical treatment“, „The Journal of the Iron . . .“, № 1, 1908.

можные недостатки при фабрикации рельсов. Таковыми условиями являются: отсутствие у нас свободной конкуренции между заводами, невысокий уровень техники и неурегулированность производства.

С 1 января 1908 г. у нас в России введены (право испытывать рельсы по новым техническим условиям по соглашению с заводами было предоставлено еще в 1906 г.) новые технические условия на поставку рельсов в отмену старых.

Новые технические условия в существенных чертах отличаются от старых следующими особенностями.

1) Испытание рельсов производится по плавкам. По старым техническим условиям испытание призводилось по партиям, в которую (партию) могли входить рельсы различных плавок. Испытание по плавкам, или, точнее, по партиям, отнесенным к определенным плавкам, имеет целью гарантировать однородность хотя бы в химическом отношении зараз испытываемого материала рельсов.

2) Из нескольких механических норм, бывших обязательными при старых технических условиях, в новых технических условиях сохранена только ударная проба. Зато эта проба введена более строгой. Прежде били 5 фут. кусок рельса, лежащий на двух опорах в расстоянии 3,5 фут., одним ударом бабы, весящей 30 пудов и падающей с определенной высоты, в зависимости от типа рельса. По новым техническим условиям бьют той же бабой и с той же высоты не один раз, а два раза. При этом рельс не должен обнаруживать никаких наружных признаков излома, а может только изгибаться. Величина стрелы прогиба после первого удара не должна быть более 75 *мм* и менее 30 *мм*.

3) Из каждой партии рельсов, соответствующей недельной производительности завода, выбирается один рельс из числа тех плавок, для которых имеется полный химический анализ и отмечена температура начала и конца прокатки и вообще имеются наиболее полные данные. Из этого рельса вырезают 4 образца и испытывают на разрыв с определением предела упругости (хотя бы по диаграмме самопишуших приборов). Предел упругости не должен быть менее 30 *кг/мм*^{2}.

Для завода обязательны еще масса других испытаний рельсов, но все они факультативного характера, т. е. не служат основанием к браковке.

Если теперь задать себе вопрос: возможно ли, испытывая рельсы по этим новым техническим условиям, забраковать негодные в смысле текучести? Ответ надо дать безусловно отрицательный.

Невозможно. И в частности рельсы того инкриминируемого завода, о котором я говорил в начале статьи, как нельзя лучше подтверждают это: эти рельсы удовлетворяют одинаково хорошо и старым и новым техническим условиям. Выше я уже приводил пример двух сильно смятых в пути рельсов, которые вполне

удовлетворяют новым техническим условиям. Оба они великолепно выдержали ударную пробу (два удара). Оба дали высокий „видимый“ предел упругости (по диаграмме самопищущего прибора) — свыше 45 *кг мм*². И это относится ко всем вообще рельсам со смятием головок.

В Рельсовой комиссии (1900—1905 гг.) я очень много и долго боролся за то, чтобы в технические условия, кроме ударной пробы, была введена хотя какая-нибудь норма, контролирующая обработку рельсов. Я настаивал на этом, имея в виду те специально русские условия производства рельсов, о которых я говорил выше. Но громадное большинство членов Рельсовой комиссии, вместе с Отделом по испытанию, стояли на той точке зрения, что „единственно руководящими являются в данном случае лишь результаты испытаний на удар бабой“ (см. записку „Отдела“ в книге „Выводы“, стр. 101).

Контроль над обработкой, с моей точки зрения, можно мыслить в двух направлениях: или ввести норму для предела пропорциональности (а не „видимого“ предела упругости), или следить за температурами нагрева болванок и температурами начала и конца прокатки.

То и другое бузусловно отрицалось. В той же записке „Отдела“ читаем: „Увлечение теоретиков новейшими открытиями в области металлургии доходит до того, что раздаются голоса, требующие введения в технические условия непременного требования, чтобы обработка рельсов происходила при известной температуре . . . но лицам, близко знакомым с заводским делом известно, насколько трудно даже самой заводской администрации уследить за точным исполнением рабочими подобного требования, следить же приемщику за нагревом и прокаткой сотен рельсовых болванок в сутки не представляется физически возможным“ (см. „Записку“, стр. 51).

Однако один из таких нетеоретиков, но близко знакомый с заводским делом . . . инженер И. И. Ясюкович — директор Днепровского металлургического общества—как раз именно предлагал ввести в технические условия такой контроль, отрицая пользу от испытания рельсов по плавкам (см. его „Записку“ в трудах Рельсовой комиссии). Справедливость требует сказать, что другие заводчики этого предложения не поддержали.

Что касается до нормы, относящейся к пределу упругости, то мне можно возразить: ведь норма эта (30 *кг/мм*²) у нас введена. Но, во 1) норма эта относится к недельной производительности; во 2) к ней прибавлены слова: „хотя бы по диаграмме самопишущих приборов“ — слова, уничтожающие ее смысл, как это ясно из вышеизложенного, и 3) попала эта норма в новые технические условия совершенно случайно. В Инженерном совете громадным большинством голосов — 16 против 5, — обязательность этой нормы была отвергнута, но министр путей сообщения присоединился к меньшинству.

ВЫВОДЫ

1) Обычное представление о смятии (текучести) в рельсах как результате мягкости металла неправильно. Вытеканию могут быть подвергнуты и твердые в обычном смысле рельсы.

2) Текучесть металла в рельсах тесно связана с основными элементами структуры стали, т. е. величиной зерна, с одной стороны, и построением перлита,—с другой, что, в свою очередь, зависит от термической и механической обработки рельсовой стали.

3) Зернистая (клеточная) структура присуща всякой стали.

4) Текущие рельсы имеют очень низкий предел пропорциональности, тесно связанный опять-таки с основными элементами структуры, а также с термической и механической обработкой.

5) При испытании рельсов, равно как и других изделий, на разрыв необходимо руководствоваться только пределом пропорциональности. Так называемый видимый предел упругости, определяемый, например, по диаграммам самопишущих приборов, вообще говоря, не имеет никакой связи со структурой стали. Пользованием видимым пределом упругости вносится только путаница в общие представления о технических свойствах стали и тем подрывается всякое доверие к этой важнейшей величине.

6) Нормы новых технических условий Министерства путей сообщения на поставку рельсов не гарантируют принятые по ним рельсы от последующего смятия (текучести) в пути.

СТРУКТУРНО СВОБОДНЫЙ ЦЕМЕНТИТ В МЯГКОЙ СТАЛИ [1]

(Из химической лаборатории Института инженеров путей сообщения)

А. Л. БАБОШИН

В химическую лабораторию Института путей сообщения как-то поступила на исследование железнодорожная ось, которая сломалась под товарным вагоном Московско-Курской ж. д. В стружке, взятой из центральной части темплета (вырезанного перпендикулярно длине оси) этой оси, найдено C = 0,17; Mn = 0,39; Si = 0,026; P = 0,059; S = 0,069%. Микроструктура оси (шлиф сделан в том месте, откуда взята стружка для анализа) видна из фиг. 1. Химический состав и микроструктура на первый взгляд совершенно нормальны, и причина излома оси представлялась непонятной. Однако при более детальном исследовании оказалось что ось содержит значительное количество структурно свободного цементита, видного уже при малом увеличении (110 раз) и обыкновенном травлении шлифа пикриновой кислотой, в форме тонких светлых оторочек вокруг перлитовых участков (см. фиг. 1) При большем же увеличении и при травлении шлифа пикратом натрия [2] (в течение 1—2 час.), структурно свободный цементит рельефно выступает в виде (см. фиг. 2, при увеличении 960 раз) либо темных оторочек вокруг перлитовых участков, либо отдельных самостоятельных нитей [3]. Оторочки и нити не везде одинаковой толщины. Иногда оторочка занимает только часть перлитового участка (фиг. 3 и 4).

В нормальной стали структурно свободный цементит отсутствует (см. фиг. 5, при увеличении тоже 960 раз). Фиг. 5 относится к стали (спица паровозного колеса), близкой по составу к рассматриваемой оси, а именно; C = 0,18, Mn = 0,61%.

На присутствие структурно свободного цементита в мягкой стали впервые указал Стед [4] в 1904 г., и им же были указаны условия его образования.

---

[1] Доложено Р.М.О. 5 марта 1915 г.

[2] 2 *г* кристаллической пикриновой кислоты на 100 *см*³ 25 %-ного водного раствора едкого натра.

[3] Как известно, структурно свободный цементит в доэвтэктоидной стали встречается еще в форме так называемого зернистого перлита. В этой статье я буду говорить исключительно о структурно свободном цементите в форме оторочек и нитей.

[4] E. Stead, Migratory Habit of Solids in Alloy, „The Iron and Steel Metallurgist and Metallographist“ № 2, 1904.

По Стеду структурно свободный цементит образуется:

1) при условиях очень медленного перехода стали через нижнюю критическую точку Ar_1, при температуре, близкой к этой точке, но после выделения перлита;

2) при малом содержании С в стали. Количество перлита в отношении феррита должно быть небольшое — 5—10%; при содержании перлита 10—50% образование структурно свободного цементита хотя и происходит, но в меньшей степени; наконец, при одном перлите структурно свободный цементит совсем не образуется;

3) образование структурно свободного цементита происходит вследствие слияния (коалесценции) отдельных тонких пластинок цементита перлита в более крупные массы. При этом феррит перлита в то же время стремится слиться со структурно свободной массой феррита. При полном слиянии перлит совершенно исчезает: остается только феррит и цементит в структурно свободных выделениях. Ту силу, которая толкает на такое слияние, Стед называет „кристаллическим притяжением". „Кристаллическое притяжение" имеет место только при наличности структурно свободных масс феррита или цементита, иначе говоря — в доэвтектоидной или заэвтектоидной стали, и совсем не имеет места в эвтектоидной стали. Говоря, что структурно свободный цементит образуется в условиях очень медленного перехода через нижнюю критическую точку, Стед не говорит, однако, при какой именно скорости должен происходить этот переход.

Н. Т. Беляев[1] наблюдал структурно свободный цементит в виде оторочек вокруг перлитовых участков, в стали с С = 0,55% (сплав № 8), при скорости охлаждения от 700 до 600° около 6 час.

Как из статьи Стеда, так и из статьи Н. Т. Беляева, не видно, встречается ли структурно свободный цементит в обыкновенной издельной стали, т. е. в стали, получаемой в обычных условиях охлаждения, при прокатке или проковке ее на заводах. Мы видели только что, что структурно свободный цементит встречается, и притом в резко выраженной форме, в самом обыкновенном изделии — железнодорожной оси, не подверженной никакой специальной термической обработке (отжигу). Неполнота данных заставила меня проделать опыты с целью выяснения условий образования структурно свободного цементита в мягкой стали.

Исходным материалом для опытов послужила сталь вышеупомянутой железнодорожной оси, имеющей состав С = 0,17; Mn = 0,39; Si = 0,026; P = 0,059; S = 0,069%.

Из центральной части оси, по длине ее, были вырезаны 3 небольшие образца квадратного сечения (около 1 *см* в стороне и около 2 *см* длиной), с которыми и были проделаны все термические операции.

Нагрев образцов производился в печи Гереуса с диаметром

[1] „Кристаллизация и структура стали при медленном охлаждении", 1909.

трубки 65 *мм*. Во избежание выгорания углерода, образцы во время всех опытов, держались под слоем легкоплавкой смеси солей 1 часть $BaCl_2$ + 2 части KCl (с температурой плавления около 650°). Температуры измерялись с помощью термопары Ле-Шателье и гальванометра Сименс и Гальске. Показания на гальванометре проверены по постоянным точкам: температуре застывания сурьмы (чистой — Кальбаумской) и серебра. Для сурьмы показание гальванометра оказалось = 620°, при температуре холодного спая 20° С. Истинная температура застывания сурьмы = 631° С. Отсюда: истинная температура = показанию гальванометра — 0,54 × температура холодного спая. Коэфициент 0,54 вполне отвечает данному Фогелем коэфициенту *K* для 600°. Температура холодного спая в наших опытах колебалась от 25 до 30° С. Согласно с температурами холодного спая приходилось вводить поправки, прибавляя к показаниям гальванометра от 13 до 15°.

В нижеприведенной таблице сгруппированы все данные по термическим операциям с вышеуказанными тремя образцами стали, помеченными номерами 1, 2 и 3, при чем образец № 1 подвергался одному нагреву, образец № 2 — двум нагревам, а образец № 3 — пяти последовательным нагревам.

Опыт № 1 иллюстрируется двумя снимками (см. фиг. 6 и 7). Оба снимка получены с одного шлифа после вытравления его пикратом натрия. Это случай быстрого охлаждения образца, нагретого до 995°, вместе с печкой. Однако уже при этом охлаждении (скорость охлаждения = 10° в 1 мин. в интервале 695—654°) успело выделиться заметное количество структурно свободного цементита, особенно по границам малых участков перлита, а также в виде отдельных нитей (см. фиг. 6). По границам более крупных участков перлита в этом случае наблюдаются только зачатки структурно свободного цементита (см. фиг. 7).

В опыте № 2 (по порядку) образец, нагретый при тех же условиях, но охлажденный медленнее (скорость охлаждения = 1° в 1 мин. в интервале 695—664°), дал значительно больше структурно свободного цементита (см. фиг. 8 и 9), чем в предыдущем случае.

Опыты № 3, 4 и 7 (по порядку) дали одинаковые результаты, иллюстрируемые фиг. 10 (фиг. относится к опыту № 4). В этих случаях получилось еще больше структурно свободного цементита, по количеству близкого к тому, что имелось в исходном материале оси (сравни с фиг. 2 и 3).

Опыт № 3 производился в условиях медленного охлаждения в интервале 675—649° (скорость охлаждения = 0,4° в 1 мин.) и быстрого охлаждения до 675°, тогда как опыт № 4 производился в условиях столь же медленного охлаждения в интервале 695—675° (скорость охлаждения = $^1/_3$° в 1 мин.), но быстрого в интервале 675—654°. Результат в обоих случаях получился один и тот же. Это, на первый взгляд, странное обстоятельство можно истолковать следующим образом.

№ опытов по порядку	№ образцов	№ нагрева с каждым образцом	Температуры	Время в мин.	Скорость охлаждения (либо нагрева) в ° в 1 мин.
1	1	1	Нагревался при 995°	10	—
			Охлаждался в интервале 995—695° . . .	11	27
			„ „ „ 695—654° . .	4	10
2	2	1	Нагревался при 995°	10	—
			Охлаждался в интервале 995 - 695° . . .	13	23
			„ „ „ 695—664° . .	29	1
3	2	2	Нагревался при 995°	10	—
			Охлаждался в интервале 995—675° . . .	14	23
			„ „ „ 675—649° . . .	61	0,4
4	3	1	Нагревался при 995°	10	—
			Охлаждался в интервале 995—695° . .	16	19
			„ „ „ 695—675° . . .	60	1/3
			„ „ „ 675—654° . . .	3 1/2	6
5	3	2	Нагревался в интервале 673—693°	60	1/3
			и охлаждался затем в воздухе	—	—
6	3	3	Нагревался при 743°	30	—
			и охлаждался в воздухе	—	—
7	3	4	Нагревался при 793°	10	—
			Охлаждался в интервале 793—694° . . .	6	16,7
			„ „ „ 694—674°	60	1/3
8	3	5	Нагревался при 793°	30	—
			и охлаждался в воздухе	—	—

[1] После исправления на температуру холодного спая.

Структурно свободный цементит образуется при охлаждении стали, нагретой выше критических точек. При этом, образуется ли он путем непосредственного выделения из твердого раствора одновременно с перлитом, или же, как думает Стед, путем слияния (коалесценции) отдельных пластинок цементита уже после выделения перлита, — во всяком случае его образование (или выпадение) совпадает или почти совпадает с точкой Ar_1. Для образования структурно свободного цементита важно именно задержать охлаждение стали при переходе ее через эту точку. Но точка Ar_1, как известно, всецело зависит от скорости охлаждения: она тем выше, чем медленнее охлаждение. Быстрое охлаждение способствует переохлаждению и тем понижает критическую точку Ar_1. Ясно, следовательно, что в опыте № 3 точка Ar_1 понижена по сравнению с опытом № 4. Этим можно объяснить, что при быстром охлаждении стали вплоть до 675° и медленном, начиная от этой температуры, структурно свободный цементит выделился в столь же значительном количестве, как и в том случае, когда сталь охлаждалась медленно в интервале 695—675° и быстро, начиная от 675°. В обоих случаях имел место одинаково медленный переход через критическую точку Ar_1.

В опыте № 7 охлаждение было такое же, как в опыте № 4, с тою лишь разницей, что максимальная температура нагрева образца была значительно ниже, именно 793° вместо 995°. Путем этого опыта мне хотелось проследить, не отражается ли температура начального нагрева на количестве выделившегося структурно свободного цементита. Оказалось, что не отражается.

Опытами № 5, 6 и 8 имелось в виду выяснить условия перехода образовавшегося структурно свободного цементита обратно в твердый раствор. Для этого образец с резко выделившимся структурно свободным цементитом (после опыта № 4) был сначала (опыт № 5) нагрет в том же интервале температур (673—693°) и такое же время (60 мин.), в каковом интервале и в каковое время структурно свободный цементит выделился при охлаждении в опыте № 4. После нагревания образец был извлечен из печи и охлажден на воздухе. Оказалось, что структурно свободный цементит, выделившийся при охлаждении в интервале температур 695—675° в течение 60 мин., совсем не переходит в твердый раствор при обратном нагревании в том же интервале и в течение того же самого времени. Количество структурно свободного цементита после опыта № 5 не изменилось. Выпадение из твердого раствора при охлаждении и обратный переход в твердый раствор при нагревании не являются, следовательно, процессами обратимыми

После нагревания того же образца до более высокой температуры, а именно, при 743° в течение 30 мин. с последующим охлаждением на воздухе (опыт № 6), структурно свободный цементит в значительной степени перешел в твердый раствор, однако, не весь, часть его, в виде отдельных клочков, осталась (см. фиг. 11).

Только после нагревания при 793° в течение 30 мин. с последующим охлаждением на воздухе весь структурно свободный цементит исчез. Из этого лишний раз следует, как трудно перевести цементит в твердый раствор. Из твердого раствора цементит выделяется с гораздо большей скоростью, чем переходит в него.

Из предыдущих опытов ясно, что структурно свободный цементит в мягкой стали (С около 0,2%) образуется легко; замедление охлаждения, при переходе через Ar_1, до скорости 1° в мин. приводит к выделению значительного количества структурно свободного цементита; даже при скорости охлаждения 10° в 1 мин. структурно свободный цементит выделяется в заметном количестве. Только охлаждение на воздухе (малого образца) предупреждает выделение структурно свободного цементита. Можно сказать, следовательно, что в условиях охлаждения стали на практике (на заводах, при прокатке или проковке изделий) структурно свободный цементит непременно должен выделяться.

Однако к последнему выводу необходимо вносить поправку. Помимо углерода, о котором уже говорилось, необходимо, считаться с содержанием марганца в стали. Mn в значительной степени парализует выделение структурно свободного цементита.

Мной исследовано было на содержание структурно свободного цементита всего 11 изделий: 7 осей (из них 2 оси сварочные), 2 рельса и 2 спицы от паровозного колеса (одна спица в отожженном состоянии, другая без отжига). Структурно свободный цементит в значительном количестве был найден в 5 изделиях (4 оси и 1 спица, отожженная на заводе). Все эти изделия содержат мало С (около 0,2%) и мало Mn $< 0{,}6\%$ (за исключением, впрочем, отожженной спицы, которая содержит Mn 0,61%). В остальных 6 изделиях структурно свободный цементит либо совсем не найден, либо найден в незначительном количестве, и все эти изделия содержат либо много углерода и марганца (рельсы), либо мало С, но относительно много Mn $> 0{,}6\%$ (оси).

Все 5 изделий со значительным количеством структурно свободного цементита оказались хрупкими, сломались во время службы. Конечно, у нас нет данных для категорического утверждения, что все эти изделия сломались по причине большого содержания в них структурно свободного цементита, но во всяком случае в таком предположении нет ничего невероятного. Несомненно, что присутствие значительного количества хрупкого структурно свободного цементита, и притом в форме не зерен, а оторочек и нитей, не может не отразиться вредно на службе изделия.

Если это так, тогда получается такой, как бы парадоксальный, вывод: чем меньше С и Mn содержит в себе изделие и, чем медленнее оно охлаждено при обработке, тем оно хрупче. Этот вывод кажется парадоксальным потому, что мы привыкли думать как раз наоборот: чем больше С и Mn содержит в себе изделие и чем быстрее оно охлаждено при обработке, тем оно хрупче. Последнее положение, вообще говоря, верно. Однако, в факте образования структурно

свободного цементита мы видим как бы предупреждение против увлечения мягкостью металла и медленностью его охлаждения при обработке.

Фиг. 1, 12 и 13 (при небольшом увеличении в 140 раз и травлении пикриновой кислотой) иллюстрируется общая картина осевой стали с значительным количеством структурно свободного цементита. При этом фиг. 1 и 12 относятся к натуральным осям, как они получены на заводах. Фиг. 1 относится к оси (C = 0,17; Mn = 0,39%), из которой были вырезаны образцы для наших опытов, снимок 12 — к другой оси другого завода. Состав[1] последней оси C = 0,15; Mn = 0,56%. Обе эти оси можно считать весьма близкими по составу. Фиг. 13 относится к образцу, вырезанному из первой оси и термически обработанному на получение в нем значительного количества структурно свободного цементита (см. опыт № 4).

Фиг. 14 и 15 иллюстрируется общая картина структуры (при том же увеличении в 140 раз и травления шлифов пикриновой кислотой) тоже осевой стали, но при полном отсутствии или слабом присутствии структурно свободного цементита. Фиг. 14 относится к натуральной оси, имеющей состав C=0,19; Mn=0,66%. В этой оси структурно свободный цементит совершенно отсутствует. Фиг. 15 относится к образцу, вырезанному из оси (C = 0,17; Mn = 0,39%) и термически обработанному на получение в нем малого количества структурно свободного цементита (опыт № 1).

В конце концов, можно сказать, что все пять фиг. 1, 12, 13, 14 и 15 относятся к материалам, близким по составу. Однако, разница в структуре их весьма значительна, а именно: все снимки, относящиеся к стали с значительным содержанием структурно свободного цементита, обнаруживают значительно меньшую площадь перлита, чем снимки, относящиеся к стали, не содержащей структурно свободного цементита. И это понятно, если вспомнить, что одно и то же количество C распределяется в первом случае между перлитом (с 0,9% C) и структурно свободным цементитом (6,66% C), а во втором — только между перлитом. Ясно, что на снимках углеродистая составляющая в первом случае должна занимать значительно меньшую площадь, чем во втором.

Помимо условий образования структурно-свободного цементита, интересным вопросом является самый механизм его образования. Выше мы уже говорили, что по Стеду образование структурно свободного цементита происходит вследствие слияния (коалесценции) отдельных тонких пластинок цементита в перлитовых участках под влиянием „кристаллического притяжения“. Самое слияние, как показывают фиг. (см. фиг. 16 и 4), происходит так. Каждая пластинка цементита данного перлитового участка с одного и другого конца (иногда только

[1] Состав в этом и в других случаях строго отвечает микроструктуре, ибо стружка для анализа бралась из того же места, откуда делался снимок.

с одного конца) начинается утолщением. При значительном развитии утолщения соседних пластинок сливаются между собой и тогда образуется одна сплошная оторочка из цементита. На фиг. 16 утолщения с того и другого конца пластинок цементита незначительны и еще разграничены, не слиты между собой, на снимке же 4 утолщения весьма значительны и почти слились. Полное слияние видно, например, на фиг. 2. Здесь мы видим сплошную оторочку цементита вокруг перлитового участка. Но хотя оторочка в данном случае и сплошная, тем не менее видно, что она неразрывно связана с пластинками цементита перлитового участка, видно, как некоторые пластинки как бы пронизывают эту оторочку. Не всегда, однако, формирование цементитных оторочек происходит таким способом. На фиг. 3 видно, что оторочка идет параллельно пластинкам цементита перлитового участка. Здесь, следовательно, не может быть и речи о формировании оторочки вследствие слияния утолщений на концах цементитных пластинок. То же видно и на фиг. 16. Здесь в одном месте сплошная оторочка также идет параллельно пластинкам цементита. Если теория Стеда об образовании структурно свободного цементита верна, тогда приходится допустить, что слияние пластинок происходит не только на концах, но и по длине их.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

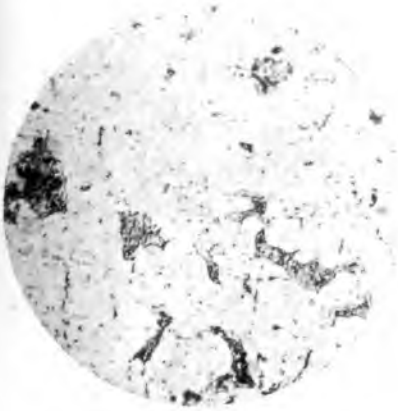
1) Структурно свободный цементит в форме оторочек и нитей часто наблюдается в изделиях из мягкой доэвтектоидной стали (содержащей около 0,2% C), полученных в обычных заводских условиях без специальной термической обработки.

2) Скорость охлаждения стали при переходе ее через первую критическую точку Ar_1 оказывает несомненное влияние на степень выделения структурно свободного цементита.

Для получения структурно свободного цементита в названной форме в значительном количестве нет надобности, однако, в очень медленном охлаждении. Сталь, сдержащая мало Mn (не $>$ 0,6%), дает заметное количество структурно свободного цементита уже при скорости охлаждения 10° в 1 мин. (в интервале 695—655°) и значительное количество структурно свободного цементита при скорости охлаждения 1° в 1 мин. (в интервале 695—665°).

3) Марганец оказывает на получение структурно свободного цементита, повидимому, еще большее влияние, чем скорость охлаждения. При содержании Mn свыше 0,6% и при обычных условиях (заводских) охлаждения структурно свободный цементит в форме оторочек и нитей почти не образуется.

4) Как фактор, могущий дурно влиять на службу изделий, структурно свободный цементит заслуживает большего внимания и изучения, чем ему уделялось до сих пор.



Фиг. 1. × 140.

Фиг. 2. × 960.

Фиг. 3. × 960.

Фиг. 4. × 960.

Фиг. 5. × 960.

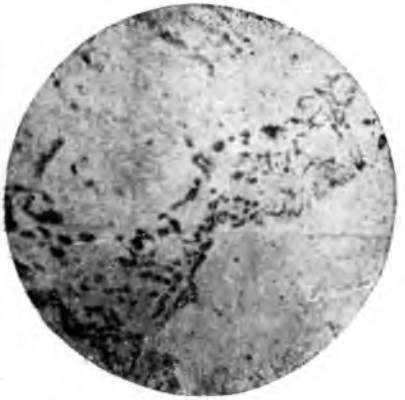
Фиг. 6. × 960

Фиг. 7. × 960.

Фиг. 8. × 960.

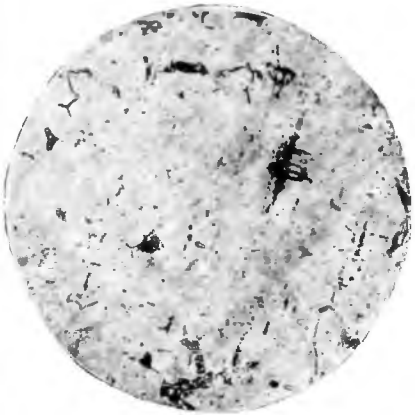
Фиг. 9. × 960.

Фиг. 10. × 960.

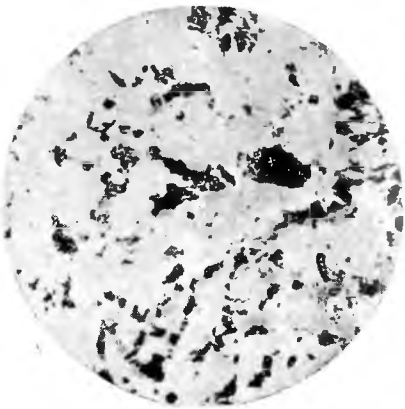


Фиг. 11. × 960.

Фиг. 12. × 140



Фиг. 13. × 140.



Фиг. 14. × 140.

Фиг. 15. × 140.

Фиг. 16. × 960.

ПРИМЕЧАНИЯ РЕДАКЦИИ К СТАТЬЯМ А. Л. БАБОШИНА

I. „СМЯТИЕ (ТЕКУЧЕСТЬ) В РЕЛЬСАХ"

1. Печатается из „Журнала Русского металлургического общества" за 1912 г., № 4, стр. 523—542.

2. Под „видимым пределом упругости" автор подразумевал величину, которая впоследствии получила название „предел текучести".

II. „СТРУКТУРНО СВОБОДНЫЙ ЦЕМЕНТИТ В МЯГКОЙ СТАЛИ"

Печатается из „Журнала Русского металлургического общества" за 1915 г. № 5, ч. I, стр. 561.

МИХАИЛ ГРИГОРЬЕВИЧ ОКНОВ

Михаил Григорьевич Окнов (1878—1942 гг.)

М. Г. ОКНОВ (1878—1942)

Быстрый рост промышленности в конце XIX и начале XX вв. в России потребовал увеличения технических кадров, в связи с чем появилась необходимость расширения сети высшего технического образования. В Петербурге в 1902 г. открылось самое крупное высшее техническое учебное заведение России — Петербургский политехнический институт, с развитием которого связаны славные имена акад. Н. С. Курнакова, акад. А. А. Байкова, акад. М. А. Павлова, проф. А. А. Ржешотарского и других ученых. В числе их был также д-р техн. наук проф. М. Г. Окнов, который посвятил Политехническому институту свыше 35 лет своей жизни.

Михаил Григорьевич Окнов родился 15 сентября 1878 г. в селе Каледине Тверской губернии. Среднее образование он получил в Тверской духовной семинарии. Имея склонность к естественным наукам, Михаил Григорьевич Окнов решает поступить в университет. Но для этого ему пришлось сдать экзамены экстерном для получения аттестата зрелости в петербургской Введенской гимназии. В 1897 г. он поступил на естественное отделение физико-математического факультета Петербургского университета. За участие в студенческих волнениях по приказу министра просвещения Витте он был „отдан на год в солдаты". Михаил Григорьевич окончил университет в 1904 г. с дипломом первой степени по химической специальности. Еще будучи студентом, Михаил Григорьевич с 1901 по 1903 г. работал в качестве химика в Петербургском арсенале и на чугуноплавильном заводе „Ладога". С 1903 по 1905 г. он занимал должность заведующего металлографической лабораторией Обуховского сталелитейного завода.

В 1906 г. М. Г. Окнов участвовал в экспедиции по исследованию воды Ладожского озера и заведывал химической лабораторией экспедиции в Шлиссельбурге. В 1907 г. он поступил на работу в Петербургский политехнический институт, где прошла вся его основная деятельность вплоть до смерти. До 1917 г. Михаил Григорьевич работал в должности лаборанта на кафедре общей металлургии, которую возглавлял акад. А. А. Байков.

Первая печатная работа М. Г. Окнова появилась в 1911 г[1]. Из нее уже видно, что научная деятельность Михаила Григорьевича определилась в направлении металлографии. В следующем 1912 г. М. Г. Окнов публикует в „Журнале Русского металлургического общества“ и в журнале „Ferrum“[2] свою знаменитую работу „Изменение объема стали при закалке“. В этой замечательной работе автор выступает как зрелый исследователь и блестящий экспериментатор. Далее, в 1915 г., он публикует новую статью[3], где рассматриваются объемные изменения при закалке цветных металлов

Расцвет научно-преподавательской деятельности Окнова начинается с Великой Октябрьской социалистической революции. Внимание, которое оказывает молодая советская власть научным работникам, отражается на судьбе Михаила Григорьевича. С 1917 г. он занимает в Политехническом институте штатную должность преподавателя, а с 1925 г. переходит на должность доцента. Его учебная работа заключается в чтении лекций по курсам технологии металлов, металлографии и топлива на разных факультетах института, а также в руководстве лабораторными занятиями по общей металлургии, металлографии и горнозаводскому анализу. Кроме того, в 1919 г. он работает в Центральной научно-исследовательской лаборатории в качестве помощника заведующего отделом металлографии. Далее с 1920 по 1929 г. он работает преподавателем в Военно-морской академии.

В период 1917—1930 г. продолжается также его интенсивная научно-исследовательская и научно-литературная деятельность. В периодической печати появляется ряд статей, где сообщаются результаты научных исследований Окнова. Из этих работ следует отметить три статьи[4], в которых автор продолжает развитие своей основной темы о превращениях в металлах в связи с изменением объема. В этот же период он создает свои первые учебники — „Производство металлов и их основные свойства“ (1925 г.) и „Топливо и его сожигание“ (1925 г). Последняя книга получила широкое распространение. Этот учебник с 1925 по 1935 г выдержал четыре издания.

Некоторый период, а именно с 1929 по 1931 г., Окнов работает по совместительству в Государственном физико-техническом институте в качестве заведующего отделом металлографии, где он проводит исследования по тематике этого института, но затем в связи

---

[1] Окнов М. Г., К вопросу о внутреннем строении перлитной стали, „Журнал Русского металлургического общества“ № 2, ч. 2, 1911, стр. 143

[2] „Журнал Русского металлургического общества“ № 5, ч. 1, 1912, стр. 616—632; „Ferrum“ вып. XI, 1913, стр. 1.

[3] Окнов М. Г., Изменение объема металлов при закалке, „Журнал Русского металлургического общества“ № 3, ч. 1, 1915, стр. 616—632

[4] Окнов М. Г., Влияние закалочной среды на изменение объема при закалке, „Вестник металлопромышленности“ № 4, 1923, стр. 51—60; Окнов М. Г., Явление наклепа в котельном железе, „Металлург“ № 2, 1927, стр. 5—12; Окнов М. Г., Изменение удельного объема железа и стали при наклепе, „Журнал Русского металлургического общества“ № 1, ч. 1, 1928, стр. 1—14.

с большой нагрузкой по основной работе всецело отдается научно-педагогической деятельности.

С 1930 г. М. Г. Окнов занимает должность профессора и заведующего кафедрой металлографии в Ленинградском металлургическом институте, одновременно читая курс металлографии в Физико-механическом институте[1]. С 1934 г. весь остальной период своей жизни он заведует кафедрой металлографии в Ленинградском индустриальном, а впоследствии Политехническом институте им. Калинина.

В начале 30-х годов Михаил Григорьевич создает свой выдающийся труд „Металлография чугуна". Первое издание этой книги вышло в 1933 г. Она была написана М. Г. Окновым на основе курса, который он читал в Политехническом институте. Эта книга является первым в мире специальным учебником, где подведен итог и сделана критическая обработка громадного материала, опубликованного к тому времени в мировой литературе, о свойствах и структуре чугуна. В этой книге очень ярко выявился замечательный талант автора как преподавателя. В предисловии к первому изданию он пишет, что „при создании книги приходилось опасаться излишнего нагромождения фактического материала и из всего многообразия последнего выбирать лишь наиболее типичное, бесспорное и понятное"[2]. Второе издание, дополненное новыми данными, вышло в 1938 г. В предисловии к нему автор указывает, что „книга попрежнему сохраняет характер краткого учебника, но претендует все же на возможно полный охват современных взглядов и новейших фактов, относящихся к чугуну". Автору удалось в очень сжатой форме дать строго научное обобщение громадного материала. В то же время книга написана ясным, простым языком и очень легко читается, несмотря на сжатость изложения. Книга М. Г. Окнова „Металлография чугуна" сохранила свое значение до настоящего времени. До сих пор она является настольной книгой всех инженеров и техников, имеющих дело с чугуном и чугунным литьем. До сих пор по этой книге учатся студенты металлургических и машиностроительных втузов разных специальностей.

Из других научно-учебных трудов М. Г. Окнова следует отметить изданные им лекции „Основы металлографии" (ГОНТИ, 1938 г.), „Чугун в отливках" (1939 г.), „Термическая обработка черных металлов" (1940—1941 гг.). Для полной характеристики М. Г. Окнова как преподавателя нельзя не отметить его замечательный лекторский талант, его уменье в живой, увлекательной форме передавать аудитории свои мысли в удивительно ясном и понятном изложении.

Рассматривая деятельность Михаила Григорьевича как исследователя, необходимо указать на одну особенность. Почти все экспе-

---

[1] Ленинградский металлургический и физико-механический институты — это части Политехнического института, на которые он был на некоторый период разделен. Впоследствии они снова вошли в качестве факультетов в объединенный Ленинградский индустриальный, ныне Ленинградский политехнический институт им. Калинина.

[2] Окнов М. Г., Металлография чугуна, Металлургиздат, 1933.

рименты Михаил Григорьевич выполнял лично, своими руками. Это относится в особенности к его работам, где методом исследования было принято изучение изменения удельного веса металлов. Так как эти изменения сравнительно невелики, то определения удельного веса необходимо делать с точностью $\pm 0{,}001$. Для получения такой точности эксперимент должен быть поставлен исключительно тщательно, с соблюдением мельчайших предосторожностей. Эти определения являются очень трудоемкими, требуют большого терпения и трудолюбия. Михаил Григорьевич прекрасно справился со всеми трудностями. Ему удалось довести эти определения во многих случаях до точности $\pm 0{,}0005$. Все данные, приведенные в его отчетах, являются совершенно достоверными, ибо они получены его собственными руками, с соблюдением всех мер предосторожности для уменьшения погрешности.

Еще в начале своей научной деятельности М. Г. Окнов обратил внимание на противоречивость данных, получаемых при изучении изменения объема при закалке и при нагревании стали. Так как имевшиеся в то время в литературе сведения были совершенно недостаточны и внушали сомнения из-за несовершенства методики, то Михаил Григорьевич проводит большое исследование, посвященное изучению удельного объема закаленной стали. Полученные им результаты опубликованы в 1912 г. и до настоящего времени являются наиболее полными и достоверными данными об изменении объема при закалке стали в широком диапазоне состава ее и условий закалки. Эти данные вошли в учебники металлографии[1] и в справочные издания[2]. Из полученных результатов Михаил Григорьевич делает вывод, что изучение изменения объема дает ценное указание о фазовых превращениях, происходящих в сплавах. Действительно, наблюдаемое им непрерывное изменение объема при последовательных закалках заэвтектоидной стали в совокупности с изучением микроструктуры и химическим анализом показало, что при повторных нагревах происходит распад избыточного цементита, т. е. образование углерода отжига. Таким образом, М. Г. Окнов впервые зафиксировал явление графитизации стали, которое имеет большое практическое значение в наше время. Рассматриваемая работа Окнова имела в свое время большое значение с точки зрения развития взглядов на процесс закалки. Данные Окнова показали несостоятельность различных теорий, объяснявших процесс закалки стали как фиксацию того состояния, которое она имеет выше критических точек (Эдварс, Карпентер, Осмонд и др.). Проблема закалки, по мнению Окнова, может быть решена только после накопления материала и изучения процессов закалки различных сплавов разными методами и в особенности объемным методом. В этом отношении взгляды Окнова совпадали с взглядами другого крупного

[1] См., например, Бабошин А. Л., Металлография и термическая обработка железа, стали и чугуна, ч. III, Металлургиздат, 1940, стр. 54.

[2] Техническая энциклопедия. Справочник технических, химических и физических величин, М. 1929.

ученого того же периода — А. Л. Бабошина, который писал: „нельзя не прийти к выводу, что наиболее универсальным свойством (улавливающим фазовые превращения — *Д. Н.*) является удельный объем“ [1].

В дальнейшей своей научной работе М. Г. Окнов продолжает изучение фазовых превращений, пользуясь главным образом объемным методом, сопоставляя его с результатами других металлографических методов. В этом направлении он работает в течение многих лет, опубликовав с 1912 по 1931 г. семь работ, где изучаются процессы закалки и наклепа. В 1915 г. Окнов публикует продолжение своей работы по изучению изменения объема сплавов при закалке. В этой работе изучаются сплавы систем Cu — Al, Cu — Sn и Cu — Zn. Полученные данные приводят автора к выводу, что в сплавах, имеющих эвтектоидное превращение, наблюдается после закалки мартенситовая структура, если при этом происходит изменение объема. Поэтому он делает заключение, что „мартенситовая структура закаленных сплавов есть следствие внутренних напряжений, вызываемых объемными изменениями при закалке“. Эти внутренние напряжения могут „вызвать в кристаллах образование двойников, произвести значительные деформации в металле и существенно изменить самые свойства его. Большими внутренними давлениями можно объяснить появление в закаленном металле мартенситовой структуры и изменение физических, химических и механических свойств его в том же направлении, как и при наклепке“ [2]. Таким образом, М. Г. Окнов высказывает взгляд, составляющий сущность механической теории закалки, которой он остается верен в течение всей своей жизни. В следующей своей работе (1923 г.) [3]. посвященной той же проблеме, М. Г. Окнов приходит к выводу, что увеличение объема стали при закалке может служить критерием для оценки охлаждающей способности закалочной среды.

В развитие своих взглядов о единой сущности закалки и наклепа, который также сопровождается увеличением объема металлов, Окнов проводит работы по изучению наклепа и влияния его на удельный объем [4] (1927 и 1928 гг.) Через два года, в 1930 г., в печати появляется его новая работа под названием „Объемные и дилатометрические исследования сплавов“. В этой работе автор подводит итоги своих предыдущих исследований и дополняет их новым материалом. Он сопоставляет результаты данных, полученных объемным и дилатометрическим методом, и приходит к выводу, что это сравнение ясно

---

[1] Бабошин А. Л., Термическая обработка железа, стали и чугуна, ч. III, Металлургиздат, 1940, стр. 117.

[2] Окнов М. Г. Изменение объема металлов при закалке, „Журнал Русского металлургического общества № 3, ч. 1, 1915, стр. 442.

[3] Окнов М. Г., Влияние закалочной среды на изменение объема при закалке, „Вестник металлопромышленности“ № 4—8, 1923, стр. 51—60.

[4] Окнов М. Г., Явление наклепа в котельном железе, „Металлург“ № 2, 1927, стр. 5—12; Окнов М. Г., Изменение удельного объема железа и стали при наклепе, „Журнал Русского металлургического общества,“ № 1, ч. 1, 1928, стр. 1—14.

указывает на характер превращения, происходящего при быстром охлаждении (закалке) в разных сплавах. Он устанавливает, что в случае соответствия между дилатометрическими и закалочно-объемными данными более или менее полно фиксируется состояние, свойственное сплаву при высоких температурах. В случае несоответствия этих данных происходит какой-то дополнительный процесс. Объемные изменения при закалке железоуглеродистых сплавов хорошо объясняются появлением в закаленной стали тетрагональной решетки, характерной для мартенсита. „Нельзя ли предположить, — пишет Окнов, — существование подобных промежуточных пространственных решеток в закаленных сплавах Cu — Al и Cu — Zn?... Мы оставляем эти вопросы открытыми, так как для ответа на них не имеется достаточного количества рентгенографических данных“[1]. Далее автор указывает, что имеется аналогия между рентгенографическими данными для стали и для сплавов меди с алюминием. Наличие тетрагональной решетки с меняющимся соотношением осей в стали проявляется на рентгенограммах размытостью линий. Такая же размытость наблюдается и в закаленном эвтектоидном сплаве меди с алюминием. Поэтому возможно, что в этом сплаве также образуется промежуточная пространственная решетка. Статья заканчивается буквально вещими словами: „В заключение нам остается только высказать уверенность, что рентгеновский метод в применении к закалке нежелезных сплавов даст объяснение не только рассмотренным выше ненормальным объемным изменениям при закалке, но и внесет полную ясность в понимание самого процесса закалки“. Это пророчество полностью оправдалось впоследствии в работах советского ученого Г. В. Курдюмова, который, пользуясь рентгеновским методом, создал общую теорию закалки[2].

В следующей статье того же цикла — „О закалке и отпуске эвтектоидных сплавов“[3] М. Г. Окнов дает результаты очень обширного исследования закалки и отпуска сплавов систем Cu — Al (9 — 16% Al), Cu — Be (1,5 — 11% Be), Cu — Sn (14 — 33% Sn), Ag — Cd (39—69% Cd), Cu — Zn (70—78% Zn), Al — Zn (2—60% Al), Ni — Zn (52—72% Zn), Fe — Al (53—65% Fe), и Cu — Sb (37—48% Sb). Исследование производилось методами изучения микроструктуры, удельного объема и твердости. В этой работе автор приходит к выводу, что все эвтектоидные сплавы принимают закалку, которая при этом создает в них существенное изменение свойств. Закалка и отпуск технических сплавов, имеющих эвтектоидное превращение, может значительно улучшить свойства этих сплавов. Структуры закаленных и отпущенных сплавов вполне аналогичны структурам, получаемым при отпуске закаленной стали, поэтому „вообще можно говорить о структурах аустенитной, мартенситной, сорбитной, тро-

---

[1] „Металлург“ № 1, 1930, стр. 1—9.

[2] Курдюмов Г. В., Проблемы металловедения и физики металлов, Металлургиздат, 1949, стр. 132; „Журнал технической физики“, т. 18, 1948, стр. 999.

[3] „Журнал технической физики“, т. 1, вып. 6, 1931, стр. 546—569.

оститной и перлитной в применении ко всем эвтектоидным сплавам". Автор отмечает, что для объяснения явлений, встречающихся при закалке и отпуске, нежелезные сплавы дают очень ценные указания для построения общей теории закалки. В нежелезных эвтектоидных сплавах свойства определяются только одним превращением — эвтектоидным, аллотропических же превращений в большинстве этих сплавов не наблюдается. Поэтому можно думать, что явления закалки и отпуска в нежелезных сплавах более просты для объяснения, чем те же явления в железоуглеродистых сплавах. Действительно, в работах Г. В. Курдюмова, выполненных впоследствии, удалось показать обратимость мартенситного превращения и другие связанные с ним явления, именно на нежелезных сплавах.

Рассмотренные работы М. Г. Окнова характеризуют основное направление его научной деятельности до 1931 г., хотя имеются данные, указывающие на то, что он продолжал заниматься этими вопросами и в дальнейшем. Однако уже в 1935 г. публикуется работа, имеющая новое направление: „О растворении тугоплавких металлов в легкоплавких" [1]. Здесь сообщается о результатах исследований, проведенных М. Г. Окновым по процессам растворения и диффузии тугоплавких металлов и сплавов в легкоплавких. Как и во всех своих работах, автор исключительное внимание обращает на тщательную подготовку методики исследования и систематическую последовательность в постановке опытов. Эта работа рассматривает вопросы, связанные с технологией металлических покрытий при горячем лужении, цинковании, алитировании и других аналогичных процессах.

В 1941 г. публикуется цикл работ по процессам диффузии [2], выполненных под руководством М. Г. Окнова. В этих исследованиях проявляется указанное новое направление в его научной работе. Все эти работы дают весьма ценные данные о процессах диффузии, имеющих большое практическое применение.

Параллельно с экспериментально-научной работой М. Г. Окнов участвовал в издании Технической энциклопедии, где помещен ряд его статей по различным вопросам, например, „Инструментальная сталь", „Критические точки", „Молибденовая сталь" и т. д. Он работал непрерывно в редакциях журналов „Металлург" и „Сталь" в качестве редактора отдела металловедения. Самое деятельное участие М. Г. Окнов принимал в работе ленинградского отделения Научного общества металлургов, где он был членом президиума. Он выступал на всех конференциях с докладами по различным во-

---

[1] „Металлург" № 2, 1935, стр. 17—30.

[2] Окнов М. Г. и Мороз Л. С., Механизм диффузии при цементации железа и никеля химическими соединениями, „Журнал технической физики" № 8, 1941 г. стр. 689 — 699; Окнов М. Г. и Мороз Л. С., О механизме диффузии различных элементов в железе и никеле, „Журнал технической физики" вып. 7, 1941, стр. 593 — 607; Окнов М. Г. и Мороз Л. С., Роль реактивной диффузии при цементации железа углеродом, „Сталь" № 6, 1941, стр. 37 — 40.

просам. Он читал лекции на стахановских курсах, а также инженерно-техническим работникам на различных предприятиях.

Характерной чертой деятельности М. Г. Окнова является его непрерывная связь с промышленностью, которая осуществлялась через его бывших учеников, а также личной консультацией при посещениях заводов. Он имел непрерывный контакт с ленинградскими заводами, но совершал также периодические поездки на Урал, в Сталинград, Ижевск, Брянск и другие места. Многие заводские работники помнят его замечательную способность быстро разобраться в любом практическом вопросе и дать определенные указания и совет для разрешения затруднений, встречающихся в заводской практике.

Михаил Григорьевич Окнов погиб 22 февраля 1942 г. на станции Жихаревка Северной ж. д. от вражеской бомбы. Преждевременная смерть оборвала его жизнь, когда он был полон сил и находился в расцвете творческой деятельности.

В своей работе он отличался чрезвычайной требовательностью к самому себе. Это был труженник, который вместе с исключительной добросовестностью обладал блестящим талантом экспериментатора.

Его плодотворная деятельность никогда не будет забыта в нашей стране и в особенности среди его многочисленных учеников. Это выразил акад. В. Н. Свечников в следующих словах, посвященных М. Г. Окнову: „Многие поколения металлургов ленинградской школы с благодарностью чтут память своего учителя, превосходного педагога, привлекавшего к себе своими личными качествами — необычайной честностью к своей работе и отношением к работе других, прямотой суждений при неизменной доброжелательности к людям и жизнерадостности“ [1].

---

[1] Свечников В. Н., Михаил Григорьевич Окнов. 1878—1942, некролог, „Сталь“ № 7—8, 1943, стр. 84—85.

СПИСОК ТРУДОВ М. Г. ОКНОВА

1. Окнов М. Г., К вопросу о внутреннем строении перлитной стали, „Журнал Русского металлургического общества“ № 2, ч. 2, 1911, стр. 143.

2. Окнов М. Г., Изменение объема стали при закалке, „Журнал Русского металлургического общества“ № 5, ч. 1, 1912, стр. 616—632.

3. Окнов М. Г., Изменение объема металлов при закалке, „Журнал Русского металлургического общества“ № 3, ч. 1, 1915, стр. 442—455.

4. Окнов М. Г., Влияние закалочной среды на изменение объема при закалке, „Вестник металлопромышленности“ № 4—8, 1923, стр. 51—60.

5. Окнов М. Г., Быстрый способ оценки вольфрамовых сталей. „Вестник инженеров“ № 21—29, 1917, стр. 435.

6. Окнов М. Г., Производство металлов и их основные свойства, Научн. хим.-техн. изд., Л. 1925, 182 стр.

7. Окнов М. Г., Топливо и его сжигание, изд. „Кубуч“, Л. 1925, 194 стр.; 1-е изд. 1925, 2-е — 1929, 3-е — 1931, 4-е — 1934.

8. Окнов М. Г., Явления наклепа в котельном железе, „Металлург“ № 2, 1927, стр. 5—12.

9. Окнов М. Г., Изменение удельного объема железа и стали при наклепе, „Журнал Русского металлургического общества“ № 1, ч. 1, 1928, стр. 1—14.

10. Окнов М. Г., Объемные и дилатометрические исследования сплавов, „Металлург“ № 1 (17), 1930, стр. 1—9.

11. Окнов М. Г., О закалке и отпуске эвтектоидных сплавов, „Журнал технической физики“ № 6, 1931, стр. 546—569.

12. Окнов М. Г., Штанько Д. А., О причинах появления пузырей при травлении листового железа, „Труды Института металлов“, вып. 25, М. — Л. 1931.

13. Окнов М. Г., Термическая обработка паровозных и вагонных осей, проспект темы, ЛООНТИ НКТП СССР, Л. 1934, 7 стр.

14. Окнов М. Г., О растворении тугоплавких металлов в легкоплавких, „Металлург“ № 2, 1935, стр. 17—30.

15. Окнов М. Г., К вопросу о величине зерен в металлах, „Металлург“ № 3, 1936, стр. 3—8.

16. Окнов М. Г., Металлография чугуна, Металлургиздат, Л. — М. — Свердловск 1933, 164 стр., 2-е изд. — 1938.

17. Окнов М. Г., Основы металлографии, лекции 1—2, ГОНТИ, Л. — М. 1938.

18. Окнов М. Г., Современное состояние диаграммы плавкости. К 100-летию со дня рождения проф. Д. К. Чернова, „Металлург“ № 10—11, 1939, стр. 67—75.

19. Окнов М. Г., Чугун в отливках, ОНТИ, Л. — М. 1939, 18 стр. (Всесоюзное научное общество металлургов, Центральные заочные курсы повышения квалификации рабочих-стахановцев термистов, лекция 6).

20. Окнов М. Г., Гадфильда сталь, Техническая энциклопедия, т. 4, стр. 872—873.

21. Окнов М. Г., Железосплавы (ферросплавы), Техническая энциклопедия, т. 7 стр. 841—847.

22. Окнов М. Г., Инструментальная сталь, Техническая энциклопедия, т. 9, стр. 209—214.

23. Окнов М. Г., Критические точки, Техническая энциклопедия, т. 11, стр. 622—623.

24. Окнов М. Г., Молибденовая сталь, Техническая энциклопедия, т. 13, стр. 443—444.

25. Окнов М. Г., Нержавеющая сталь, Техническая энциклопедия, т 14, стр. 424—427.

26. Окнов М. Г., Термическая обработка черных металлов, курс лекций, Металлургиздат, Л. — М. 1940—1941 (лекции 38 и 39).

27. Окнов М. Г. и Мороз Л. С., Механизм диффузии при цементации железа и никеля химическими соединениями, “Журнал технической физики“ вып. 8, 1941, стр. 689—699.

28. Окнов М. Г. и Мороз Л. С., О механизме диффузии различных элементов в железо и никель, „Журнал технической физики“, вып. 7, 1941, стр. 593—606.

29. Окнов М. Г. и Мороз Л. С., Роль реактивной диффузии при цементации железа углеродом, „Сталь“ № 6, 1941, стр. 37—40.

30. Сорокин Г. Л., Цементация пастой, доклад для предстоящей конференции курсов по стахановским методам термической обработки черных металлов с приложением проекта резолюции и заключения М. Г. Окнова по докладу, „Металлург“ № 12, 1937, стр. 88—91.

ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМА СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ [1]

(Предварительное сообщение из Металлургической лаборатории СПБ Политехнического института)

М. Г. ОКНОВ

Изменение объема стали при нагревании хорошо изучено дилатометрическим методом. Сущность его заключается в том, что брусок исследуемой стали соединяется с тем или иным приспособлением, отмечающим в сильно увеличенном масштабе изменение длины его и, таким образом, при нагревании бруска, равно как и при охлаждении его, получается точная картина изменений длины в пределах различных температур (см. фиг. 1).

Изменение объема стали при высоких температурах можно изучать также другим методом, отличным от дилатометрического, именно методом закалки. Если один и тот же образец стали подвергать закалке при различных температурах и после каждой закалки определять удельный вес, а, следовательно, и удельный объем его, то можно получить картину постепенного изменения объема с температурой. Правда, при закалке, как и следовало ожидать и как мы увидим далее, фиксируются только те изменения объема, которые вызываются фазовыми [2] превращениями в стали, и не фиксируются изменения, зависящие от теплового сжатия и расширения.

Но в этом заключается и некоторое преимущество метода закалки перед дилатометрическим: он позволяет отделить фазовые изменения объема от тепловых, тогда как при дилатометрическом методе одни изменения могут маскироваться другими.

Изменение объема стали при закалке было изучено в работе Меткальфа и Ланглея [1]. Но эта работа произведена была без точных измерений температуры и имела в виду получить практически необходимые данные для изменений объема стали при закалке. Данные, полученные этими авторами, собраны в табл. 1, содержащей, кроме удельных весов, вычисленные нами удельные объемы и процент изменения последних. Эти же данные представлены нами графически на фиг. 2 [3], где на оси ординат отложены удельные объемы, на оси абсцисс — температуры закалки [2]. Из этих кривых можно сделать только один вывод, что после закалки

---

[1] ZS. d. berg und hüttenmän. Ver. f. Steiermark und Kärnthen, 1880.

[2] Температуры, обозначенные в работе Меткальфа и Ланглея цветами каления, переведены нами в градусы Цельсия.

Таблица 1

Температуры закалки	C = 0,529%			C = 0,649%			C = 0,841%		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначальн.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначальн.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначальн.
Незакаленная литая сталь	7,841	0,12753	—	7,829	0,12773	—	7,824	0,12781	—
Незаакленная кованая сталь	7,844	0,12749	—	7,824	0,12781	—	7,829	0,12773	—
Темнокрасное каление	7,831	0,12770	0,13	7,806	0,12811	0,30	7,812	0,12801	0,16
Красное каление	7,826	0,12778	0,23	7,849	0,12740	—0,26	7,808	0,12807	0,20
Яркокрасное каление	7,823	0,12783	0,20	7,830	0,12771	—	7,780	0,12853	0,57
Желтое каление	7,814	0,12798	0,35	7,811	0,12802	0,23	7,784	0,12847	0,52
Белое каление	7,118	0,12791	0,30	7,791	0,12835	0,49	7,789	0,12838	0,45

Температуры закалки	C = 0,871%			C = 1,005%			C = 1,079%		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначальн.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначальн.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначальн.
Незакаленная литая сталь	7,818	0,12791	—	7,807	0,12809	—	7,805	0,12812	—
Незакаленная кованая сталь	7,825	0,12780	—	7,826	0,12778	—	7,825	0,12780	—
Темнокрасное каление	7,790	0,12837	0,35	7,812	0,12801	—	7,811	0,12802	—
Красное каление	7,773	0,12865	0,58	7,789	0,12838	0,23	7,798	0,12824	0,10
Яркокрасное каление	7,758	0,12890	0,78	7,755	0,12895	0,67	7,769	0,12872	0,47
Желтое каление	7,755	0,12895	0,81	7,749	0,12905	0,76	7,741	0,12918	0,83
Белое каление	7,752	0,12900	0,87	7,744	0,12913	0,81	7,690	0,13004	1,47

сталь имеет больший объем, чем до закалки. При каких температурах происходит изменение объема закаливаемой стали, влияет ли температура закалки на степень увеличения объема, — на эти вопросы кривые Меткальфа и Ланглея не дают ответа. Нами, поэтому, сделана попытка проследить изменение удельного объема стали в зависимости от температуры закалки и до некоторой степени повторить работу Меткальфа и Ланглея.

Для исследования были взяты стали, состав которых приводится в табл 2. Из них только заэвтектоидные [4] стали 13—15 были приготовлены в лаборатории сплавлением гвоздевого железа с белым чугуном; остальные — заводского приготовления. Заводские стали как более плотные и однородные были более желательны для настоящего исследования, поэтому приходилось мириться с заметными количествами Mn, обычно находящегося в них. Но присутствие сравнительно небольших количеств Mn в стали, как увидим далее, не влияя на характер изменений объема, делает их более резкими и заметными [5]; кроме того, желательно было получить данные именно для технических сортов, — данные, имеющие некоторое практическое значение.

Таблица 2

№ сталей	% содержания						
	C	Mn	St	P	S	Cr	Ni
1	0,08	0,12	0,02	Сл.	0,02	—	—
2	0,21	1,05	0,25	—	—	—	—
3	0,23	0,54	0,10	0,05	—	—	
4	0,31	0,73	0,30	—	—	—	
5	0,45	0,14	0,16	—	—	—	—
6	0,46	0,81	0,16	0,05	0,03	—	—
7	0,50	0,53	0,17	—	—		—
8	0,58	0,90	0,18	0,07	0,03	—	—
9	0,68	1,17	0,26	—	—	—	—
10	0,70	0,39	0,18	0,03	—	—	—
11	0,83	0,28	0,25	0,019	—	—	—
12	0,93	0,34	0,17	—	—	—	—
13	1,14	0,45	0,51	—	—	—	
14	1,36	0,22	0,67	—	—	—	—
15	1,40	0,56	0,33	—	—	—	—
16	1,67	0,18	0,18	0,015	—	—	—
17	0,46	0,26	0,92	0,031	0,013	2,72	22,56

Из каждой исследованной стали вырезался образец в виде прямоугольной призмы (около $2 \times 2 \times 3$ *см*) весом от 60 до 80 *г*. Он помещался в фарфоровую трубку печи Гереуса, нагревался в струе азота до 1000° и охлаждался вместе с печью до обыкновенной температуры. Образец тщательно шлифовался на грубых номерах наждачной бумаги (№ 5 и 4), и определялся его удельный вес. Затем он снова помещался в печь, нагревался до 1000°, охлаждался вместе с печью до 400°, выдерживался при этой температуре в течение 10—15 мин. и подвергался закалке в холодной воде (20°).

После тщательной шлифовки снова определялся его удельный вес. Затем образец точно таким же образом подвергался последовательным закалкам от 600, 650, 700, 750, 800, 900 и 1000°, каждый раз после предварительного нагревания до 1000°.

Определение удельного веса образцов производилось по методу подвешивания; в качестве жидкости служила дестиллированная вода, прокипяченная за 15—20 час. до определения и охлажденная в закрытом сосуде в весовой комнате. Ошибка при взвешивании в воде не превышала ± 2 *мг*, что при весе образцов около 50 *г* дает для удельного веса ошибку не больше $\pm$ 0,003 и для удельного объема — не больше $\pm$ 0,00005; в большинстве случаев эти ошибки значительно меньше и приближаются к $\pm$ 0,001 и $\pm$ 0,00002.

Для контроля над точностью определений в очень многих случаях последние производились дважды, причем отдельные определения отличались друг от друга не больше $\pm$0,002 и $\pm$0,0004. Только для твердых закаленных сталей, в которых при закалке образовались трещины, отдельные определения отличались несколько больше. Температура воды при взвешиваниях отсчитывалась с точностью до 0,1°, и затем удельный вес образцов вычислялся по формуле

$$D_{0/4} = \frac{A\,(1 + 0{,}000033\,t)\,d}{A - B},$$

где A — вес образца в воздухе, B — вес его же в воде, имеющей температуру $t°$, d — плотность воды при $t°$, 0,000033 — коэфициент кубического расширения железа.

Все полученные нами результаты собраны в табл. 3, где для каждого образца в 1-й графе дается удельный вес; во 2-й удельный объем и в 3-й — изменение удельного объема в процентах от первоначального [1]. Часть результатов представлена графически на фиг. 3—6, причем на оси ординат отложены удельные объемы, на оси абсцисс — температуры закалки.

Полученные нами кривые изменения объема стали при закалке можно разделить на четыре категории; типичные кривые

---

[1] За первоначальный удельный объем принимался средний из полученных до резкого увеличения при 700—750°.

Таблица 3

Температуры закалки в °	Сталь 1			Сталь 2			Сталь 3		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.
Отожж. 1000—20	7,869	0,12709	—	7,831	0,12769	—	7,856	0,12729	—
400	7,868	0,12710	—	7,833	0,12766	—	7,858	0,12726	—
600	7,867	0,12711	—	7,833	0,12766	—	7,856	0,12729	—
650	7,867	0,12711	—	7,820	0,12788	0,16	7,855	0,12731	—
700	7,867	0,12711	—	7,820	0,12788	0,16	7,844	0,12748	0,15
750	7,868	0,12710	—	7,823	0,12782	0,12	7,844	0,12748	0,15
800	7,867	0,12711	—	7,825	0,12779	0,10	7,849	0,12740	0,09
900	7,868	0,12710	—	7,826	0,12778	0,10	7,849	0,12740	0,09
1000	7,869	0,12708	—	7,825	0,12779	0,10	7,848	0,12742	0,10
Отожж. 1000—20	7,870	0,12707	—	7,836	0,12761	—	7,859	0,12724	—

Температуры закалки в °	Сталь 4			Сталь 5			Сталь 6		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.
Отожж. 1000—20	7,840	0,12755	—	7,839	0,12757	—	7,837	0,12760	—
400	7,843	0,12750	—	7,840	0,12755	—	—	—	—
600	7,843	0,12750	—	7,839	0,12757	—	—	—	—
650	7,839	0,12757	—	7,838	0,12758	—	7,836	0,12762	—
700	7,817	0,12793	0,31	7,838	0,12758	—	7,790	0,12837	0,60
750	7,822	0,12785	0,25	7,824	0,12781	0,19	7,789	0,12839	0,61
800	7,822	0,12785	0,25	7,830	0,12771	0,11	7,794	0,12831	0,55
900	7,822	0,12785	0,25	7,833	0,12776	0,15	7,790	0,12837	0,60
1000	7,820	0,12788	0,27	7,822	0,12785	0,22	7,789	0,12839	0,61
Отожж. 1000—20	7,842	0,12752	—	7,845	0,12747				

Таблица 3 (продолжение)

Температуры закалки в °	Сталь 7			Сталь 8			Сталь 9		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.
Отожж. 1000—20	7,822	0,12785	—	7,843	0,12750	—	7,777	0,12858	—
400	7,823	0,12783	—	—	—	—	7,777	0,12858	—
600	7,822	0,12785	—	—	—	—	7,778	0,12857	—
650	7,821	0,12786	—	7,841	0,12753	—	7,777	0,12858	—
700	7,817	0,12793	0,06	7,806	0,12811	0,46	7,749	0,12905	0,37
750	7,799	0,12822	0,29	7,806	0,12811	0,46	7,720	0,12953	0,74
800	7,798	0,12824	0,30	7,805	0,12812	0,47	7,710	0,12970	0,87
900	7,797	0,12825	0,31	7,805	0,12812	0,47	7,706	0,12977	0,92
1000	7,795	0,12829	0,34	7,805	0,12811	0,47	7,707	0,12975	0,91
Отожж. 1000—20	7,821	0,12786	—	—	—	—	7,768	0,12873	—

Температуры закалки в °	Сталь 10			Сталь 11			Сталь 12		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал
Отожж. 1000—20	7,843	0,12751	—	7,839	0,12757	—	7,813	0,12799	—
400	7,844	0,12749	—	7,839	0,12758	—	7,813	0,12799	—
600	7,839	0,12757	—	7,841	0,12753	—	7,812	0,12801	—
650	7,838	0,12758	—	7,826	0,12778	0,17	7,814	0,12798	—
700	7,788	0,12840	0,67	7,822	0,12785	0,23	7,809	0,12806	0,05
750	7,784	0,12847	0,73	7,765	0,12878	0,96	7,762	0,12883	0,66
800	7,783	0,12849	0,75	7,763	0,12882	0,99	7,760	0,12886	0,68
900	7,777	0,12858	0,82	7,754	0,12896	1,10	7,755	0,12895	0,75
1000	7,775	0,12862	0,85	7,752	0,12900	1,13	7,756	0,12892	0,73
Отожж. 1000—20	7,822	0,12785	—	—	—	—	7,811	0,12802	—

Таблица 3 (продолжение)

Температуры закалки в °	Сталь 13			Сталь 14			Сталь 15		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал
Отожж. 1000—20	7,786	0,12844	—	7,595	0,13166	—	7,676	0,13028	—
400	7,776	0,12860	0,12	7,598	0,13161	—	7,637	0,13094	0,51
600	7,767	4,12875	0,24	7,578	0,13196	0,24	7,609	0,13142	0,88
650	7,764	0,12880	0,28	7,587	0,13181	0,13	7,590	0,13175	1,13
700	7,749	0,12904	0,47	7,587	0,13181	0,13	7,554	0,13238	1,61
750	7,711	0,12968	0,97	7,577	0,13198	0,26	7,512	0,13312	2,18
800	7,682	0,13017	1,35	7,550	0,13245	0,62	7,493	0,13346	2,44
900	7,766	0,13045	1,57	7,510	0,13316	1,15	7,464	0,13398	2,84
1000	7,659	0,13057	1,66	7,503	0,13328	1,25	7,471	0,13385	2,74
Отожж. 1000—20	7,729	0,12938	—	7,490	0,13351	—	7,530	0,13280	—

Температуры закалки в °	Сталь 16			Сталь 16 bis			Сталь 17		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал.	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема в % к первоначал
Отожж. 1000—20	7,653	0,13067	—	7,696	0,12994	—	8,108	0,12334	
400	7,598	0,13161	0,72	—	—	—	8,111	0,12329	
600	7,561	0,13226	1,22	—	—	—	8,107	0,12335	
650	7,534	0,13273	1,58	7,650	0,13072	0,60	8,112	0,12327	
700	7,491	0,13349	2,16	7,615	0,13132	1,06	8,113	0,12326	
750	7,439	0,13443	2,88	7,584	0,13185	1,47	8,115	0,12323	
800	7,408	0,13499	3,31	7,555	0,13236	1,86	8,114	0,12325	
900	7,383	0,13545	3,66	7,493	0,13346	2,71	8,117	0,12320	—
1000	7,373	0,13563	3,80	7,486	0,13358	2,80	8,113	0,12326	—
Отожж. 1000—20	7,457	0,13410	—	7,509	0,13317	—	—	—	—

для каждой из этих категорий мы и приводим на фиг. 3—6. К первой категории относятся кривые, совсем не показывающие никаких изменений объема, или изменения, не выходящие из пределов ошибки опыта; такие кривые свойственны чистому железу (фиг. 3) и специальным сталям, не имеющим точки A_{r_1}. В качестве примера специальной стали мы воспользовались хромоникелевой сталью 17, имеющей состав, приведенный в табл. 2. и аустенитно-полиэдрическую структуру [6].

Кривые второй категории (фиг. 4), свойственные сталям с содержанием С от 0,2 до 0,5% (стали 2—6), показывают резкое увеличение объема при 700° [7] и небольшое уменьшение при температурах 750—800°.

Кривые третьей категории (фиг. 5), относящиеся к сталям с 0,5 — 0,9% С (стали 7—12), показывают только одно резкое увеличение объема при 700° и отсутствие других заметных изменений от закалки при более высоких температурах.

Наконец, кривые (фиг. 6) для сталей заэвтектоидных (стали 13—16) показывают непрерывное увеличение объема при последовательных закалках, что объясняется разложением в них карбида и выделением углерода отжига.

Из рассмотрения кривых изменения объема стали при закалке можно сделать вполне определенный вывод, что тепловые изменения объема закалкой не фиксируются, а фиксируются лишь фазовые изменения.

Действительно, если бы фиксировалось тепловое расширение стали, то кривая изменения ее объема при закалке должна была бы лежать гораздо выше найденной; так, для ст. 8 (фиг. 5) линия теплового расширения имеет направление, обозначенное пунктиром, если принять коэфициент кубического расширения стали равным 0,000033. Между тем до температуры закалки 700° никаких изменений объема не наблюдается, а в мягком железе никаких изменений объема нет и при более высоких температурах закалки.

Если принять во внимание, что и дилатометрические кривые до 700° никаких аномалий не показывают, можно сказать, что до 700° в незакаленной стали при нагревании ее никаких фазовых превращений, связанных с изменением объема, не происходит.

При 700° происходит фазовое превращение, сопровождающееся заметным изменением объема; мы знаем, что при этой температуре происходит превращение перлита в твердый раствор, обозначаемое символом A_1. Из кривых ясно видно, что это превращение перлита в твердый раствор всегда сопровождается заметным увеличением объема (стали после закалки) [8]. Увеличение объема должно быть пропорционально содержанию в стали перлита, а следовательно, и углерода. В полученных нами данных строгой пропорциональности не наблюдается, а только приблизительная, как это видно из процентного изме-

нения объема, помещенного для каждого образца в соответствующем столбце.

Отсутствие строгой пропорциональности, вероятно, объясняется тем, что взятые стали содержат различные количества Si и Mn; кроме того, образцы неизбежно отличались друг от друга по интенсивности закалки в зависимости от их формы, веса и от быстроты охлаждения.

Стали с 0,2—0,5% C неизменно показывают небольшое уменьшение объема при 750—800°; иногда это уменьшение не превышает ошибки опыта, но его постоянство во всех образцах (2—6) заставляет признать его наличность.

В сталях с содержанием C от 0,5 до 0,9% (7—12) наблюдается только одно увеличение объема при 700—750°; это увеличение настолько велико, что образцы неизбежно дают трещины. Появление последних при закалке от 700—750° затрудняло дальнейшую работу с этими образцами и неизбежно понижало точность дальнейших определений удельного веса; поэтому иногда кривая при температурах 800—1000° несколько поднимается. Но и приводимых цифр достаточно, чтобы признать практически правильным положение, что какова бы ни была температура закалки (700—1000°) объем стали остается постоянным и определяется содержанием в ней C, а также размерами и формой образца и интенсивностью закалки.

Следует обратить внимание на тот факт, что стали с большим содержанием Mn дают большее увеличение объема при закалке и, следовательно, растрескиваются более энергично: так, из трех сталей 5—7 почти с одинаковым содержанием C [9] увеличение объема наиболее резко в стали 6 и наиболее слабо в стали 5: в первой наблюдается и появление трещин; точно так же сталь 9 энергично растрескивалась при закалке.

В заэвтектоидных сталях уже при первых закалках при 400—650° наблюдается увеличение объема, которое неизменно продолжалось при дальнейших закалках. Исходя из предположения, что в данном случае имеет место выделение углерода отжига из карбида, мы подвергли эти образцы микроскопическому исследованию, которое и подтвердило правильность нашего предположения; окончательно оно подтвердилось после химического анализа, показавшего во всех заэвтектоидных сталях после тепловых обработок значительные количества графита. Таким образом, в заэвтектоидных сталях разложение карбида маскирует изменения объема, зависящие от закалки; для изучения их нужна несколько иная постановка опытов. Здесь следует отметить любопытную особенность заэвтектоидных сталей — они переносят закалку без образования трещин, хотя, казалось бы, эти стали в смысле изменения объема находятся нисколько не в лучших условиях, чем эвтектоидная сталь с 0,9% C. Повидимому, выделяющийся углерод отжига до известной степени парализует вредные натяжения, вызываемые закалкой.

Все образцы заэвтектоидных сталей после закалок снова были приведены к начальному состоянию, т. е. охлаждены вместе с печью от 1000 до 20°; для них был определен также удельный вес и определено содержание углерода отжига. Таким образом, из содержания углерода отжига и изменения объема по сравнению с первоначальным можно было найти молекулярное увеличение объема при реакции $Fe_3C = 3\,Fe + C$. Результаты этих определений и подсчета собраны в табл. 4. Полученные нами величины для молекулярного расширения при разложении карбида колеблются в значительных пределах (4,6—5,3) и заметно расходятся с данными О. Руффа [1].

Таблица 4

№ стали	Общее содержание C в %	Содержание углерода отжига в %	Содержание связанного C в %	Удельный объем до тепловых обработок	Удельный объем после тепловых обработок	Найденное увеличение удельного объема для 1 г стали	Вычисленное молекулярное увеличение объема
13	1,14	0.23	0,91	0,12844	0,12938	0,00094	4,9
14	1,36	0,48	0,88	0,13166	0,13351	0,00185	4,6
15	1,40	0,57	0,83	0,13028	0,13280	0,00252	5,3
16	1,67	0,85	0,82	0,13067	0,13410	0,00343	4,8
16 bis	1,67	0,83	0,84	0,12994	0,13317	0,00323	4,7

Этот автор из удельных весов Fe_3C, Fe и углерода отжига находит молекулярное увеличение объема при разложении карбида равным 3,5 [2].

Не считая наши данные безусловно обоснованными, мы должны заметить, что в расчете Руффа фигурирует сравнительно мало обоснованная величина — удельный вес углерода отжига. В работе Ле-Шателье и Вологдина [3] для удельного веса аморфного углерода даются величины от 1,60 до 1,81. Таким образом, если принять для углерода отжига удельный вес меньше 1,84,

---

[1] Ber. d. Deutsch. chem. Ges. 1, 1912, 63—72.

[2] Молекулярный объем $Fe_3C = \frac{180}{7,396} = 24,34$

$$\left.\begin{array}{l} 3Fe = \frac{168}{7,88} = 21,32 \\ C = \frac{12}{1,84} = 6,52 \end{array}\right\} = 27,84$$

Молекулярное увеличение объема = 27,84—24,34 = 3,5

[3] R. de Métall., 1909, 925.

то можно было бы объяснить сравнительно малую величину для молекулярного увеличения объема у Руффа. Во всяком случае, ввиду расхождения наших цифр с цифрой Руффа, мы считаем необходимым произвести дополнительные исследования по этому вопросу.

Мы не задавались целью достигнуть в заэвтектоидных сталях максимального разложения карбида; но в наших сталях пределом разложения является, повидимому, исчезновение свободного цементита (табл. 4.). Действительно, во всех сталях количество связанного углерода после тепловых обработок колеблется в пределах от 0,82 до 0,91%; это показывает, что разложению подвергается только свободный цементит, а цементит перлита не разлагается. Если принять во внимание, что из двух образцов 16 и 16 bis одной и той же стали первый подвергался большему числу закалок, чем второй (см. табл. 3), тогда как количество выделившегося углерода отжига в обоих образцах почти одно и то же, можно с еще большей уверенностью говорить, что в условиях наших опытов разложения карбида в перлите не происходит.

Некоторые из изученных образцов (2, 10, 11 и 16) параллельно с определением их удельного объема изучались микроскопически.

Как и следовало ожидать, микроструктура образцов совершенно не изменялась до тех пор, пока не происходило первого изменения объема при 700°. Одновременно с увеличением объема стали наблюдается исчезновение перлита и появление мартенсита. Картина этого превращения настолько известна, что мы не приводим полученных нами микрофотографий. Каких-либо характерных изменений микроструктуры, отвечающих уменьшению объема при 750—800° в сталях с 0,2—0,5% С нам заметить не удалось.

Некоторый интерес могут представить приводимые здесь снимки (фиг. 7—13) с заэвтектоидных сталей с выделившимся из них после всех тепловых обработок углеродом отжига. Этот последний в закаленных образцах виден только до травления; после же травления он мало заметен вследствие интенсивной окраски мартенсита и троостита. В отожженных образцах углерод отжига прекрасно виден на фоне перлита; иногда гнезда его окружены каймою феррита (фиг. 13), иногда он заключен непосредственно в массе перлита (фиг. 7).

Не считая настоящую работу вполне оконченной, мы, тем не менее, резюмируем ее в следующих, отчасти доказанных, отчасти намеченных положениях.

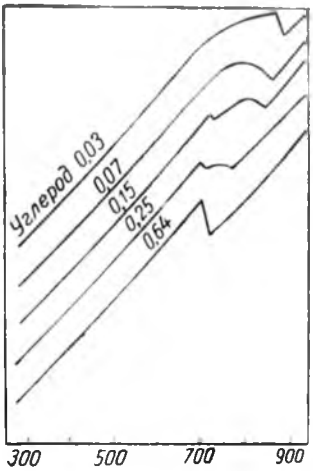
1) При закалке сталей фиксируются только фазовые изменения объема, но не тепловые.

2) Сталь, закаленная выше A_1, обладает бо́льшим объемом, чем незакаленная; степень увеличения объема зависит только от содержания в стали углерода и других примесей и от интен-

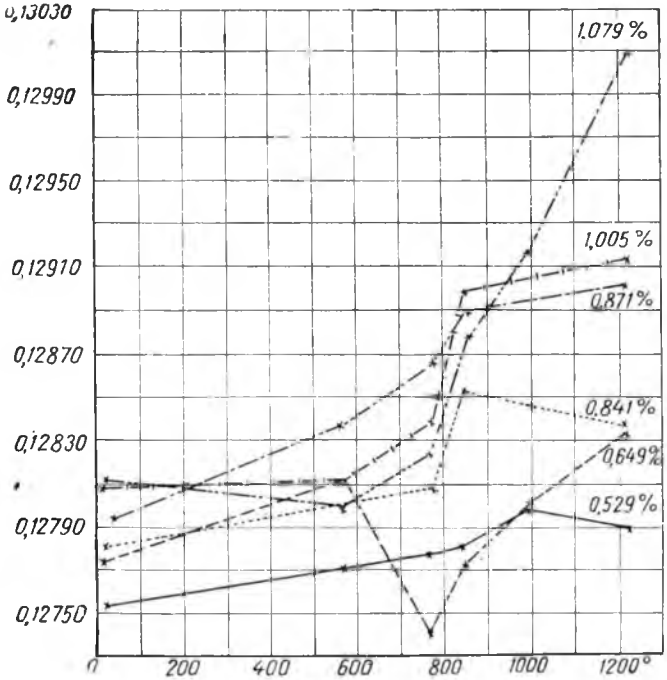
сивности закалки, но практически не зависит от температуры закалки в области температур 700—1000°.

3) Малоуглеродистые стали (0,2—0,5% C), закаленные при 750—800°, показывают уменьшение объема по сравнению с объемом их от закалки при 700°.

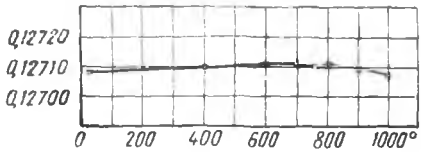
4) В заэвтектоидных сталях при последовательных закалках происходит разложение свободного цементита и непрерывное увеличение объема, которым маскируется увеличение объема от закалки.


Углерод 0,03
0,07
0,15
0,25
0,64
300
500
700
900

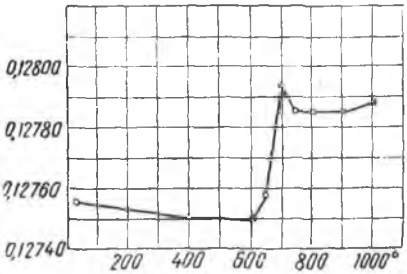
Фиг. 1.


0,13030
0,12990
0,12950
0,12910
0,12870
0,12830
0,12790
0,12750
1,079 %
1,005 %
0,871 %
0,841 %
0,649 %
0,529 %
0
200
400
600
800
1000
1200°

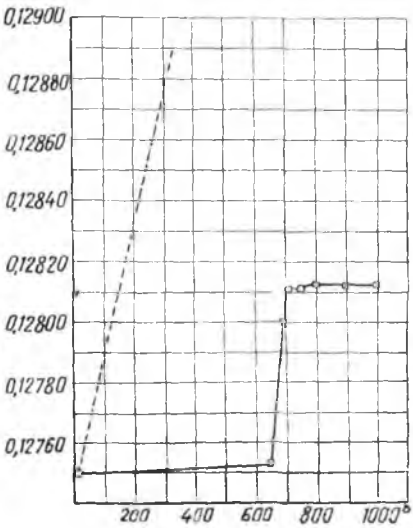
Фиг. 2.



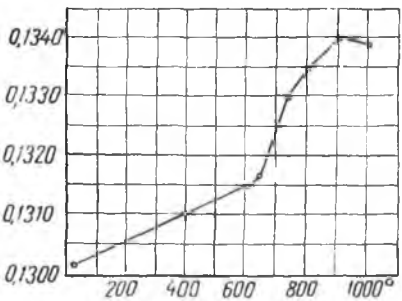
Фиг. 3.



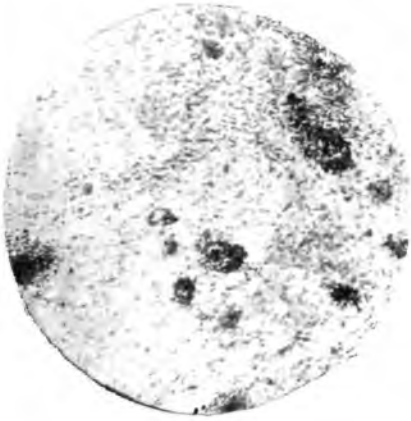
Фиг. 4.



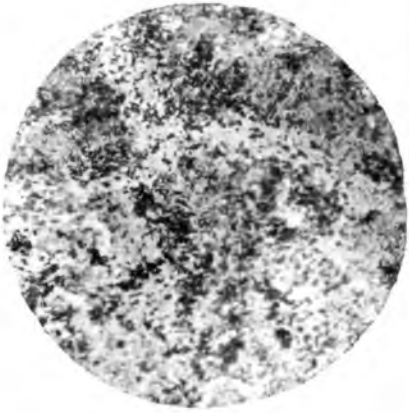
Фиг. 5.



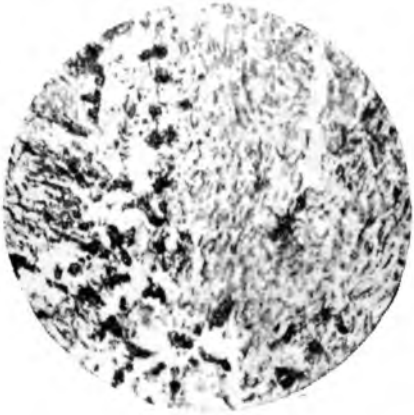
Фиг. 6.



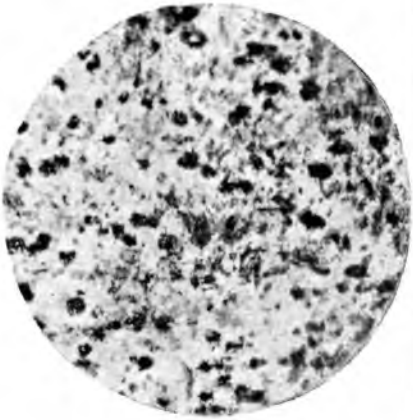
Фиг. 7. Сталь 13. C = 1,14%. × 120.



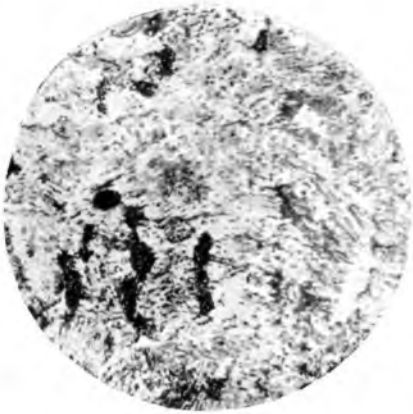
Фиг. 8. Сталь 14. C = 1,36%. × 120.



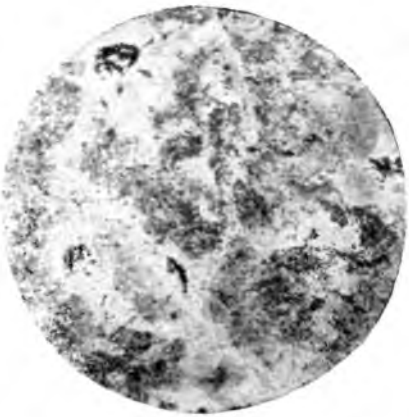
Фиг. 9. Сталь 14. C = 1,36%. × 410.



Фиг. 10. Сталь 15. C = 1,40%. × 120.



Фиг. 11. Сталь 15. C = 1,40%. × 410.



Фиг. 12. Сталь 16. C = 1,67%. × 120.

Фиг. 13. Сталь 16 bis. C = 1,67% × 410.

ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМА МЕТАЛЛОВ ПРИ ЗАКАЛКЕ [1]

(Из металлургической лаборатории Петроградского политехнического института)

М. Г. ОКНОВ

I

Многочисленные дилатометрические работы, посвященные изучению теплового расширения стали, а также работы, касающиеся вопроса об изменении объема стали при закалке [1] с несомненностью показали, что превращение A_1 как при нагревании, так и при охлаждении, сопровождается значительным изменением объема. При таком изменении объема в твердой среде, отличающейся малой подвижностью частиц, может возникать внутреннее, положительное или отрицательное, давление, которое затем будет уменьшаться лишь постольку, поскольку частицы металла обладают подвижностью. Давление, могущее возникнуть при охлаждении стали в Ar_1, будет действовать в неоднородной среде, состоящей из продуктов распадения твердого раствора — феррита и цементита, и будет действовать сильнее всего в тот момент, когда из молекул железа и карбида формируются более крупные единицы феррита и цементита, видимые в микроскоп.

В жидкой среде давление направлено во все стороны и всюду одинаково, в твердой же среде должны появляться направления преобладающего давления. Таким образом, в каждом объеме, в котором происходит формирование цементита и феррита, можно представить себе некоторые направления преобладающего давления, в отношении которых формирующиеся элементы будут располагаться с известной правильностью. Поясним это примером. Если сыпать железные опилки на бумагу, под которой помещен магнит, то расположение их определится силовыми линиями магнита, и опилки расположатся веерообразно, расходящимися или параллельными линиями.

Точно также формирующиеся под влиянием сил давления частицы феррита и цементита могут располагаться расходящимися или параллельными линиями, показывающими направление преобладающих давлений. Так именно они и располагаются в пластинчатом перлите, образование которого из твердого раствора сопровождается значительным изменением объема. Из табл. 1[1]

[1] Окнов М. Г., Изменение объема стали при закалке, стр. 465—477 настоящей книги.

Таблица 1

Тепловая обработка	C = 0,58%			C = 0,70%			C = 0,83%		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %
1000—20°	7,843	0,12750	—	7,843	0,12751	—	7,839	0,12757	—
400°	—	—	—	7,844	0,12749	—	7,839	0,12757	—
600°	—	—	—	7,839	0,12757	—	7,841	0,12753	—
650°	7,841	0,12753	—	7,838	0,12758	—	7,826	0,12778	+0,17
700°	7,806	0,12811	+0,46	7,788	0,12840	+0,67	7,822	0,12785	+0,23
750°	7,806	0,12811	+0,46	7,784	0,12847	+0,73	7,765	0,12878	+0,96
800°	7,805	0,12812	+0,47	7,783	0,12849	+0,75	7,763	0,12882	+0,99
900°	7,805	0,12812	+0,47	7,777	0,12858	+0,82	7,754	0,12896	+1,10
1000°	7,805	0,12811	+0,46	7,775	0,12862	+0,85	7,752	0,12900	+1,13
1000—20°	—	—	—	7,822	0,12785	—	—	—	—

Таблица 2

Тепловая обработка	Cu — 90,5%; Al — 9,5%			Cu — 86,5%; Al — 13,5%			Cu — 83,4%; Al — 16,6%		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %
Отл. в стальную изложницу	—	—	—	7,246	0,13706	—	—	—	—
1000—20°	—	—	—	7,236	0,13820	—	—	—	—
1000°	7,675	0,13029	—0,16	7,278	0,13740	—0,58	6,964	0,14360	—0,15
650°	—	—	—	7,276	1,13744	—0,55	6,964	0,14360	—0,15
400°	7,665	0,13046	—0,03	7,240	0,13812	—	6,957	0,14374	—0,06
900°	7,668	0,13041	—0,07	7,267	0,13761	—0,42	—	—	—
1000—20°	7,663	0,13050	—	7,233	0,13825	—	6,953	0,14382	—

легко видеть, какие значительные изменения объема имеют место при превращении твердого раствора в перлит, а фиг. 1 показывает обычную микроструктуру пластинчатого перлита.

Но если наше предположение, что пластинчатая структура перлита зависит от внезапного изменения объема при распадении твердого раствора, верно, то такой же пластинчатой структуры можно ожидать во всех тех случаях, где распадение твердого раствора сопровождается изменением объема. Таким образом, изменение объема при образовании эвтектоида из твердого раствора должно сопровождаться появлением пластинчатой структуры, если входящие в состав эвтектоида вещества обладают достаточной пластичностью.

Руководясь этой мыслью, мы и предприняли изучение изменений объема при эвтектоидных превращениях в различных сплавах. Для исследования приготовлялись образцы избранных сплавов правильной формы, весом около 30—50 *г*; все поверхности их тщательно отшлифовывались, и после этого методом подвешивания в воде определялся удельный вес, причем точность определения равнялась $\pm 0{,}0002$.

Определение удельного веса для каждого образца производилось многократно после различных тепловых обработок, последовательно обозначенных в нижеприведенных таблицах. Некоторые сплавы не выдерживают повторных нагревов и делаются очень хрупкими, — для них приходилось довольствоваться только двумя определениями — до закалки и после закалки. Самое определение удельного веса таких сплавов делается менее точным, ввиду появления на образце многочисленных трещин. Нагревание образцов при закалке и при отжиге производилось или в струе N_2 или в атмосфере $CO + CO_2$; в последнем случае в нагревательную трубку печи Гереуса вводился древесный уголь, предохранявший образцы от окисления. Анализ сплавов производился или титрованием раствором KCN, или электролитически [1]. Во всех сплавах определялась только медь, другой металл определялся по разности, так как ввиду чистоты исходных металлов посторонних примесей в сплавах не было.

Итак, во всех случаях исследованных сплавов требовалось установить, сопровождается или не сопровождается данное эвтектоидное превращение изменением объема. Полученные результаты собраны в таблицах, в которых для каждого сплава даны удельный вес и удельный объем при последовательных тепловых обработках, а также процентное изменение удельного объема после закалки по сравнению с удельным объемом отожженного сплава. Во всех таблицах закалка обозначена одной температурой, при которой производилось погружение образца в воду; отжиг — интервалом температур от максимальной температуры нагрева до комнатной.

---

[1] Пазухин В., „Журнал Русского металлургического общества", 1914, ч. 1, стр. 91.

Параллельно с определениями удельного веса производилось и наблюдение над микроструктурой; часть этих наблюдений приводится ниже на микрофотографиях.

Сплавы Cu — Al

В этой системе, диаграмма плавкости которой приводится здесь (фиг. 2), имеется два эвтектоида, один при 12,0% Al, состоящий из смеси $\alpha + \delta$ и получающийся от распадения твердого раствора β при 567°, другой — при 22,5% Al, состоящий из смеси $\delta + \eta$ и получающийся от распадения твердого раствора ε при 570° [2]. Результаты, полученные для сплавов, относящихся к этим двум областям, помещены в табл. 2 и 3. Табл. 2 ясно показывает, что превращение твердого раствора β в эвтоктоид $\alpha + \delta$ сопровождается заметным увеличением объема. Для сплава с 13,5% Al, близкого по составу к эвтектоидному, это увеличение равняется около 0,5%; для эвтектоидного же сплава оно будет еще больше.

В сплавах, содержащих эвтектоид $\delta + \eta$, нам не удалось заметить никакого изменения объема при закалке. Правда, сплавы этой группы отличаются очень большой хрупкостью и совсем не выдерживают многократных тепловых обработок, так что точность определений удельного веса значительно понижается. Но и полученные цифры (табл. 3) позволяют вполне определенно говорить, что в сплавах этой группы превращение $\varepsilon \rightarrow \delta + \eta$ происходит без изменения объема или с таким ничтожным изменением, которое ускользает от наблюдения. В сплавах первой группы (9,5 — 16,6% Al) микроструктура вполне тождественна с микроструктурой стали: на ряду с α или δ имеется эвтектоид $\alpha + \delta$, своей характерной полосчатостью напоминающий перлит стали.

Перлитовая структура этого эвтектоида всегда получается при медленном охлаждении сплава вместе с печью. Эту структуру мы иллюстрируем только одним снимком (13,5% Al) из целого ряда имеющихся в нашем распоряжении (фиг. 3).

В сплавах второй группы (21,7—25,9% Al) перлитовая структура совсем не наблюдается даже после самого медленного охлаждения от температуры плавления. Больше того, эвтектоидная структура этих сплавов настолько неясна, что заставляет сомневаться даже в существовании самого эвтектоида. Но если последний и существует, то с нашей точки зрения он не может быть пластинчатым, так как образование его не сопровождается изменением объема.

Сплавы Cu—Sn

В системе Cu — Sn, диаграмма плавкости которой здесь приводится (фиг. 4), мы подвергли изучению известный эвтектоид $\alpha + \delta$. Результаты определений удельных весов этих сплавов собраны в табл. 4.

Таблица 3

Тепловая обработка	Cu = 78,3%; Al = 21,7%			Cu = 75,9%; Al = 24,1%			Cu = 74,1%; Al = 25,9%		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %
Отлито в стальную изложницу	6,485	0,15420	—0,03	—	—	—	—	—	—
700—20°	6,483	0,1[illegible]425	—	6,165	0,16221	—	—	—	—
700°	—	—	—	6,165	0,16221	—	5,863	0,17056	+0,08
700—20°	—	—	—	6,161	0,16231	—	5,868	0,17042	—

Таблица 4

Тепловая обработка	Cu — 74,9%; Sn — 25,1%			Cu — 72,7%; Sn — 27,3%			Cu — 71,9%; Sn — 28,1%		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %
Отлито в асбестовую изложницу	8,660	0,11547	—	8,950	0,11173	—	—	—	—
700°	—	—	—	8,977	0,11139	—0,30	8,943	0,11182	0,21
700—20°	—	—	—	—	—	—	8,924	0,11206	—
600°	—	—	—	—	—	—	8,949	0,11174	0,27
700—20°	8,661	0,11546	—	—	—	—	8,925	0,11204	—
700°	8,669	0,11535	—0,10	—	—	—	8,945	0,11179	—0,23

Относительно этих сплавов следует отметить, что, отлитые в стальную изложницу, они показывают при последовательных тепловых обработках неправильные колебания удельных весов, что объясняется пористостью сплавов, незаметной невооруженному глазу. Цифры табл. 4 относятся к сплавам, отлитым в асбестовую изложницу, окруженную трепелом, — такие сплавы, застывавшие очень медленно, уже не показывают неправильных колебаний удельного веса при закалках и отжигах.

Из приведенных цифр с несомненностью вытекает, что превращение $\beta \rightarrow \alpha + \delta$ сопровождается увеличением объема, — правда, не столь заметным, как в сплавах Cu — Al, но все же не могущим ускользнуть от наблюдения. Вследствие ли того, что эвтектоидное превращение происходит при низкой температуре, или вследствие недостаточной пластичности структурных элементов эвтектоида $\alpha + \delta$, пластинчатая структура в нем наблюдается далеко не всегда.

В доэвтектоидных [3] (с избытком α) и эвтектоидных сплавах чаще всего наблюдается микроструктура, изображенная на фиг. 5, в заэвтектоидных [4] же сплавах (с избытком δ) часто наблюдается типичная перлитовая структура (фиг. 6).

Сплавы Cu — Zn

В этой системе, диаграмма плавкости которой приводится на фиг. 7, исследовались две группы сплавов.

Полученные для этих двух групп сплавов результаты приведены в таблицах 5 и 6. Как видно из табл. 5, превращение твердого раствора сопровождается небольшим уменьшением объема [1]. Сплавы второй группы показывают уменьшение объема при закалке и увеличение при отжиге; по величине это уменьшение близко подходит к сплавам Cu — Al.

Таблица 5

Тепловая обработка	Cu — 52,6%; Zn — 47,4%			Cu — 42,2%; Zn — 57,8%		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %
Отлито в стальную изложницу	8,340	0.11990	—	8,109	0,12332	—
800—20°	8,347	0,11980	—	—	—	—
750°	8,334	0,11999	+0,16	8,083	0,12372	+0,24
800—20°	—	—	—	8,102	0.12342	—
750°	—	—	—	8,070	0,12391	+0,40

[1] К этой же группе относится и исследованный нами заводской сплав, относящийся к типу латуней и содержащий по микроструктуре около 40% Zn. Он неизменно показывает при закалке увеличение объема на 0,07—0,99%. При анализе сплав оказался содержащим заметные количества Mn, поэтому он не внесен в табл. 5.

Таблица 6

Тепловая обработка	Cu — 25,5%; Zn — 74,5%			Cu — 24,5%; Zn — 75,5%			Cu — 19,7%; Zn — 80,3%		
	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %	Удельный вес	Удельный объем	Изменение удельного объема после закалки в %
Отлито в стальную изложницу	7,666	0,13045	—	—	—	—	—	—	—
600—20°	7,656	0,13061	—	7,740	0,12920	—	7,164	0,13959	—
600°	7,685	0,13012	—0,38	7,765	0,12878	—0,32	7,169	0,13949	—0,18
600—20°	7,663	0,13050	—	7,736	0,12927	—	—	—	—
600°	7,695	0,12995	—0,42	—	—	—	—	—	—

В сплавах первой группы пластинчатая микроструктура наблюдается лишь при очень продолжительном отжиге; эта микроструктура приводится в работе Карпентера [1]. Здесь также приходится принимать во внимание и низкую температуру превращения и недостаточную пластичность α и γ, чтобы объяснить трудность получения пластинчатой структуры эвтектоида [5].

В сплавах, содержащих эвтектоид $\gamma + \varepsilon$, перлитовая структура наблюдается всегда и настолько характерна, что самый эвтектоид называют иногда цинковым перлитом (фиг. 8).

Суммируя полученные результаты в одной таблице (табл. 7), мы видим, что наиболее резкое изменение объема наблюдается при образовании эвтектоидов, имеющих пластинчатую микроструктуру; менее значительное изменение объема наблюдается при образовании скрытопластинчатых эвтектоидов, в которых пластинчатая структура появляется только при некоторых условиях; наконец, эвтектоид Cu — Al, не имеющий пластинчатой структуры, не показывает и изменения объема при своем образовании.

Наблюдаемый параллелизм между микроструктурой и объемными изменениями при закалке и отжиге позволяет принять, что изменение объема при образовании эвтектоида из твердого раствора является необходимым условием для образования перлитовой структуры. Это условие необходимо, но оно недостаточно, так как пластичность структурных элементов эвтектоида при температуре превращения, повидимому, имеет также существенное значение при образовании эвтектоидов.

[1] „J. of Inst. of Metals", 1912, VII, 70

Таблица 7

Обозначение сплава	Состав эвтектоида	Температура эвтектоидного превращения в °	Максимальное наблюденное изменение удельного объема при закалке в %	Микроструктура эвтектоида
Fe+C	$Fe+Fe_3C$	~700	+1,10	Пластинчатая
Cu+Al	$\alpha+\delta$	567	—0,58	
Cu+Al	$\delta+\eta$	570	—	Зернистая
Cu+Sn	$\alpha+\delta$	520	—0,30	Скрыто-пластинчатая
Cu+Zn	$\alpha+\gamma$ [5]	470	+0,40	"
Cu+Zn	$\gamma+\varepsilon$	555	—0,42	Пластинчатая

II

Обращаясь к микроструктуре исследованных сплавов в закаленном состоянии, мы заметим, что большинство из них имеет типичную мартенситовую структуру, которая обычно получается в закаленной стали и которая изображена на фиг. 9 [6].

На фиг. 10—11 приведены микроструктуры закаленных алюминиевых бронз с 9,5 и 13,5% Al. Аналогия мартенситовой структуры этих бронз с мартенситом сталей уже неоднократно отмечалась в металлографической литературе и ясно видна из приводимых снимков. В сплавах Cu — Al, содержащих эвтектоид $\varepsilon+\eta$ и закаленных выше 570°, мартенситовой структуры заметить не удалось; иногда только наблюдалась очень слабая двойниковая штриховатость, ничего общего не имеющая с мартенситовой структурой предыдущих сплавов.

В сплавах Cu — Sn, закаленных выше 520°, мартенситовая структура наблюдается довольно часто, только иглы ее не достигают такого развития, как в стали или алюминиевых бронзах (фиг. 12).

Типичная мартенситовая структура наблюдается также в закаленных латунях (фиг. 13)[1], в сплавах с эвтектоидом $\gamma+\varepsilon$ мартенситовая структура, получающаяся при закалке, менее типична, но характер ее все же приближается к мартенситу сталей (фиг. 14).

Если сопоставить объемные изменения исследованных сплавов с микроструктурой их при закалке, нетрудно притти к выводу, что объемные изменения при закалке сопровождаются образованием мартенситовой структуры. В сплавах, в которых совсем не наблюдается изменения объема при закалке, не наблюдается и мартенситовой структуры. В правильности этого последнего поло-

[1] Здесь приводится наиболее типичная мартенситовая структура заводской латуни с примесью Mn; в чистых β-латунях мартенситовая структура менее типична.

жения нас убеждают сплавы Cu — Al второй группы, в которых не наблюдается ни объемных изменений, ни мартенситовой структуры. Точно так же сплавы, не испытывающие в твердом состоянии никакого превращения, не показывают ни изменения объема при закалке, ни мартенситовой структуры. Отсутствие объемных изменений в таких сплавах при закалке видно из табл. 8, а примерная структура их после закалки, равно как и до закалки, видна на фиг. 15.

Таблица 8

Тепловая обработка	Cu — 94,3%; Al — 5,7%		Cu — 83,3%; Zn — 16,7%		Cu — 91,1%; Sn — 8,9%	
	Удельный вес	Удельный объем	Удельный вес	Удельный объем	Удельный вес	Удельный объем
Отлито в стальную изложницу	—	—	8,599	0,11629	—	—
1000—20°	8,205	0,12188	—	—	—	—
800—20°	—	—	8,600	0,11628	—	—
900°	8,203	0,12191	—	—	—	—
800°	8,204	0,12189	8,599	0,11629	—	—
750°	—	—	—	—	8,725	0,11461
700°	—	—	8,600	0,11628	—	—
600°	—	—	—	—	8,723	0,11464
500°	—	—	—	—	8,721	0,11467
420°	—	—	—	—	8,721	0,11467

Таким образом, на основании полученного нами материала легко притти к мысли, что мартенситовая структура закаленных сплавов есть следствие внутренних напряжений, вызываемых объемными изменениями при закалке. Можно составить себе приблизительное понятие об этих внутренних напряжениях. По данным Хвольсона[1] коэфициент сжатия стали равен $0{,}68 \cdot 10^{-6}$, латуни — $0{,}95 \cdot 10^{-6}$. При увеличении внешнего давления на 1 *атм* объем стали изменяется на 0,000068%, латуни — на 0,000095%. Следовательно, для изменения объема стали на 0,68%, каковое изменение наблюдается при закалке в сталях средней твердости (0,6 — 0,7% C), необходимо давление в 10 000 *атм*;

[1] Хвольсон, Физика, 1, стр. 598.

для изменения объема латуни на 0,24%, что наблюдается при закалке латуни с 57,8% Zn, необходимо давление в 2526 атм.

Таким образом, приравнивая внутренние напряжения при закалке внешним давлениям, могущим вызвать аналогичное изменение объема, мы приходим к очень большим давлениям, поддерживающим металл в ненормально сжатом или в ненормально растянутом состоянии и могущим вызвать в кристаллах образование двойников, произвести значительные деформации в металле и существенно изменить самые свойства его. Большими внутренними давлениями можно объяснить появление в закаленном металле мартенситовой структуры и изменение физических, химических и механических свойств его в том же направлении, как при наклепке.

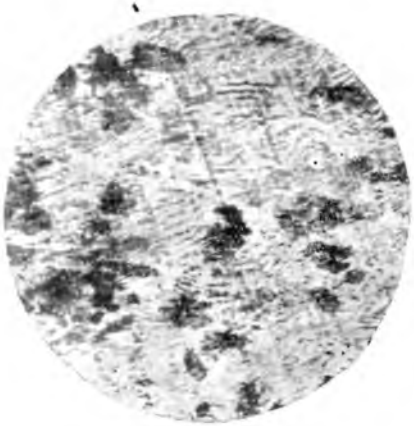
Указанные мысли, составляющие сущность механической теории закалки были впервые высказаны Ле-Шателье и в последнее время основательно защищаются многими авторами [1]. Все они сходятся на той мысли, что закалка вызывается внутренними напряжениями, возникающими при быстром охлаждении и производящими как бы наклепку металла. Привлекательность этой теории заключается не в том, что она более или менее остроумно объясняет многие вопросы, связанные с закалкой стали, а в том, что она стремится дать одно общее объяснение явлениям закалки, очевидно не составляющим привилегии Fe — C сплавов и наблюдаемым все чаще и чаще по мере изучения металлических и неметаллических сплавов.

Полученные нами результаты, далеко не полные, невольно вводят в круг идей, связанных с механической теорией закалки и заставляют продолжить настоящее исследование в том же направлении.

---

[1] „Журнал Русского металлургического общества", ч. 2, 1911, стр. 116; 1913, стр. 633; 1914, стр. 489.

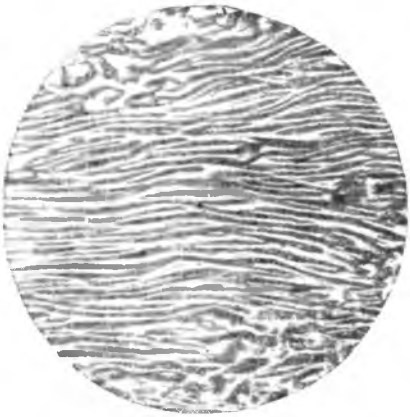
Фиг. 1. C — 0,83%, 1000—20°. × 500.



Фиг. 3. Cu = 86,5; Al = 13,5%; 1000—20°. × 500.

Фиг. 5. Cu = 79,7; Sn = 20,3%; 700—20°. × 125.

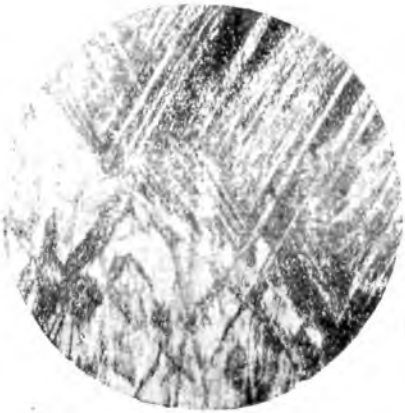
Фиг. 6. Cu = 70; Sn = 30%, отл. в асбест. изл. × 500.



Фиг. 8. Cu = 25,5; Zn = 74,5%; 600—20°. × 125.

Фиг. 9. C = 0,21%; зак. 800°. × 500.

Фиг. 10. Cu = 90,5; Al = 9,5%. зак. 900°. × 125.



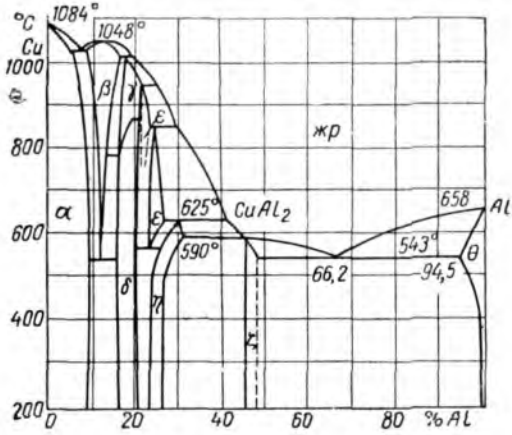
Фиг. 11. Cu = 86,5; Al = 13,5%; зак. 1000°. × 125.

Фиг. 12 Cu = 79,7; Sn = 20,3%; зак. 750°. × 125

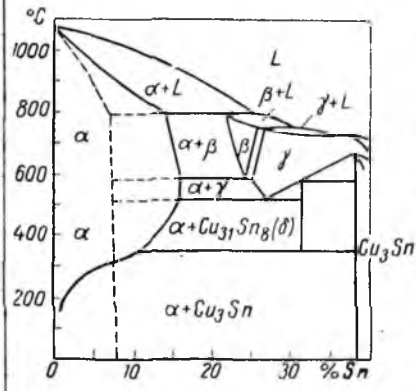
Фиг. 13. Заводская латунь с примесью Mn; зак. 700°. × 125.

Фиг. 14. Cu = 25,5; Zn = 74,5%; зак. 600°. × 125.

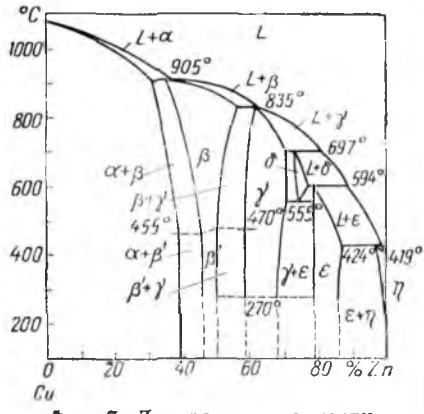
Фиг. 15. Cu = 91,1; Sn = 8,9%; зак. 750°. × 30.



Фиг. 2. Диаграмма плавкости системы Cu — Al.



Фиг. 4. Диаграмма плавкости системы Cu — Sn.



Фиг. 7. Диаграмма плавкости системы Cu — Zn.

ОБЪЕМНЫЕ И ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВОВ [1]

М. Г. ОКНОВ

Ленинградский политехнический институт

Среди всех материалов исследования сплавов изучение объемных изменений в них занимает очень важное место, так как удельный объем является наиболее активным свойством [1], изменяющимся при всех превращениях в сплавах.

Изучение удельного объема производится двумя методами — дилатометрическим и закалочно-объемным. В первом случае пользуются дилатометрами и непосредственно определяют изменения длины металлических образцов в том или ином интервале температур; при этом получаются при нагревании и охлаждении дилатометрические кривые, на которых отчетливо выступают все ненормальности в расширении или сжатии, отвечающие превращениям в металле. Вследствие большой чувствительности современных дилатометров на этих кривых удается обнаруживать наиболее слабые превращения, отмечаемые только самыми чувствительными методами — электроизмерительным и магнитным.

От линейных изменений, обнаруживаемых дилатометрическим методом, легко перейти к объемным, умножая лишь линейные величины на 3, причем подразумевается, что линейное изменение сплава тождественно по всем направлениям. Последнее предположение в громадном большинстве случае является правильным, и только в сплавах, предварительно обработанных давлением, с ориентированной в определенном направлении структурой, наблюдаются признаки анизотропности и в том числе неодинаковое тепловое расширение по разным направлениям. Но подобная анизотропность легко устраняется соответствующим отжигом сплава и может быть совершенно исключена при дилатометрических исследованиях.

Некоторое сомнение может вызывать величина линейных изменений в сплаве в момент происходящих в нем превращений еще в том отношении, что к сжатию или расширению от превращения может присоединиться тепловое сжатие или расширение, вызываемое резким изменением температуры сплава (рекалесценция) в момент превращения. Специальные опыты, произве-

---

[1] Бабошин А. Л., Термическая обработка обыкновенных и специальных сортов стали, 1926.

денные в этом направлении Дризеном [1], показали, что происходящее при этом изменение температуры сплавов настолько незначительно, что не может маскировать линейных изменений, вызываемых самим превращением. Таким образом, дилатометрические кривые, особенно получаемые на наиболее чувствительных из современных дилатометров, дают очень надежную характеристику состояния сплава в том или ином интервале температур.

С дилатометрическим методом не может конкурировать ни по точности результатов, ни по ясности получаемых величин второй метод изучения объемных изменений в сплавах — закалочно-объемный. Этим методом, состоящим в закалке сплава и последующем определении его удельного веса, получаются только указания на объемные изменения, вызываемые закалкой, и только для сплавов, принимающих ее.

В отношении этого метода высказывалось еще сомнение, не фиксируются ли закалкой и те тепловые объемные изменения, которые были вызваны нагревом перед закалкой. Но это сомнение в настоящее время можно считать устраненным, так как в сплавах, не имеющих никаких превращений, после закалки не наблюдается и никаких объемных изменений. В сплавах же, имеющих превращение и принимающих закалку, объемные изменения от закалки в широком интервале температур не зависят от температуры предварительного нагрева, что было бы невозможно, если бы закалкой фиксировались не только объемные изменения от превращений, но и тепловые изменения.

Отбрасывая указанные сомнения в отношении закалочно-объемного метода, следует все же сказать, что этим методом обнаруживаются лишь суммарно те объемные изменения, которые вызываются закалкой и происходящими при этом в сплаве процессами. Но для характеристики этих процессов закалочно-объемный метод дает больше указаний, чем метод дилатометрический, так как последний характеризует превращение в нормальных условиях, близких к стабильному состоянию, метод же закалочно-объемный характеризует превращение в условиях ненормального его протекания, при очень быстром охлаждении. Таким образом, оба метода, характеризующие нормально или ненормально протекающие превращения в сплавах, при совместном их применении могут осветить явления закалки, широко распространенные в металлических сплавах.

В настоящей статье мы постараемся сопоставить данные обоих указанных методов для сплавов, имеющих эвтектоидные или аллотропические превращения и принимающих закалку. К таким сплавам прежде всего следует отнести сплавы Fe — C, наиболее полно изученные обоими из указанных методов; диа-

---

[1] По E. Maurer, Mitt. aus d. K. Wilhelm Iinst. fur Eisenforschung, Bd. 1, (1920), 79.

грамма плавкости их приводится здесь на фиг. 1. Очень многими исследователями для этих сплавов были получены отчетливые дилатометрические кривые, общий вид которых представлен схематически на фиг. 2, где оси абсцисс соответствуют температурам нагрева или охлаждения, а оси ординат—изменениям длины образца.

На кривых, полученных при нагревании в момент превращения Ac_1 наблюдается значительное сжатие, а при обратном охлаждении в момент превращения Ar_1—значительное расширение сплавов. Не останавливаясь на деталях, обнаруживаемых дилатометрическими кривыми для сплавов, с различным содержанием С, мы подчеркнем только, что эвтектоидное превращение при нагревании (Ac_1) сопровождается сжатием, а при охлаждении (Ar_1) — расширением. Если бы закалкой фиксировался в Fe — С-сплаве объем, полученный им в результате происшедшего превращения (Ac_1), то после закалки объем сплава должен был бы уменьшиться по сравнению с объемом медленно охлажденного сплава.

Таблица 1

Температуры закалки в °	Плавка I	Плавка II	Состав изученных сталей в %	
	Изменение удельного объема при закалке в %	Изменение удельного объема при закалке в %	Плавка I	Плавка II
750	+0,03	9		
800	+0,60	+0,51		
850	+0.65	+0,57	C 1,30	1.53
900	+0,62	+0,54	Si 0,47	0,29
1000	+0,31	+0,37	Mn 0,56	0,50
1050	—0,05	—0,33	P 0,041	0,018
1075	—0,24	—0,25	Cr 3,15	4,20
1150	—0,55	—0,71		

Такое уменьшение объема после закалки удается наблюдать в некоторых сортах специальной стали, которые интенсивной закалкой фиксируются в состоянии аустенита. Пример такого уменьшения удельного объема при закалке можно видеть в полученных нами данных, приводимых в табл. 1 и относящихся к двум высокоуглеродистым хромистым сталям. В них после интенсивной закалки при высоких температурах наблюдается значительное уменьшение удельного объема, которое наблюдается и на дилатометрических кривых в момент превращения Ac_1.

Но указанное уменьшение удельного объема наблюдается очень редко: во всех углеродистых сталях и громадном большинстве специальных сталей всегда наблюдается увеличение удельного объема. Это подтверждается большим числом данных

многих исследователей [1] и является бесспорно установленным фактом. Таким образом, из сопоставления дилатометрических и закалочно-объемных данных вытекает, что сплавы Fe — C закалкой не фиксируются в состоянии, свойственном им при высоких температурах, и что при закалке в них происходят какие-то дополнительные процессы, сопровождающиеся увеличением объема.

Продолжим наше сопоставление дилатометрических и закалочно-объемных данных для других сплавов и прежде всего для двойных медных сплавов, среди которых имеется немало сплавов с ясно выраженными превращениями и бесспорной способностью принимать закалку. В сплавах Cu — Sn с содержанием олова от 13 до 33% имеется хорошо изученное эвтектоидное превращение при 520°, вполне характеризуемое диаграммой плавкости Cu — Sn (см. стр. 491).

Дилатометрические данные для этих эвтектоидных сплавов имеются в работе П. Бреско [2]. Все кривые для них показывают значительное (макс. — 0,5%) сжатие в момент превращения при нагревании и такое же расширение при охлаждении. Характер дилатометрических кривых здесь такой же, как и для сплавов Fe — C (фиг. 1). И здесь при интенсивной закалке, фиксирующей сплав в состоянии твердого раствора β, мы должны ожидать уменьшения объема, если только при закалке не происходит дополнительных процессов, сопровождающихся увеличением объема.

Произведенные нами закалочно-объемные измерения [3] для эвтектоидных сплавов Cu — Sn обнаруживают ожидаемое уменьшение удельного объема. Так как сжатие, получаемое при закалке (макс. — 0,30%), значительно меньше сжатия, наблюдаемого в момент превращения (макс. — 0,5% лин.), то можно думать, что закалкой только частично фиксируется состояние, свойственное этим сплавам при высоких температурах, но нет никаких оснований предполагать наличие дополнительных процессов, происходящих при закалке, как это имеет место при сплавах Fe — C.

Теперь мы переходим к сплавам, в которых превращения при нагревании сопровождаются расширением, а при охлаждении — сжатием. Для этих сплавов характер дилатометрических кривых может быть представлен схемой, изображенной на фиг. 3. В этих сплавах после закалки мы должны ожидать увеличения объема, если только при закалке не происходит каких-либо дополнительных процессов, сопровождающихся обратным изменением объема.

Среди сплавов Cu — Zn, диаграмма плавкости которых приводится на стр. 491, имеется группа сплавов, принимающих закалку и обнаруживающих при этом объемные изменения. Эта группа обнимает сплавы от 39 до 59% Zn, в которых при 453 —

---

[1] Окнов М. Г., „Журнал Русского металлургического общества", вып. 1, 1912, стр. 616, (эта статья помещена в настоящем сборнике).

[2] Ann. de Physique, 14 (1920), 5.

[3] „Журнал Русского металлургического общества", ч. 1, 1915, стр. 442.

470° наблюдается ясно выраженное аллотропическое превращение. Эти сплавы были хорошо изучены дилатометрически целым рядом исследователей и для всех них на дилатометрических кривых при нагревании наблюдается расширение макс. + 0,2% лин., а на кривых при охлаждении—сжатие. В полном соответствии с расширением при нагревании находится наблюденное нами увеличение удельного объема при закалке (макс. + 0,40%). Очевидно при закалке этих сплавов в значительной степени фиксируется то высокообъемное состояние, которое свойственно им при температурах выше 453—470°.

В сплавах Cu — Sb, диаграмма плавкости которых приводится здесь на фиг. 4, область сплавов, принимающих закалку, лежит от 8 до 49% Sb. В них при температурах 450 — 425° происходит аллотропическое превращение соединения Cu_3Sb. Это превращение сопровождается при нагревании большим расширением (ок. + 0,6%), а при охлаждении сжатием, что подтверждается дилатометрическими кривыми, полученными для этих сплавов Н. В. Агеевым в Институте металлов. При закалке этих сплавов, как и в сплавах с 39—59% Zn, фиксируется тот высокий удельный объем, который они получают в результате превращения при 450—425°. Это подтверждается произведенными нами определениями удельного объема этих сплавов после закалки. Цифровые величины, характеризующие линейные изменения этих сплавов по данным П. Бреско и объемные изменения их по нашим данным приводятся в табл. II.

Таблица II

% содержания Sb	Линейное изменение при 440—480° в %	% содержания Sb	Объемное изменение при закалке в %
7	0,07	—	—
15	0,20	15	0,26
32	0,62	17	0,54
38,6	0,57	30	2,09
40	0,57	33	1,91
42	0,33	38	1,01
45	0,27	45	0,65
48	0,13	—	—

Из сопоставления этих данных вытекает, что закалкой полностью фиксируется то расширение, которое происходит в момент превращения при нагревании. Такое же расширение сплава с 39% Sb при закалке наблюдалось в свое время А. А. Байковым [1], нашедшим для этого сплава увеличение удельного объема на 2%.

Для сплавов Al — Zn, диаграмма плавкости которых приводится здесь на фиг. 5, в области от 1 до 53% Al наблюдается

[1] Байков А. А., Исследование сплавов меди и сурьмы и явлений закалки, в них наблюдаемых, 1902.

ясное превращение при 256° и восприимчивость их к закалке. На дилатометрических кривых, полученных для этих сплавов многими исследователями, при температуре около 250—270° наблюдается ясно выраженный подъем при нагревании и столь же ясно выраженное падение при охлаждении. По данным Гиднерта [1] линейное расширение при нагревании достигает +0,23%. При закалке эти сплавы дают также увеличение объема, которое по произведенным нами определениям не превышает +0,30—0,32%. Очевидно и здесь закалкой фиксируется в значительной степени то состояние, в котором находятся эти сплавы выше температуры превращения.

Нам остается отметить две группы сплавов Cu — Zn и Cu — Al, обладающих дилатометрическими кривыми с явным подъемом при нагревании (фиг. 3), но обнаруживающих при закалке уменьшение удельного объема. Сплавы Cu — Al, диаграмма плавкости которых приведена на стр. 491, в области от 8 до 16% Al обнаруживают явное эвтектоидное превращение при 570°. Этому превращению на дилатометрических кривых по данным Бреско соответствует ясный подъем при нагревании и резкое падение при охлаждении. Такие же кривые были получены и Н. В. Агеевым для эвтектоидного сплава с 12,5% Al.

При закалке этих сплавов наблюдается, вопреки ожиданию, не увеличение объема, а уменьшение, достигающее 0,5—0,6%. Такое уменьшение удельного объема при закалке наблюдалось многими исследователями [2]. Это неожиданное уменьшение удельного объема при закалке указывает на возможность протекания в этих сплавах каких-то дополнительных процессов, связанных с закалкой и вызываемых ею.

Такое же несоответствие между дилатометрическими и закалочно-объемными данными наблюдается и в сплавах Cu — Zn от 68 до 78% Zn, обнаруживающих ясное эвтектоидное превращение при 555° и хорошо принимающих закалку. По данным Бреско этому эвтектоидному превращению на дилатометрических кривых соответствует заметный подъем при нагревании (макс. +0,2%) и падение при охлаждении. При закалке этих сплавов происходит значительное уменьшение объема, достигающее по нашим данным — 0,42%. Таким образом, закалкой здесь не только не фиксируется происшедшее при превращении расширение сплава, — наоборот, ею вызывается сжатие, связанное, очевидно, с теми дополнительными процессами, которые происходят при закалке.

Итак, рассмотренные нами сплавы можно разбить на две группы: в одной из них [Cu — Sn, Cu — Sb, Cu — Zn (50% Zn) и Al — Zn] наблюдается соответствие между дилатометрическими и закалочно-объемными данными, в другой [Fe — C, Cu — Al,

[1] Scient. Papers of Bureau of Standarts. № 497, 1925.

[2] Окнов М. Г., „Журнал Русского металлургического общества" ч. 1, 1915, стр. 442.

Cu — Zn (75% Zn)] этого соответствия нет. В первой группе сплавов закалкой более или менее полно фиксируется состояние, свойственное им при высоких температурах, во второй группе закалка вызывает какие-то дополнительные процессы, связанные с иным, чем в момент превращения, изменением объема. В сплавах Fe — C таким дополнительным процессом, происходящим при закалке, многие считали и считают наклеп Возможность появления его в металле, находящемся в сильно напряженном состоянии, совершенно естественна и подтверждается близостью свойств наклепанной и закаленной стали. Если принять во внимание, что при наклепе многими исследователями наблюдалось увеличение удельного объема того же порядка (до 1%), как и при закалке, то привлечение явлений наклепа к объяснению явлений закалки становится еще более естественным.

Но, может быть, такой же наклеп, только сопровождающийся уменьшением объема, происходит и в сплавах Cu — Al и Cu — Zn (75% Zn), обнаруживающих неожиданное уменьшение объема при закалке? Что при наклепе металлов возможно в некоторых случаях и уменьшение удельного объема, показывают данные Кальбаума и Штурма[1], нашедших уменьшение объема при наклепе для меди, и Лаури и Паркера [2], обнаруживших такое же уменьшение для Mg и Pt. Для выяснения характера объемных изменений при наклепе сплавов Cu — Al и Cu — Zn (75% Zn) нами было произведено определение удельного объема их в наклепанном и отожженном состояниях.

Ввиду хрупкости этих сплавов, исключающей обычные способы наклепа их растяжением или сжатием, нами был произведен наклеп превращением их в тонкую стружку на строгальном станке. Одна часть таких стружек подвергалась затем 1-часовому отжигу в вакууме при 600°, а другая оставлялась в наклепанном состоянии. Для наклепанной и отожженной стружек затем определялся удельный вес после предварительного кипячения их в воде при обыкновенной температуре под уменьшенным давлением. Полученные при этом данные для нескольких из рассмотренных нами сплавов приводятся в табл. III. Из нее совершенно ясно видно, что наклеп во всех сплавах вызывает такое же по знаку и по величине объемное изменение, как и в громадном большинстве чистых металлов, равно как и в сплавах Fe — C.

Таким образом, если в Fe — C сплавах наклеп может быть привлечен к объяснению объемных изменений в них при закалке, то в сплавах Cu — Al и Cu — Zn (75% Zn) наклеп, очевидно, неповинен в неожиданном уменьшении объема при закалке. В настоящее время объемные изменения при закалке Fe — C сплавов хорошо объясняются появлением в закаленной стали тетрагональной решетки α-железа. Для этой решетки определены

---

[1] Z. f. anorg. Ch., Bd. 46 (1905), 217.
[2] Trans. of Chemie Soc., 107 (1915, II), 1005.

параметры (Гонда, Селяков, Курдюмов и Гудцов, Курдюмов и Каминский), на основании которых вычисляются удельные объемы для закаленных сталей с различным содержанием углерода.

При закалке стали, таким образом, происходит дополнительный процесс построения высокообъемной тетрагональной решетки,

Таблица III

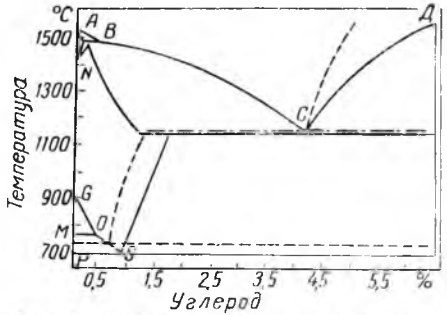
Обозначение медных сплавов	Изменение удельного объема при наклепе в %
Cu+28% Sn	+0,11
Cu+17,6% Sb	+0,22
Cu+13% Al	+0,11
Cu+50% Zn	+0,19
Cu+75 % Zn	+0,17

в результате чего закаленная сталь обнаруживает гораздо более высокий удельный объем, чем сталь в отожженном состоянии и с обычной кубической решеткой α—Fe. Нельзя ли предположить существование подобных промежуточных пространственных решеток и в закленных сплавах Cu — Al и Cu — Zn (75% Zn)? Нельзя ли думать, что эти сплавы при переходе от высокообъемных пространственных решеток, свойственных им при высоких температурах, к малообъемным, свойственным при низких температурах, образуют промежуточные малообъемные решетки, присутствие которых и обнаруживается пониженным удельным объемом этих сплавов после закалки? Мы оставляем эти вопросы открытыми, так как для ответа на них не имеется достаточного количества рентгенографических данных.

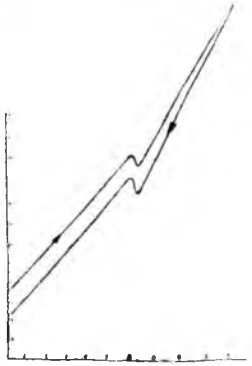
Мы ограничимся здесь только указанием на аналогию, существующую между рентгенографическими данными для Fe — C сплавов и таковыми же для сплавов Cu — Al. В закаленных Fe—C сплавах присутствие тетрагональных кристаллов с меняющимися отношениями осей проявляется на рентгенограммах размытостью линий. Такая же размытость линий наблюдается в закаленном эвтектоидном сплаве Cu — Al (с 12,5% Al); на эту размытость обращает внимание в своем исследовании Вестгрен [1]. Очень возможно, что образование промежуточных пространственных решеток при закалке является причиной указанной размытости, равно как и того ненормального сжатия, которое наблюдается в этих сплавах при закалке.

В заключение нам остается только высказать уверенность, что рентгеновский метод в применении к закалке нежелезных сплавов даст объяснение не только рассмотренным выше ненормальным объемным изменениям при закалке, но и внесет полную ясность в понимание самого процесса закалки.

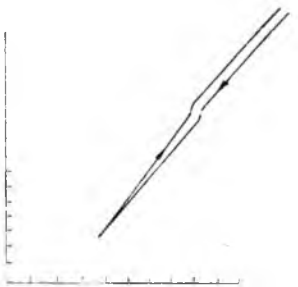
[1] J. of Inst. of Metals, vol. 31 (1924), 193.



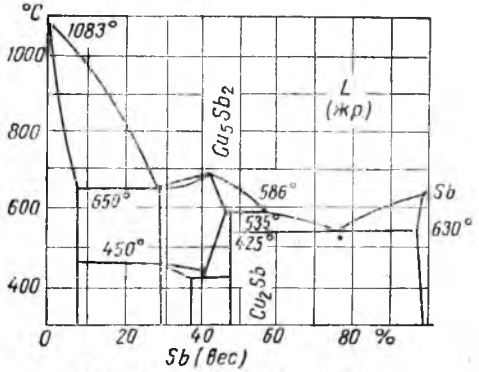
Фиг. 1. Диаграмма состояния системы Fe — C.



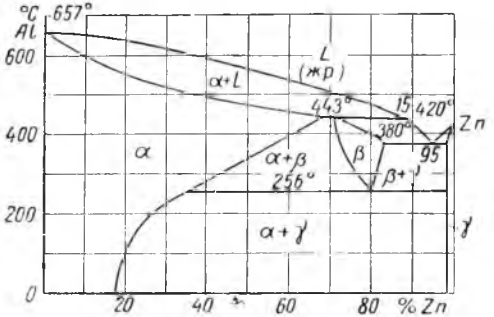
Фиг. 2.



Фиг. 3.



Фиг. 4. Система Cu — Sb.



Фиг. 5. Система Al — Zn.

ПРИМЕЧАНИЯ РЕДАКЦИИ К СТАТЬЯМ М. Г. ОКНОВА

I. ПРИМЕЧАНИЕ К СТАТЬЕ „ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМА СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ“

1. Печатается из „Журнала Русского металлургического общества“ за 1912 г., № 5, ч. I, стр. 616—631.

Из вводной части статьи при редактировании выпущены ссылки на некоторые устарелые данные, касающиеся дилатометрического анализа и не связанные с дальнейшим текстом.

2. В подлиннике вместо „фазовые изменения“ применено выражение „молекулярные изменения“. В дальнейшем тексте везде, где встречаются слова „фазовые изменения“, сделана такая же замена.

3. Из табл. 1 и фиг. 2 видно, что данные Меткальфа и Ланглея страдают не только отсутствием измерения температур нагрева при закалке. В этих данных имеются, очевидно, ошибки при определении удельного объема. Например, нельзя никак объяснить неожиданные скачки кривой изменения объема в стали, содержащей $C = 0{,}649\%$.

4. В подлиннике вместо „заэвтектоидные стали“ применено название „гиперэвтектоидные стали“. В дальнейшем тексте сделана такая же замена в соответствии с принятой в настоящее время терминологией.

5. Это замечание Окнова с современной точки зрения совершенно правильно. Марганец повышает прокаливаемость стали, и изменения объема стали при закалке образцов делаются более резкими и заметными.

6. В подлиннике вместо „аустенито-полиэдрической структуры“ указано „мартенситово-полиэдрическая структура“. Дело в том, что в 1912 г. превращение аустенита в мартенсит не было изучено. Не было также достоверных данных об изменении свойств стали при закалке. Развитию существующих ныне взглядов на процесс закалки способствовало изучение и накопление данных об изменениях, происходящих в стали при быстром охлаждении. Большое значение в этом отношении имела данная работа М. Г. Окнова.

7. Температура 700°, соответствующая резкому увеличению объема в опытах автора, является точкой *a* Чернова при охлаждении, так как закалка производилась с предварительным нагревом до 1000°, последующим охлаждением вместе с печью до заданной температуры и дальнейшим охлаждением в воде.

8. Здесь опущен абзац, где автор пытается объяснить противоположный характер объемного изменения при нагревании и при закалке стали. В дальнейшем было установлено, что увеличение объема стали при закалке связано с переходом аустенита в мартенсит, а уменьшение объема при нагревании — с превращением перлита в аустенит. Этот вопрос подробно рассмотрен в статье М. Г. Окнова (1930 г.) „Объемные и дилатометрические исследования сплавов“, помещенной в этом сборнике.

9. В подлиннике вероятно ошибочно указано „с одинаковым содержанием Мп“.

II. ПРИМЕЧАНИЯ К СТАТЬЕ „ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМА МЕТАЛЛОВ ПРИ ЗАКАЛКЕ“

1. Печатается из „Журнала Русского металлургического общества“ за 1915 г., № 3, стр. 442—455. При редактировании статьи произведена замена диаграмм состояния Cu — Zn, Cu — Sn и Cu — Al по позднейшим данным. Кроме того, из статьи исключены некоторые устаревшие ссылки.

2. Обозначения твердых растворов изменены против первоначального текста 1915 г. в соответствие с диаграммами состояния, изображенными на фиг. 2, 4 и 7.

3. В тексте 1915 г. применен термин „гипоэвтектоидный сплав“. В настоящем издании этот термин заменен современным — „доэвтектоидный сплав“.

4. Термин „заэвтектоидный“ применен вместо „гиперэвтектоидный“.

5. Как видно из фиг. 7, данные Карпентера не подтвердились. Эвтектоидный распад фазы β на $\alpha + \gamma$ в дальнейших исследованиях не установлен.

6. На фиг. 9 показана структура, состоящая из феррита и мартенсита.

III. ПРИМЕЧАНИЯ К СТАТЬЕ „ОБЪЕМНЫЕ И ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВОВ“

1. Печатается из журнала „Металлург“ за 1930 г., № 1, стр. 1—9. В статье изменены диаграммы состояний в соответствие с позднейшими данными, а также выпущены некоторые устаревшие ссылки.

2. Эти положения М. Г. Окнова были реализованы впоследствии. Советский ученый Г. В. Курдюмов, пользуясь рентгеновским методом, создал теорию закалки черных и цветных сплавов и внес ясность в понимании процесса закалки и отпуска.

СОДЕРЖАНИЕ

От составителей 5

Предисловие 7

ПАВЕЛ ПЕТРОВИЧ АНОСОВ

Великий русский металлург П. П. Аносов (1797—1851) 15
Список трудов П. П. Аносова 36

П. П. Аносов — О булатах 38
Приложение к сочинению о булатах 79
Примечание редакции к статье П. П. Аносова „О булатах“ . . 112

НИКОЛАЙ ВЕНИАМИНОВИЧ КАЛАКУЦКИЙ

Н. В. Калакуцкий (1831—1889) 115
Список трудов Н. В. Калакуцкого 129

Н. В. Калакуцкий — Исследование внутренних напряжений в чугуне и стали 131
Примечания редакции к статье Н. В. Калакуцкого „Исследование внутренних напряжений в чугуне и стали“ 214

АЛЬФОНС АЛЕКСАНДРОВИЧ РЖЕШОТАРСКИЙ

А. А. Ржешотарский (1847—1904) 219
Список трудов А. А. Ржешотарского 239

А. А. Ржешотарский — Микроскопические исследования железа, стали и чугуна 240
Примечания редакции к статье А. А. Ржешотарского „Микроскопические исследования железа, стали и чугуна“ 275

НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ БЕЛЯЕВ

Н. И. Беляев (1877—1920) 279
Список трудов Н. И. Беляева 303

Н. И. Беляев — Макроструктура стали в связи с кристаллизацией . . 305
Н. И. Беляев — Сталь (части I и II) 325
Н. И. Беляев — Введение в изучение термической обработки стали . 355
Примечания редакции к статьям Н. И. Беляева 408

АЛЕКСАНДР ЛЬВОВИЧ БАБОШИН

А. Л. Бабошин (1872—1938) 411
Список трудов А. Л. Бабошина 421
А. Л. Бабошин — Смятие (текучесть) в рельсах 424
А. Л. Бабошин — Структурно свободный цементит в мягкой стали . . 445
Примечания редакции к статьям А. Л. Бабошина 453

МИХАИЛ ГРИГОРЬЕВИЧ ОКНОВ

М. Г. Окнов (1878—1942) 457
Список трудов М. Г. Окнова 465
М. Г. Окнов — Изменение объема стали при закалке 467
М. Г. Окнов — Изменение объема металлов при закалке 481
М. Г. Окнов — Объемные и дилатометрические исследования сплавов . 492
Примечания редакции к статьям М. Г. Окнова 501

Технич. редактор *С. М. Попова* Корректор *А. С. Новикова*
Художник *А. Л. Бельский*

Сдано в производство 17/XI 1950 г. Подписано к печати 19/V 1951 г.
Т-02269 Тираж 5000 экз. Печ. л. 34,88 (3,5 л. вкл.) Бум. л. 17,44.
Уч.-изд. л. 36,75. Бумага 60×92¹/₁₆. Зак. № 2988.

1-я типография Машгиза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10