

Герасимова Л.П. Гук Ю.П.

ПРАКТИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛОГРАФИЯ

**2017
Москва**

АННОТАЦИЯ

Описаны следующие методы исследования качества металлов и сплавов:

- оптическая металлография; фрактография; температурная металлография.

Приведены систематизированные сведения для различных металлов и сплавов, их сварных и паяных соединений о способах изготовления шлифов (различных форм и размеров), о методах выявления структуры (даны таблицы реактивов и режимов травления химическими, электрохимическими и другими способами), показаны характерные микроструктуры основных конструкционных материалов.

Рассмотрены стандартные (с указанием соответствующих ГОСТов), и нестандартные металлографические методы исследования структуры металлов.

Даны сведения о технических возможностях основных современных физических методов, позволяющих получать дополнительные сведения о качестве материалов. Также приведены отечественные и зарубежные ГОСТы и ИСО по контролю механических, технологических и физических свойств материалов.

Предназначен для инженерно - технических работников заводских лабораторий, технологов и работников ОТК металлургических и машиностроительных отраслей промышленности, а также для студентов и аспирантов соответствующих ВУЗов.

**Герасимова Лилия Петровна
Гук Юрий Петрович**

Научный редактор Т.А.Карасева

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основой современного машиностроения являются металлические материалы, производство которых продолжает неуклонно возрастать. Поэтому актуальной задачей является повышение качества металлопродукции, позволяющее снижать металлоемкость изделий и повышать их надежность, особенно в условиях дальнейшей интеграции России в единое мировое экономическое сообщество.

В ряду традиционных и современных методов контроля качества металла особое место принадлежит металлографическим методам, которые позволяют проводить ускоренный массовый контроль полуфабрикатов и металлопродукции.

Известно, что большинство наиболее важных свойств металлов (в т.ч. таких, как сопротивление пластической деформации и разрушению) зависит от особенностей их структуры. Практика требует быстрого получения необходимых сведений о свойствах материала в том или ином состоянии и о структуре, обеспечивающей эти свойства.

Одним из наиболее распространенных методов являются методы световой (оптической) металлографии, позволяющие

- на макроуровне (увеличение до 40 крат) выявлять неоднородность химического состава, ликвацию элементов, идентифицировать макронесплошности и т.д.
- на микроуровне (увеличение до 2000 крат) определять величину зерна, структурные составляющие, определять природу неметаллических включений, идентифицировать микронесплошности и т.д.

Методы фрактографии (исследование изломов), являющиеся одними из объективных и информативных способов оценки качества металла, выявляют слабые зоны в строении металла, способствующие разрушению.

Методы температурной металлографии совмещают достоинства металлографических и фрактографических методов, а также методов одновременного исследования прочностных и пластических свойств металлических материалов. Преимуществом этого метода является возможность проследивать изменение структуры и кинетику разрушения от момента зарождения трещин до полного разрушения образца (изделия) и четко выявлять структурные факторы, ответственные за преждевременное зарождение и развитие трещин в металле, т.е. «слабое звено» в его структуре.

В справочнике приведен обширный систематизированный материал о различных методах и способах изготовления шлифов и выявления структуры различных металлов. Показаны характерные структуры основных конструкционных материалов.

Наряду со стандартными металлографическими методами контроля качества металлов (с указанием ГОСТов и соответствующих им международных стандартов ИСО) приведены нестандартные, но весьма информативные методы, позволяющие получать полезные сведения о работоспособности материала.

В справочнике также даны краткие сведения о технических возможностях основных современных физических методов, которые позволяют получать дополнительные сведения об особенностях структуры металла.

Дополнительно в справочнике приведены ГОСТы и ИСО по методам испытаний механических, технологических и физических свойств полуфабрикатов и металлоизделий, а также их сварных и паяных соединений.

Глава 1

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШЛИФОВ

Под структурой металлов и сплавов понимают их строение, т.е. наличие различных по природе и строению фаз, их размеры, количество, взаимное расположение, форму, неметаллические и металлические включения, дефекты.

Металлографическая оценка качества металла производится, в основном, на шлифах – образцах или участках изделия, имеющих гладкую плоскую шлифованную (для макроисследований) и полированную зеркальную (для микроисследований) поверхность.

Несмотря на то, что шлифы демонстрируют случайные сечения в объеме металла, имеется статистическое соответствие характеристик изображения структуры на площади шлифа и структуры в объеме металла. Это позволяет оценивать качество металла по изучаемым его сечениям.

1.1 Подготовка образцов для шлифов

Стандартная технология изготовления шлифов должна соответствовать следующим условиям:

- быть применимой к различным группам материалов и структур;
- обеспечивать хорошее качество шлифов для рядовых исследований как при ручном, так и при механизированном изготовлении шлифов;
- состоять из минимального количества операций;
- быть экономичной по затратам времени и средств.

Стандартная технология изготовления шлифов состоит из следующих операций:

- вырезки образцов – абразивная резка с обильным охлаждением с применением абразивных кругов минимальной толщины из корунда на резиновой или из искусственных смол связке;
- заделки шлифов (при необходимости) в обойму, пластмассу и т.п.;
- плоского шлифования с водой на водостойкой шлифовальной бумаге;
- предварительного полирования алмазной пастой на тонком гладком носителе из натурального или искусственного шелка с повышающей эффект полирования спиртосодержащей жидкостью для улучшения скольжения;
- окончательного полирования суспензией глинозема на эластичном носителе с ворсистой поверхностью.

Основной набор оборудования состоит из отрезного станка и шлифовально-полировального станка с вращающимися кругами.

Вырезка, шлифование и полирование образца должны выполняться так, чтобы на поверхности шлифа оставался минимальный по глубине слой деформированного (искаженного) металла, что необходимо для выявления истинной структуры металла при травлении. На поверхности шлифа не должно быть царапин, ямок, пятен и др. Шлиф должен быть достаточно плоским, возможно изучать его при больших увеличениях.

Макрошлиф – образец, для изучения макроструктуры. Его размеры могут быть различными в зависимости от размеров исследуемого объекта. Из крупных отливок - поковок обычно вырезают несколько образцов с различных участков и в продольном и поперечном направлениях. Образцы из очень вязких или очень твердых материалов, не поддающихся разрезке обычными механическими способами, изготавливают анодно-механической, ультразвуковой или электроэрозионной резкой.

Микрошлиф – образец, подготовленный для исследования структуры при больших до 2000 крат увеличениях.

Вырезка образцов

Место вырезки образцов из участков изделий определяется задачами исследования. При вырезке образцов из крупных деталей допускается механическая или огневая резка, но при этом необходимо, чтобы металл в плоскости будущего шлифа не нагревался во избежание искажения его структуры.

Монтаж образцов

Монтаж образцов в различные приспособления осуществляется при изготовлении микрошлифов из образцов, имеющих сложную конфигурацию или малые размеры. Монтаж образцов необходим при использовании автоматических установок. Наиболее простой способ – заделка образцов в

металлические зажимы-струбцины либо запрессовка или заливка их в различные пластмассы и легкоплавкие сплавы (например, сплавом Вуда).

1.2 Шлифование

Механическое шлифование

Для удаления грубого рельефа и наклепа на поверхности образца, получающегося при вырезке, применяется обработка его шлифовкой. Шлифовку выполняют путем истирания поверхности образца при последовательном переходе ко все более мелкозернистому абразивному материалу. Зернистость абразивных материалов определяется по ГОСТу 3647-71. Для изготовления микрошлифов механическим способом применяется шлифовальная бумага (табл. 1.1).

Химико-механическое шлифование

При этом методе в качестве шлифовального материала применяют так называемые пасты ГОИ и другие, в состав которых вместе с абразивами входят поверхностно активные вещества, оказывающие химическое воздействие на поверхность обрабатываемого металла. В табл. 1.2 приведены составы шлифовальных паст подобного типа.

Наряду со станками для шлифования при обработке мягких металлов могут применяться приборы для срезания поверхностных слоев – макро- и микротомы. Отшлифованный нож, перемещаемый с помощью микрометрических передач, срезает слой с поверхности образца толщиной в несколько микрометров.

Таблица 1.1 Характеристика шлифовальной бумаги для изготовления шлифов

Группа абразивного материала	Номер зернистости по ГОСТу 3647-71	Размер основной фракции, мм	Шлифовальная бумага
Шлифзерно	40	500 - 400	На тканевой основе (ГОСТ 5009-75)
	32	400 - 315	
	25	315 - 250	
	20	250 - 200	
	16	200 - 160	
Шлифпорошки	12	160 - 215	На бумажной основе (ГОСТ 6456-75)
	10	125 - 100	
	8	100 - 80	
	6	80 - 63	
	5	63 - 50	
	4	50 - 40	
	3	40 - 20	
Микropорошки	M40	40 - 28	На меланированной двухкатной основе (ГОСТ 10054-75)
	M28	28 - 20	
	M20	20 - 14	
	M14	14 - 10	

Таблица 1.2 Состав шлифовальных паст, % мас.

Компоненты	Пасты ГОИ			Пасты хромоалюминиевые		
	тонкая	средняя	грубая	тонкая	средняя	грубая
Окись хрома	72	76	86	32	35	37
Окись алюминия	-	-	-	32	35	37
Стеарин и другие связующие	24	20	12	30	24	20
Олеиновая кислота	1,8	1,8	-	3	3	3
Керосин	2	2	2	2	2	2
Сода	0,2	0,2	-	1	1	1

В некоторых случаях поверхность такого реза можно подвергать травлению для выявления структуры без дополнительной полировки.

Для получения шлифа с хорошо шлифованной поверхностью, необходимо при каждом переходе от одного номера бумаги к другому изменять также направление движения образца перпендикулярно

предыдущему. При этом шлифование необходимо вести, пока риски, оставшиеся от предыдущего номера бумаги не будут полностью уничтожены и перекрыты следами от бумаги данного номера.

Шлифование производят как вручную на стеклянных плитах или механически – на шлифовальных станках. При шлифовании вручную стеклянную плиту смачивают несколькими каплями керосина, затем наносят равномерный слой полировочной пасты и шлифуют в одном направлении. При переходе на средний слой пасты изменяют направление шлифования на 90 градусов и шлифуют до удаления рисков, оставленных более грубой пастой. Затем шлифуют еще более тонкой пастой, предварительно также изменяя направление шлифования.

Предварительную подготовку поверхности шлифа проводят любым способом – точением, фрезерованием или шлифованием на корундовых или карборундовых шлифовальных камнях. При химико-механическом методе приготовления шлифов на предварительную обработку обращают особое внимание. При этом стремятся достичь возможно более точной плоскости, чтобы в дальнейшем меньше времени затрачивать на доводку. Обработка резцом или фрезой дает лучшие результаты, так как их следы легче удаляются пастой при последующей доводке, чем следы камня. При механической доводке на станках на пасту наносят на вращающийся слегка смоченный керосином диск тонким равномерным слоем, перемещая брусок пасты по радиусу диска. Кольцевые окружности наносят близко одну к другой без просветов. Шлиф при доводке также перемещают по радиусу диска, так как при этом диск изнашивается более равномерно.

После окончательного шлифования на бумаге с наиболее мелким зерном образец хорошо промывают в проточной воде.

Почернение слоя пасты указывает на потерю ею полирующей способности. После полного почернения пасты диск смачивают керосином, удаляют с него продукты износа, а затем снова смазывают тонким слоем пасты для дальнейшей обработки.

При работе с тонкой пастой рекомендуется оставлять больше керосина, чем при грубой пасте.

1.3 Полирование

Механическое полирование

Полирование шлифов проводят механическим или химическим способами.

Механическое полирование проводят на станках и приборах, подобных используемым для шлифования. Полирование выполняют одним или несколькими сортами абразивов, в качестве которых применяют оксиды алюминия, хрома, магния, железа, алмазные смеси. Наиболее употребимыми являются пасты с алмазными зёрнами размером 15; 7; 2; 1; 0,25 мкм. Обычно полируют на войлоке (ГОСТ 6089) или на бархате (ГОСТ 7081 – 93).

Полирование на сукне проводят обычно с применением оксида алюминия или оксида магния. Иногда для этих целей применяют специальные тонкие пасты.

В большинстве случаев при приготовлении шлифов достаточно двух паст – 40 и 10 мкм. При этом чистота поверхности шлифа соответствует 14 классу по ГОСТ 2789-59.

При полировании поверхности образца получают зеркальную поверхность с шероховатостью $R_z = 0,05-0,04$ мкм, свободную от царапин.

Следует отметить особенности подготовки шлифов из некоторых материалов.

1. В случае пористых материалов с легко выкрашивающимися включениями образцы, нагретые до 70-80°C, следует перед окончательным полированием погружать в расплавленный парафин. После охлаждения избыток парафина снимают с поверхности ватой, а образцы окончательно полируют на сукне.

2. Готовить шлифы из быстро окисляющихся сплавов, содержащих щелочной или щелочно-земельный металл, обычным путем невозможно из-за быстрого окисления и гидратирования поверхности. Для предотвращения окисления, поверхность образца зачищают на камне, шлифуют и полируют с применением пасты ГОИ и скипидара. Перед окончанием полирования круг смачивают струей скипидара. Затем на поверхность шлифа быстро наносят ватой раствор 0,1-0,2 г кедрового масла или канадского бальзама в 10 мл серного эфира. После испарения эфира на шлифе остается тонкая, прозрачная пленка канадского бальзама, не препятствующая изучению микроструктуры. При необходимости последующего травления шлиф смачивают эфиром и протирают.

3. Основное отличие методики изготовления шлифов из твердых сплавов от обычной методики изготовления шлифов – применение в качестве абразивных материалов алмазной пыли и карбида бора. При этом процесс приготовления шлифа включает следующие операции:

- выравнивание поверхности карборундовым кругом и грубое шлифование на чугунной плите с применением керосина и порошка карбида бора (зерно 5 – 15 мкм);
- шлифование на вращающихся чугунных дисках (800 об/мин) с применением смеси спирта и алмазной пыли в два приема: фракции алмазной пыли 3 – 5 и 1 – 3 мкм;
- полирование на вращающемся деревянном диске с применением масляной суспензии с алмазной пылью зернистостью 1-2 мкм и последующее окончательное полирование на фетре с алмазной пылью зернистостью 1 мкм.

Масляная суспензия с алмазной пылью может быть заменена раствором состава: 5-7 мл 20 %-ного раствора едкого кали, 5-7 мл 20 % -ного раствора красной кровяной соли, 40 г реактивной окиси алюминия, 900 мл дистиллированной воды.

Твердые сплавы рекомендуется полировать также на тонком сукне с втертым в него алмазным порошком (диаметром 1-2 мкм), смазанным легким слоем парафина или сухого спирта.

Химическое полирование проводят в реактивах, указанных в табл. 1.3.

Таблица 1.3 Реактивы для химического полирования

Полируемый материал	Состав реактива	Условия полирования
Алюминий и его сплавы	Серная кислота ($d = 1,75$) - 75 мл; ортофосфорная кислота ($d = 1,84$) - 70 мл; азотная кислота ($d = 1,4$) - 5 мл	Температура 85 °С, длительность 0,5-2 мин
Медь	Ортофосфорная кислота ($d = 1,84$) - 33 мл; ледяная уксусная кислота ($d = 1,065$) - 33 мл	Температура 60-70°С, длительность 1-2 мин
Сплавы меди	Азотная кислота ($d = 1,4$) - 30 мл; соляная кислота ($d = 1,75$) - 10 мл; ортофосфорная кислота ($d = 1,84$) - 10 мл; ледяная уксусная кислота ($d = 1,065$) - 50 мл	Температура 70-80°С, длительность 1-2 мин
Сталь и железо	Дистиллированная вода 80 мл; щавелевая кислота (100 г/л) - 28 мл; перекись водорода (30 %) - 4 мл	Температура 35°С, длительность 15 мин
Никель	Азотная кислота ($d = 1,4$) - 30 мл; серная кислота ($d = 1,84$) - 10 мл; ортофосфорная кислота ($d = 1,84$) - 10 мл; ледяная уксусная кислота ($d = 1,065$) - 50 мл	Температура 85-95°С, длительность 0,5-1 мин

Электролитическое полирование

Электрополирование представляет процесс анодного растворения металлов, в результате которого получается гладкая блестящая полированная поверхность.

Образец, подготовленный механическим шлифованием, погружают в качестве анода в электролизную ванну, выдерживают при заданном режиме (плотности тока и температуре электролита) определенное время. После чего извлекают, промывают и просушивают.

При проведении механического полирования возникают искажения поверхностного слоя металла. Это не вызывает осложнений при дальнейшем исследовании, если при последующем травлении поверхностный слой металла удаляется, однако в некоторых случаях этого достигнуть трудно. Тогда целесообразно проведение электролитического полирования, основанного на анодном растворении металла.

При проведении электролитического полирования применяют следующее оборудование:

- электрополировочная ванна с катодами и устройствами для нагрева и охлаждения;
- приспособления для регулирования электрического режима;
- приспособления для крепления полируемых образцов;
- источник постоянного электрического тока низкого напряжения.

Составы наиболее употребляемых электролитов и режимы электрохимического полирования приведены в табл.1.4.

При электролитическом полировании на поверхности анода (шлифа) образуется слой продуктов реакции, который может существенно замедлить процесс полирования. Для предотвращения этого электролит в процессе полирования энергично перемешивают.

Электрохимическое полирование наиболее успешно применяется при работе с однофазными материалами (аустенитные и ферритные стали, медь, алюминий, титан, никель и т.п.), но этот метод малоприменим при работе с перлитными сталями, чугунами, многофазными сплавами. Составы некоторых наиболее часто используемых электролитов и режимы электролитического полирования приведены в табл.1.4. Наиболее употребляемые реактивы и режимы электрополирования приведены в таб. 1.5.

Таблица 1.4 Основные реактивы для электрополирования конструкционных материалов (сталь, Al, Ti, Ni, Cu и другие сплавы)

Состав	Количество мл	Режим полирования*			τ, мин
		<i>i</i> , А/см ²	<i>U</i> , В	<i>t</i> , °С	
Хлорная кислота	100	0,2 - 0,5	60 -70	30	0,5-1**
Уксусный ангидрид, хлорная кислота, уксусная кислота (ледяная)	400 300 5	До 1,0	40-60	50	3-5
Плавиковая кислота серная кислота Глицерин	120-150 350-400 60-120	0,7 -2,0	10-30	25-35	0,5-1
Плавиковая кислота фосфорная кислота уксусный ангидрид	40 150-200 40	0,5 -1,0	10-30	20-40	1-5
Плавиковая кислота, хромовая кислота, вода	80 250 170	0,2 - 0,5	3-7	10-20	3-5
<u>Примечание</u> *Катод – титан или нержавеющая сталь. **Периодами.					

Приготовление микрошлифов на крупных деталях без вырезки образцов

При механическом приготовлении микрошлифа непосредственно на крупногабаритном изделии (конструкции) предназначенное для исследования место шабруют, шлифуют абразивными кругами и полируют с помощью паст. Шлифование выполняют также наждачной бумагой, наложенной на эластичную подкладку, или абразивными порошками в виде суспензии, нанесенной на сукно.

Полирование производят валиком с фетром или сукном, смачиваемым водной суспензией оксида хрома или оксида алюминия. Для приготовления шлифов непосредственно на трубах пользуются переносной шлифовально-полировальной машинкой с гибким валом.

Существует несколько способов электрохимического полирования на поверхности изделия. Простейший из них: используется электролиз в тонкой пленке электролита между полируемой поверхностью и накладным катодом, представляющим пластину из нержавеющей стали, которая покрыта пористым кислотостойким материалом, обладающим эластичностью и хорошо удерживающим электролит. При этом используются переносные приборы, состоящие из блока питания, тампона с катодом и кюветы для электролита.

Составы электролитов при этом идентичны употребляемым при электрополировании образцов, но плотность тока и напряжение должны быть повышены, а время полирования остается прежним.

1.4 Практические рекомендации по изготовлению шлифов из конструкционных материалов

Материалы на основе железа

Низколегированные стали

Резка образцов сечением до 8 мм² абразивным корундовым кругом осуществляется без охлаждения при скорости резания 60-80 м/с, более толстых образцов – с охлаждением эмульсией при скорости резания 20-40 м/с. Скорость подачи – максимально высокая, ручную подачу осуществляют плавно и непрерывно.

Электролитическое шлифование проводится с охлаждением на перфорированной или пропитанной электролитом водостойкой абразивной бумаге, при этом рабочий круг служит катодом. Состав электролита: раствор 100 г персульфата аммония на 1000 мл воды. Режим: плотность тока 30–50 мА/см², скорость вращения 120–180 мин⁻¹, продолжительность 30 с.

Механическое полирование. Вариант 1 – на вращающемся круге при ручном полировании скорость вращения 200-500 мин⁻¹, для структур с высоким содержанием феррита рекомендуется многократное промежуточное травление в 3%-ном спиртовом растворе азотной кислоты; вариант 2 – одноступенчатое виброполирование на водной суспензии оксидов металлов, разбавленной в соотношении 1:1,5, продолжительность полирования 60-80 с.

Химическое полирование. Состав раствора: 70 мл H₂O₂ (3%-ный), 5 мл HF (40%-ный), 40 мл H₂O. При температуре 20-30°C продолжительность полирования 30-90 с. После полирования поверхность депассивируется в 30%-ном H₂O₂ или механически дополировывается.

Электролитическое полирование. Рекомендуемый состав электролита: 200 мл HClO₄, 700 мл C₂H₅OH, 100 мл C₆H₁₄OH. Режим полирования: напряжение 30 В, плотность тока 400-800 мА/см², продолжительность 30 с.

Электролитическо-механическое полирование. Рекомендуемый состав электролита: суспензия, содержащая 20 г сульфата аммония, 100 мл глиноземного концентрата, 900 мл воды. Полирование производят на вращающемся круге: скорость вращения – 100–120 мин⁻¹, плотность тока – 10-15 мА/см², продолжительность – 4–6 мин.

Применение целесообразно при обработке серии шлифов. Часто одновременно с полированием выявляется структура.

Высоколегированные стали

Последовательность операций при изготовлении шлифов такая же, как и для низколегированных сталей. Для однородных структур предпочтительнее электрохимические методы обработки, для гетерогенных структур с карбидами – механические из-за более высокого сопротивления резанию и истиранию.

Чугуны

Шлифование ведется всухую на карборундовой шкурке, число оборотов 500 мин⁻¹. На заключительной стадии шлифования применяется промежуточное травление в 4-10%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Механическое полирование. Абразив – алмазная паста. Режим: число оборотов 250–300 мин⁻¹; продолжительность 6-10 мин. При полировании на алмазной пасте графит кажется черным, на глиноземе – серым.

Электролитическо-механическое полирование. Электролит – суспензия, содержащая 25 г сульфата аммония, 80 мл глиноземного концентрата, 100 мл воды. Режим: плотность тока 10-15 мА/см², число оборотов 120–180 мин⁻¹. Кислотность электролита: рН 6-7 для чугуна с пластинчатым графитом, рН 8 для белого чугуна, продолжительность 3-4 мин.

Глинозем можно помещать на носитель в виде пасты, полировать с уменьшением плотности тока, образцы вынимать из электролита при включенном токе. Во избежание выпадения осадка в суспензию добавляют несколько капель нашатырного спирта. Нагрев шлифа при сушке не допускается.

Цветные металлы и сплавы

Сплавы меди

Приготовление шлифов из медных сплавов затрудняется из-за их низкой твердости и прочности, в них легко внедряются частицы несвязанного абразива, образуется глубокий искаженный слой. Некоторые фазы корродируют под воздействием водопроводной воды.

Образцы вырезают с помощью ручной ножовки с мелким зубом при малом усилии резания.

Шлифование надо проводить на смачиваемой водой (дистиллированной) или спиртоглицериновой смесью (1:3) абразивной карборундовой (SiC) бумаге с постепенно уменьшающейся зернистостью.

Микротомирование или тонкое фрезерование проводится твердосплавными или алмазными резцами.

Механическое полирование выполняется на алмазной пасте, окончательное – на суспензии следующего состава: 1 г MgO, 1 г. тартрата аммония, 120 мл H₂O (при 80 °C).

Электролитическое полирование проводится в электролите 250 мл H₃PO₄, 500 мл H₂O, 250 мл C₂H₅OH, 50 мл C₃H₇OH, 5 г Mn(NO₃)₂ при напряжении 8 В и плотности тока 1 мА/см² за два погружения по 30 с. В этих же электролитах можно проводить травление для выявления структуры.

Электролитическо-механическое полирование на вращающемся круге проводится в электролите 36 г тиосульфата натрия, 6 г аллилтиомочевины, 100 мл H₂O. Режим полирования: плотность тока 36 мА/см², число оборотов 120 мин⁻¹, продолжительность 4 мин.

Алюминиевые сплавы

Шлифование и выравнивание плоскости шлифов гетерогенных алюминиевых сплавов выполняется на абразивной бумаге, обильно смачиваемой водой или смазочно-охлаждающей эмульсией: керосином или мыльной водой (0,5–1%-ный раствор), циркулирующими по замкнутому кругу. На последних двух этапах шлифования свежую абразивную бумагу рекомендуется «притупить» с помощью твердого парафина или воска. Шлифование ведется относительно долго, давление на шлиф следует постепенно уменьшать.

Механическое полирование производится суспензией MgO (30 г MgO на 1000 мл воды) на рабочем круге из пластмассы (металлический круг вызывает коррозию образцов). Рекомендуется на первых стадиях процесса пользоваться относительно жестко действующим носителем полирующего средства, но по мере уменьшения размера абразивного зерна надо применять более мягкий носитель. На завершающей стадии полирования носитель целесообразно натереть твердым мылом и добавить в суспензию несколько капель жидкого мыла или 1 % тартрата аммония. Оксид магния (MgO) надо суспензировать в горячей воде.

Химическое полирование. Применяют следующие реактивы:

1) полирующий раствор состава 50 мл H_3PO_4 , 25 мл H_2SO_4 , 6 мл CH_3COOH , 7 мл HNO_3 , 12 мл H_2O , температура 70–90 °С, продолжительность полирования 120–240 с; 2) 50 мл 40%-ной плавиковой кислоты, 5 мл соляной кислоты плотностью 1,19 г/см³. 200 мл метилового спирта; полирование в этом реактиве ведется при 20 °С в течение 45 с, затем рекомендуется кратковременное механическое полирование;

3) 70 мл H_3PO_4 плотностью 1,71 г/см³, 25 мл H_2SO_4 плотностью 1,84 г/см³, 5 мл HNO_3 плотностью 1,4 г/см³; полировать в течение 1–2 мин.

Электролитическое полирование осуществляют в электролитах следующих составов:

1) 200 мл $HClO_4$, 700 мл C_2H_5OH , 100 мл $C_6H_{14}OH$;

2) 60 мл $HClO_4$, 590 мл CH_3OH , 350 мл $C_6H_{14}OH$;

3) 765 мл ангидрида уксусной кислоты, 185 мл перхлоридной кислоты, 50 мл воды. Режим полирования: напряжение 30–80 В, плотность тока 20–30 мА/см², продолжительность 10–20 мин.

Электролитическо-механическое полирование в суспензии 950 мл воды, 50 мл серной кислоты плотностью 1,84 г/см³, 5 г фтористого натрия, 100 мл глиноземного концентрата. Режим полирования: плотность тока 0,2 – 2 мА/см², продолжительность 3–6 мин. При полировании рекомендуется изменять полярность электродов с частотой 2–3 Гц.

Магниевые сплавы

Резка, шлифование, механическое полирование ведутся так же, как для шлифов из медных сплавов.

Электролитическое полирование проводится в электролитах следующих составов:

1) 375 мл H_3PO_4 плотностью 1,71 г/см³, 625 мл 96%-ного этилового спирта при напряжении 1,5 В, плотность тока 5 мА/см²;

2) 20 г. тиоцианата натрия, 100 мл 96%-ного этилового спирта, 10 мл бутоксиэтанола, 10 мл воды, 10 г. двунатриевой соли этилендиамино-тетрауксусной кислоты при напряжении 23 В и температуре 20 °С (для гетерогенных сплавов магния).

Химико-механическое полирование в суспензии 20 мл 2 %-ного водного раствора бихромата калия, 150 мл насыщенной серной кислоты, 15 капель азотной кислоты плотностью 1,4 г/см³, 50 мл глиноземного концентрата.

Титановые сплавы

Макрошлифы изготавливают на станках с применением твердосплавных резцов типа ВК. Окончательно поверхность обрабатывают на шлифовальных кругах или вручную с применением абразивной шкурки № 8–10 (зернистость 125–100 мкм).

Для изготовления микрошлифов из титановых сплавов применяют шлифовальную бумагу (см. табл. 1.1) с периодическим промежуточным травлением в растворах следующих составов:

1) 16 мл плавиковой кислоты, 16 мл азотной кислоты, 68 мл глицерина;

2) 190 мл щавелевой кислоты, 4 мл плавиковой кислоты;

3) 60 мл перекиси водорода, 10 мл плавиковой кислоты, 30 мл воды.

Виброполирование проводится в два этапа на глиноземных суспензиях, промежуточное травление - через 4 ч после полирования. Вместо промежуточного травления можно добавлять к суспензиям 2 капли на 1 л травящего раствора состава 1 или 3.

Химическое полирование проводится в растворе состава: 100 мл плавиковой кислоты, 100 мл азотной кислоты, продолжительность полирования 10 с. Реакция протекает бурно, останавливается при промывке в холодной проточной воде; шлиф сушат холодным воздухом.

Электролитическое полирование проводится в электролитах следующих составов:

1) 10 мл H_2SO_4 , 200 мл метилового спирта, 5 г $ZnCl_2$, 15 г. $AlCl_3$; плотность тока 300- 600 мА/см² в течение 2 мин; катод – платина, титан, титановые сплавы;

2) 590 мл молочной кислоты, 246 мл серной кислоты, 111 мл плавиковой кислоты, 36 г. диметилсульфоксида, 17 мл глицерина, напряжение 24-35 В, плотность тока 95 мА/см², продолжительность 45 мин; катод – графит, титан;

3) 550 г серной кислоты, 90 г азотной кислоты, 240 г плавиковой кислоты, 100 мл воды, 20 г. сульфуреида; напряжение 15 В, плотность тока 1000 мА/см².

Металлические композиционные материалы

Такие материалы состоят из двух или нескольких прочно соединенных разнородных компонентов, матрицей которых является металл или сплав. Вырезка образцов производится абразивными отрезными кругами минимальной толщины. При вырезке образцов с хрупкими слоями их необходимо заливать в смолу или бакелит. При резке усилие сдвига должно быть направлено от покрытия к подложке. Усилие зажима образца должно быть минимальным, скорость резания – низкая.

Шлифование поверхности производится так, чтобы движение инструмента было направлено от твердого слоя к мягкому. Образцы, содержащие хрупкую составляющую, обрабатываются алмазными шлифовальными кругами.

Доводку выполняют инструментом – носителем притирочных средств, алмазной суспензии, спиртосодержащих вспомогательных средств для улучшения скольжения.

Механическое полирование: носитель – тканый материал, полирующее средство – алмазная паста или суспензия. Заключительное полирование в зависимости от компонентов материала проводят на глиноземе или оксиде алюминия.

1.5 Практические рекомендации по изготовлению специальных шлифов

Рассмотрены способы изготовления шлифов из металлов с наплавками, шлифов малых геометрических размеров, тонких листов и фольг, пористых образцов, шлифов на стационарных объектах.

Образцы с наплавками

На шлифе, сделанном поперек наплавки, при рациональном способе приготовления можно исследовать качество наплавки, ее толщину, равномерность толщины по длине, дефекты наплавки всех видов, структуру основного металла под слоем и переходных диффузионных зон, а также измерить их микротвердость.

При толщине слоя менее 2 мкм метод поперечного шлифа дает слишком большую погрешность измерения и рекомендуется применять метод косого среза, позволяющий расширить возможности металлографических измерений. Наблюдаемая толщина слоя (S) оказывается увеличенной до ($S\epsilon$).

Рекомендуются три метода косого среза:

1. Изготовление шлифа в специальной оправке;
2. Наклонно закрепленный образец сошлифовывается вращающимся абразивным кругом;
3. Используется местное шлифование шарообразным абразивным инструментом, который на поверхности шлифа вышлифовывает углубление сферической формы.

Наиболее распространен первый метод получения косых срезов. Наклонное положение образца в оправке можно зафиксировать прокладкой известной толщины или клиновидной шайбой с известным углом наклона.

Иногда используется следующий способ: делают два сечения – второе перпендикулярно первому так, чтобы можно было измерить размеры *по высоте и ширине*.

Обязательное требование при исследовании поверхностей с тонкими покрытиями на поперечных или косых шлифах - сохранение острой кромки образцов. Наиболее эффективно защищают кромки

металлические покрытия, представляющие слои, осаждаемые на кромки химическим или гальваническим способом. Материал защитного слоя должен соответствовать материалу покрытия по поведению при абразивной обработке, отличаться по цветовому контрасту и выявлению структуры при травлении. Возможные комбинации материала указаны ниже:

Образец	Сталь	Cu	Ti	Al	Zn	Cd
Защитное покрытие	Cu	Ni*, Cu/Ni*	Cu	Cu, Ni	Cd, Cu	Zn, Cu

**Возможно химическое осаждение.*

Неметаллические слои (окалина, коррозионный или пассивированный слой, керамическое покрытие) после активации и химического осаждения металлического слоя можно также защищать с помощью гальванического покрытия. Хрупкие слои, например оксидные, имеют обычно множество трещин и пор. Для устранения нежелательного трещинообразования в слое при изготовлении шлифов образцы укладывают между двумя защитными пластинами из коррозионностойкой стали и затем пропитывают в вакууме смолой. Затем образец заливают смолой и изготавливают микрошлиф.

Образцы малых размеров

Мелкие детали всех видов неправильной геометрической формы целесообразно заливать или запрессовывать в оправки для получения образцов удобной формы. При этом необходимо предусматривать защиту кромок, как было показано выше. К этой группе образцов относятся мелкие детали, тонкая проволока, трубки, тонкие листы и фольга. Связующий материал по отношению к абразиву должен быть сопоставим по свойствам с материалом образца.

Образцы из фольги и тонких листов, используемые для паяных соединений, заливают аналогично описанным выше. Для запрессовки удобно несколько тонколистовых образцов собирать в пакет.

Крупногабаритные детали

Металлографические исследования на крупногабаритных объектах вне лаборатории необходимы тогда, когда невозможно произвести отбор образцов и повреждение поверхности недопустимо, но дополнительный съем тонкого поверхностного слоя не влияет на эксплуатационные качества детали. В этом случае шлиф изготавливают непосредственно на исследуемой поверхности. При этом используется переносной шлифовально-полировальный прибор. Тонкое шлифование на нем выполняют сухим способом с помощью кругов из шлифовальной бумаги, наклеенных на резиновый диск. Полирование и выявление структуры производят вручную соответствующими электролитами и травителями.

Для оптической микроскопии изготавливают также негативные отпечатки в виде тонкой прозрачной пленки (реплики). Их производят либо нанесением (заливкой, распылением) нитроцеллюлозного лака, который после затвердевания осторожно снимают с исследуемой поверхности, либо прижатием к протравленной поверхности предварительно размягченной в ацетоне ацетобуратной или подобной ей пленки толщиной от 20 до 200 мкм, которую затем осторожно удаляют. Для повышения контраста и улучшения качества изображения на реплику можно напылить металл или углерод по технологии, применяемой для оттенения реплик в электронной микроскопии.

Области применения различных методов подготовки поверхности металлографических шлифов приведены в табл. 1.6.

Таблица № 1.5 Наиболее употребляемые режимы и реактивы электрополирования металлов и сплавов

Полируемый материал	Состав электролитов	Режим электрополирования			
		U, В	D _a , А/дм ²	t, °С	τ, мин
Стали					
Железо и различные углеродистые и легированные стали (универсальный)	Фосфорная кислота 86-88 %; хромовый ангидрид 10-12 %; вода 0-2 %	10-15	40-60	75-95	3 -10
Железо и различные углеродистые и легированные стали (универсальный)	Уксусный ангидрид 700 мл; хромовая кислота 200 мл; вода 100 мл	110	100 - 200	20	15 с - 2 мин
Железо и различные углеродистые и легированные стали (универсальный)	Уксусная кислота (ледяная) 133 мл; хромовая кислота 25 г; вода 7 г	20 -25	10 -30	20	4 -10
Сталь легированная	Лимонная кислота 37 % (масс); серная кислота 22% (масс); вода 41 % (масс)	12 -24	30 - 500	20-120	От секунд до минуты
Сталь легированная	Фосфорная кислота 65 % (масс); Серная кислота 15 % (масс); хромовый ангидрид 5 % масс); глицерин 15 масс)	10 -15	5 -25	40-70	Несколько минут
Сталь легированная	Серная кислота 69 % (масс); плавиковая кислота 10 % (масс); вода 21 % ((масс)	10 -12	30	20	5
Сталь легированная	60 % хлорная кислота -50 мл; этиловый спирт 750 мл; вода 140 мл	25 -35	180	Более 20	3 -5
Чугуны					
Чугуны различные (универсальный)	Фосфорная кислота (объемный) 50-90 %; бутиловый спирт (объемный) 10-50 %;	6 - 12	10 - 50	50 -75	2 -10
Чугуны различные (универсальный)	Фосфорная кислота 86-68 %; хромовый ангидрид 10-12 %; вода 0-2 %	10 - 24	40 - 60	75 - 90	1 – 5
Чугуны различные (универсальный)	Фосфорная кислота 65-70 % (масс); Серная кислота 15-12 % (масс)	12 -20	30 -40	70-90	2 - 4
Чугуны серые	Хлорная кислота 200 мл	15 - 30	40 - 45	Менее 20	2 - 5
Медные сплавы					
Медь и ее сплавы (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,04) 100 %	30	30 -60	15 -20	2 – 8
Медь и ее сплавы (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,04) 74 %; хромовый ангидрид 6 % (масс); вода 20 мл	6 -10	30 -50	20 -40	1 - 3
Латуни различных марок	Фосфорная кислота 950 мл; серная кислота 50 мл	5 - 10	22 - 65	60 - 65	10 -15

Полируемый материал	Состав электролитов	Режим электрополирования			
		U, В	D _a , А/дм ²	t, °С	τ, мин
Латуни различных марок	85%- ная фосфорная кислота 41,5 % (масс); глицерин 24,9 % (масс); этиленгликоль 16,5 % (масс); 85% ная молочная кислота 8,3 % (масс); вода 8,7 % (масс)	4 - 6	8	25 - 30	Несколько мин
Латуни различных марок	Азотная кислота 30 % (масс); Метиловый спирт 70 % (масс)	15 - 30	12 -15	20	7 -10
Латуни различных марок	Фосфорная кислота 700 мл; вода 300 мл	1,5 -2	6 -8	20	15 -30
Бронзы различных марок	Фосфорная кислота 660 мл; вода 340 мл	7 -10	100 -150	20	1 - 2
Бронзы оловянистые	Фосфорная кислота (плотность 1,8) 470 мл	2 – 2,2	10	20	10 -15
Бронзы кремнистые	Фосфорная кислота (плотность 1,54) 96 % (масс); Плавиковая кислота (40 %-ная) 4 % (масс)	4 - 6	30 - 40	30	5 -10
Бронзы алюминиевые	Фосфорная кислота (плотность 1,61) 100 % (масс)	4 - 5	8 - 10	20 - 25	5 - 10
Хром и его сплавы					
Сплавы хрома (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,60) 50 мл; уксусная кислота 50 мл	35-45	15	20	Эмпирически
Сплавы хрома (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,20) 200 см 3; этиловый спирт 700 см 3	24 -28	15 -20	20-30	5 -10 сек
Сплавы хрома (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,8) 640 мл; серная кислота (плотность 1,84) 150 мл; вода 210 мл	2,5 – 2,8	60 -75	70	5
Никель и его сплавы					
Сплавы никелевые (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,60) 210 мл; уксусная кислота (ледяная) 790 мл	45 -50	40 -80	Менее 35	2-3
Сплавы никелевые (универсальный)	Серная кислота (плотность) 13-15 % (масс); фосфорная кислота (плотность) 56-61 %; алюминий (ион) 2,5 % (масс); железо (ион) 1,4 % (масс); хром (ион) 0,5-1 % (масс); вода остальное % (масс)	2,5	6 -50	30 -50	5-10
Сплавы никелевые (универсальный)	Серная кислота 1200 г/л; фосфорная кислота 90 г/л	10 -15	30 -40	40 -50	2-3
Сплавы никелевые (универсальный)	Серная кислота 1200 г/л Хромовый ангидрид 40 г/л; Перекись водорода (30%-ная) 75 г/л	10 -15	30 -35	20-25	0,5 - 1

Полируемый материал	Состав электролитов	Режим электрополирования			
		U, В	D _a , А/дм ²	t, °С	τ, мин
Сплавы никелевые с высоким содержанием железа	Уксусная кислота (ледяная) 133 мл; хромовая кислота 2,25 мл; вода 2,7 мл	6 -12	23 -29	18 -20	1-3
Марганец и его сплавы					
Сплавы марганцевые (универсальный)	Глицерин 10 мл; фосфорная кислота (плотность 1,69) 100 мл	10 -15	30 -50	20 -40	15
Сплавы марганцевые (универсальный)	Фосфорная кислота 20 %; серная кислота 40 %; вода 20 %	10 -15	20 -40	20 -40	5-10
Вольфрам и его сплавы					
Сплавы вольфрамовые (универсальный)	Вода 1000 мл; углекислый натрий 150 г	6 -10	9	44 -45	10
Сплавы вольфрамовые (универсальный)	Вода 80 % (масс); едкий натр 20 % (масс)	6	3 -6	20	20 -30
Сплавы вольфрамовые (универсальный)	Едкий натр 40 г; вольфрамат натрия 40 г; Бихромат калия 0,5 г; вода 1000 мл	7	10 -15	50	Несколько минут
Ванадий и его сплавы					
Сплавы ванадия (универсальный)	Серная кислота (плотность 1,84) 20 мл; метиловый спирт 80 мл; вода 80 мл	10 -20	20 -40	20 -50	Несколько сек.
Сплавы ванадия (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,60) 5-10 %; уксусная кислота (ледяная) 95-90 %	25 -30	15 -23	35	1 -2
Сплавы ванадия (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,60) 10 мл; метиловый спирт 100 мл; дибутилцеллюлоза 60 мл	30	10 -20	30	7 трехсекундных периодов без выемки образца
Молибден и его сплавы					
Молибденовые сплавы (универсальный)	Серная кислота (плотность 1,84) 830 мл; вода 30 мл	12 -18	50	45 -60	0,5 – 1
Молибденовые сплавы (универсальный)	Серная кислота (плотность 1,84) 20-30 мл; соляная кислота 50-60 мл; метиловый спирт 150 мл;	12	65 -70	50	25-35 с
Молибденовые сплавы (универсальный)	Сульфаминовая кислота 5 % (вес); вода 95 % (вес)	17 -20	100 - 140	20 -25	5 -10
Кобальт и его сплавы					
Сплавы кобальтовые (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,35) 100 %	1,2	1 -2	20	5 -10

Полируемый материал	Состав электролитов	Режим электрополирования			
		U, В	D _a , А/дм ²	t, °С	τ, мин
Сплавы кобальтовые (универсальный)	Хлорная кислота 240 мл; уксусная кислота (ледяная) 750 мл; Вода 20-30 мл	30	5 -15	20	3 -5
Сплавы кобальтовые (универсальный)	Соляная кислота (плотность 1,19) 500 мл; этиловый спирт 500 мл	8 -9	25	20	0,5 - 1,5
Цирконий и его сплавы					
Сплавы циркониевые (универсальный)	Уксусная кислота (ледяная) мл – 175; Хлорная кислота (уд. вес 1,69) мл – 50 Этиленгликоль, мл – 100	30 -50	100	Менее 30	20 -30
Сплавы циркониевые (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,60) 50 мл; уксусная кислота (ледяная) 50 мл	12 -18	15	30	45
Сплавы циркониевые (универсальный)	Уксусная кислота (ледяная) 100 мл; хлорная кислота (плотность 1,60) 50 мл	60	60 -80	20	3 -5
Ниобий и его сплавы					
Сплавы ниобиевые (универсальный)	Плавиковая кислота 40 %-ная 175 мл; азотная кислота (плотность 1,384) 175 мл; вода 650 мл	12 -30	20 -50	Менее 50	10
Сплавы ниобиевые (универсальный)	Плавиковая кислота 40 %-ная 150 мл; соляная кислота (плотность 1,84) 850 мл	1 – 25	4	25 -60	5 -10
Кадмий и его сплавы					
Сплавы кадмиевые (универсальный)	Хлорная кислота 20-30 % (масс); уксусный ангидрид 80-70 % (масс)	25-35	60 -100	35 -55	Эмпирически
Сплавы кадмиевые (универсальный)	Хлорная кислота 200 мл; этиловый спирт 700 мл; глицерин 100 мл	70 -80	30 -40	Менее 25	12 -15 сек
Сплавы кадмиевые (универсальный)	Цианистый калий 5 % (масс); вода 95 % (масс)	6 -12	16	20	5-10
Висмут и его сплавы					
Сплавы висмута (универсальный)	Фосфорная кислота 100 мл; серная кислота 200 мл; вода 200 мл	12 -15	100	30 -40	2 -8
Сплавы висмута (универсальный)	Уксусная кислота 100 мл; азотная кислота 100 мл; глицерин 400 мл	12	10 -20	24	1 -5
Сплавы висмута (универсальный)	Роданистый калий 70 % (масс); вода 30 % (масс)	4 - 6	50	15 -25	1 -2

Полируемый материал	Состав электролитов	Режим электрополирования			
		U, В	D _а , А/дм ²	t, °С	τ, мин
Свинец и его сплавы					
Сплавы свинцовые (универсальный)	Уксусная кислота 315 мл; уксуснокислый натрий (безводный) 60 г; вода 80 мл	10 -15	5 -10	25-30	Менее 4
Сплавы свинцовые (универсальный)	Фтороборная кислота 40 %; вода 60 %	25 -30	50 -10	20-25	3 -5
Сплавы свинцовые (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,61) 350 мл; уксусный ангидрид 630 мл; вода 20 мл	25-35	9 -12	30	5 -10
Олово и его сплавы					
Сплавы оловянистые (универсальный)	Фтороборная кислота (техн) 200 мл; серная кислота (плотность 1,84) 20 мл; вода 780 мл	15 -17	400 -700	20 -40	3 -5 сек
Сплавы оловянистые (универсальный)	Хлорная кислота 20-30 % (масс); уксусный ангидрид 80-70 % (масс)	30 -50	10 - 15	Менее 30	5 -10
Сплавы оловянистые (универсальный)	Серная кислота% (вес) – 35 % (масс); вода 65 % (масс)	30	13	20-30	1 -3
Цинк и его сплавы					
Сплавы цинковые (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,48) 100 мл; уксусная кислота 900 мл	30 - 40	15 -20	Менее 35	1 -4
Сплавы цинковые (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,375) 100 %	2,5	25 - 40	30 -50	5
Сплавы цинковые (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,71) 33-37 %; этиловый спирт 63-67 %	6	5	25 -40	
Алюминий и его сплавы					
Алюминий (универсальный)	Серная кислота 1-60 %; плавиковая кислота 0,2-1,5 %; вода 98,8 – 38,5 %	12 -20	10	60	10
Алюминий (универсальный)	Фосфат натрия кристаллический 5 % (масс); вода 80 % (масс); углекислый натрий безводный 30 % (масс)	9 -12	3,3 – 3,8	70 -80	2 -8
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Фосфорная кислота 34 % (масс); серная кислота 34 % (масс); хромовый ангидрид 4 % (масс); вода 28 % (масс)	10 -15	20 -30	85 -90	5 -8
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Фосфорная кислота 15 %; серная кислота 5 % (масс); этиловый спирт 80 %	27 -30	15 -30	30	15 -30

Полируемый материал	Состав электролитов	Режим электрополирования			
		U, В	D _a , А/дм ²	t, °С	τ, мин
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,7) 82 %; серная кислота (плотность 1,84) 12 %; хромовый ангидрид 6%	2,5 – 2,7	5,5 -	45 - 60	Эмпирически
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,55) 345 мл; Уксусный ангидрид 655 мл	26	1,0	20	10 -15
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,69) 53 %; вода 26 %; карбитол 20 %; плавиковая кислота 48 %-ная 1 %	40 -80	60	25 - 30	2 -3
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Хромовый ангидрид 10 % (масс); плавиковая кислота 1 % (масс); Вода 89 % (масс)	20 -25	6 -10	50 - 75	10 -15
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Фосфорная кислота 40 %; этиловый спирт 38 %; вода 22 %	27 -30	35	40 - 45	4 -6
Магний и его сплавы					
Сплавы магниевые (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,61) 300 мл; этиловый спирт 500 мл	12 -15	50	25 -40	1 -3
Сплавы магниевые (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,60) 300 мл; уксусная кислота (ледяная) 700 мл	20 -30	1,5	Менее 30	1 -2
Сплавы магниевые (универсальный)	Соляная кислота (плотность 1,19) 100 мл; моноэтиловый эфир 900 мл	10 -15	2	Менее 10	1 -2
Титан и его сплавы					
Сплавы титановые (универсальный)	Хлорная кислота (плотность 1,67) 36 мл; метиловый спирт 390 мл; этиленгликоль 350 мл; вода 24 мл	30 -50	4-10	5 -10	10 -40 с
Сплавы титановые (универсальный)	Плавиковая кислота 6 % (масс); этиленгликоль 88 % (масс); вода 6 % (масс)	12 -20	8 -10	25-40	3 -5
Сплавы титановые (универсальный)	Этиловый спирт 90 мл; Нормальный бутиловый спирт 10 мл; хлористый алюминий 6 г; хлористый цинк 28 г	20 -25	20 -80	25	1 -6
То же Сплавы титановые (универсальный)	Фосфорная кислота 90 %-ная 45-85 %; плавиковая кислота 50 %-ная 10-18 %; Метиловый спирт 5-40 %	8 -17	50 -100	20 -40	1 -5
Бериллий и его сплавы					

Полируемый материал	Состав электролитов	Режим электрополирования			
		U, В	D _a , А/дм ²	t, °С	τ, мин
Сплавы бериллиевые (универсальный)	Фосфорная кислота 100 мл; серная кислота 30 мл; глицерин 30 мл; этиловый спирт 30 мл	20 -35	200 -400	30 -50	1-2
Сплавы бериллиевые (универсальный)	Фосфорная кислота 25-70 % (объемн); соляная кислота 0,1 – 1,0 % (объемн); вода - остальное % (объемн)	15 -18	1,5 -7,5	20 -30	5 -10
Сплавы бериллиевые (универсальный)	Фосфорная кислота 950 мл; серная кислота 50 мл	15 -25	100	40 -70	1 -3
Серебро и его сплавы					
Сплавы серебряные (универсальный)	Цианистое серебро 20 г/л; цианистый калий 30 г/л; Вода 1000 мл	1,2 – 1.3	1 – 1,2	18-25	3 -4
Сплавы серебряные (универсальный)	Цианистое серебро 35 г; цианистый калий 37 г; углекислый калий 38 г; вода 1000 мл	2,5 - 3	1 -2	20	10
Сплавы серебряные (универсальный)	Цианистый натрий 100 г; желтая кровяная соль 100 г; вода 1000 мл	2,5	0,5 – 3,0	20	Несколько минут
Золото и его сплавы					
Сплавы золота (универсальный)	Цианистый калий 4 - 8 % (масс); желтая кровяная соль 4 -20 % (масс); дифосфат натрия 1-5 % (масс); едкое кали 0,2 – 1,5 % (масс); вода остальное % (масс)	50 -150	50 -150	60 -95	Несколько минут
Сплавы золота (универсальный)	Тиомочевина 25 г; серная кислота (плотность 1,84) 3 г; уксусная кислота (ледяная) 10 г	6 -12	1 - 3,5	20 -45	1 -5
Сплавы золота (универсальный)	Цианистый калий 75 г; виннокислый калий 16 г; желтая кровяная соль 19 г; фосфорная кислота (твердая) 16 г; цианистая медь 4 г; Раствор аммиака 3,5 мл; вода 1000 мл	12	150-200	Менее 60	1-2
Палладий и его сплавы					
Сплавы палладиевые (универсальный)	Хлористый калий 100 % (масс)	3	100	950	Эмпирически
Сплавы палладиевые (универсальный)	Хлористый натрий 50 % (масс); хлористый калий 50 % (масс)	2	100	700	Эмпирически
Уран и его сплавы					
Сплавы урановые (универсальный)	Фосфорная кислота 34 %; глицерин 33 %; этиловый спирт 33 %	15 -20	10 -20	20 -50	5 -20

Полируемый материал	Состав электролитов	Режим электрополирования			
		U, В	D _a , А/дм ²	t, °С	τ, мин
Сплавы урановые (универсальный)	Серная кислота (плотность 1,84) 20 мл; метилловый спирт 80 мл; Вода несколько капель				
Сплавы, содержащие более 30% ванадия	Хромовая кислота (84 г на 100 мл воды) 100 мл; уксусная кислота 300 мл	10 -20	2 -10	25 -35	20 -30 с
Тантал и его сплавы					
Сплавы тантала (универсальный)	Фосфид натрия 160 г/л; вода 1000 мл	25 -50	40	59 -63	1-4
Сплавы тантала (универсальный)	Серная кислота (плотность 1,84) 90 мл; соляная кислота 10 мл	12 -18	10	15 -35	9
Таллий и его сплавы					
Сплавы таллия (универсальный)	Азотная кислота 50 мл; серная кислота 20 мл; карбитол 750 мл	40 - 60	30 -60	15 -20	Эмпирически
Платина и ее сплавы					
Сплавы платины (универсальный)	Хлористый магний % (вес) – 52 % (масс); хлористый калий % (вес) – 48 % (масс)	2 -4	10 -15	440	3 -6
Сплавы платины (универсальный)	Фтористый калий 83 % (масс); фтористый натрий % (вес) – 17 % (масс)	2 -5	10 -20	440	4 - 6

**Таблица №1.6 Области применения различных методов подготовки
поверхности металлографических шлифов**

Назначение	Механическое полирование с последующим			Шлифование тонкое абразивом с последующим			Шлифование черновое абразивом с последующим		Электрополирование без предварительной механической подготовки		
	химическим травлением	травящим электрополированием	электроотравлением	химическим травлением	травящим электрополированием	электрополированием	химическим травлением	травящим электрополированием	без травления	с последующим химическим травлением или электрополированием	с травящим электрополированием
Исследование микроструктуры при массовом контроле	+	+	+	0	+	0	-	+	+	+	+
Микроструктурный анализ тонкокатаного материала (лист, лента)	+	+	+	0	+	0	-	+	+	+	+
Выявление границ зерен в металлах и сплавах	0	+	+	0	+	0	-	0	+	+	+
Детальное исследование микростроение единичных шлифов сложной структуры	+	+	+	-	0	-	-	0	0	+	+
Выявление микроликвации	0	+	+	-	0	-	-	0	+	+	+
Контроль качества термической обработки	+	+	+	+	+	+	-	0	0	+	+
Качественная и количественная оценка неметаллических включений	+	+	+	0	+	0	-	0	+	+	+
Определение балла карбидной ликвации	+	+	+	0	+	0	-	0	+	+	+
Выявление местных дефектов строения и состояния	0	+	+	0	+	0	-	0	+	+	+
Примечание: + - широко применяется; 0 – ограниченно применяется; - - не применяется;											

ГЛАВА 2

ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

2.1 Задачи металлографических исследований

Задачи исследования макроструктуры

Макроструктура – строение металла, видимое невооруженным глазом или при увеличениях до 20-25 крат.

Для оценки поведения металлических материалов большое значение имеет получение информации о макростроении металла в сварном соединении. Такая информация позволяет:

оценивать влияние на свойства и разрушение неоднородности химического состава (например, в стали – распределение серы и фосфора, в жаропрочных сплавах – точечно-пятнистую неоднородность и т.д.);

идентифицировать макронесплошности, выявленные на макроструктуре (трещины, поры, рыхлоты, расслоения и др.);

выявлять ликвационную неоднородность, дендритную структуру и другие особенности строения металла;

выявлять изменения макроструктуры металла, обусловленные термическим воздействием на него.

Задачи исследования микроструктуры

Микроструктура – строение металла, видимое при использовании светового микроскопа при увеличениях до 2000 крат

При микроскопическом исследовании рекомендуется изучать структуру металла, особенно в зоне разрушения. Такая информация позволяет:

определять структурные составляющие металла;

определять величину зерна;

устанавливать природу неметаллических включений;

идентифицировать микронесплошности, выявляемые на поверхности разрушения (микрорасслоения, микротрещины, микрорыхлоты, микропоры и т.д.).

Задачи исследования тонкой структуры

Электронная микроскопия является конечным звеном в цепочке металлографических исследований макроструктура – микроструктура – тонкая структура

Для исследования элементов структуры, которые не разрешаются методами световой микроскопии и которые целесообразно сопоставлять с тонким строением изломов при разрушении, применяются методы электронной микроскопии.

Субструктура дает представление о тонких деталях строения металла при использовании электронных микроскопов (блоки, разделенные малоугловыми границами, различные дислокационные построения, мелкие частицы различных фаз и др.).

Задачи исследования изломов

Фрактография - один из объективных и информативных способов оценки качества металла. Этот способ изучения поверхности разрушения (изломов) позволяет выявлять слабые зоны в строении металла и оценивать причины преждевременного разрушения деталей и конструкций. Он находит самое широкое применение в производственных условиях (см. далее подробно).

2.2 Методы выявления структуры

Выявление макроструктуры

Макроскопические исследования металлов и сплавов и их сварных и паяных соединений обычно проводят визуально, или при небольших увеличениях (до 30 – 40 крат), что позволяет просматривать шлифы большой площади.

Исследования проводят на макрошлифах, но в случаях, когда вырезка образца из изделия невозможна, выявление макроструктуры проводят непосредственно на изделии.

В табл.2.1 приведены наиболее распространенные реактивы и режимы травления, рекомендуемые для выявления структуры основных металлов и сплавов.

Выявление микроструктуры

Выявление микроструктуры сводится к обнаружению границ между отдельными структурными составляющими и к получению между ними рельефа на поверхности шлифа, что позволяет выяснить расположение отдельных фаз, двойниковых образований, форму, размеры, ориентировку отдельных зерен и т.п.

При наличии в структуре двух и более фаз основная задача травления сводится к выявлению границ между различными по природе фазами и избирательному выявлению зерен разных фаз. В многофазных сплавах вначале выявляют общую микроструктуру, т.е. межзеренные границы. Затем применяют способ избирательного выявления фаз.

Основными способами выявления микроструктуры металлов и сплавов являются химическое и электрохимическое травление. Реже используются окрашивание фаз и структурных составляющих путем создания на них тонких оксидных пленок (пленочное травление), магнитная металлография, метод осаждения тонких слоев металла из газовой фазы, ионное травление и др.

Химическое травление

Химическое травление выполняется путем погружения образца в травящий реактив или протирания образца реактивом с помощью тампона. Продолжительность травления чаще всего устанавливается опытным путем.

Рекомендуемые реактивы для выявления структуры различных металлов и сплавов приведены для черных металлов и сплавов в гл. 3, для цветных металлов и сплавов - в гл. 4.

Электрохимическое травление

Электрохимическое травление – это травление, осуществляемое реагентами в условиях приложения извне электрического потенциала. Этот метод травления основан на неравномерном анодном растворении различных структурных составляющих или на избирательном окрашивании их вследствие образования пленок.

Основные условия, обеспечивающие достаточно хорошее выявление микроструктуры, сводятся к следующему:

- электролит в отсутствии внешнего потенциала не должен быть агрессивным по отношению к отдельным структурным составляющим;
- при наложении потенциала взаимодействие электролита и металла должно в течение короткого времени приводить к избирательному воздействию на составляющие структуры или границы между ними;
- регулирование рабочего режима (плотности тока, напряжения, состава электролита, температуры) должно быть удобным и быстрым.

Этот метод травления особенно эффективен при выявлении структуры чистых металлов и твердых растворов, а также сплавов, фазы которых мало различаются по своим электродным потенциалам.

Наиболее часто используемые реактивы и режимы электрохимического травления приведены в табл.2.1.

Наибольший эффект этот метод травления дает для химически стойких сталей аустенитного класса, жаропрочных сплавов на никелевой основе. Этот метод успешно применяется для травления высоколегированных сплавов на алюминиевой или медной основе, структуру которых трудно выявить другими методами травления. Углеродистые стали целесообразно подвергать этому методу травления лишь в частных случаях, например, для выявления цементита, прочных карбидов и т.п. В сложнолегированных и быстрорежущих сталях электрохимическое травление позволяет эффективно выявлять различные виды карбидов. В табл. 2.2 - 2.5 приведены наиболее употребляемые реактивы электролитического выявления карбидов и интерметаллидных фаз в специальных и быстрорежущих сталях. При электротравлении шлифов образец в качестве одного из электродов, обычно анода, погружают в электролит и после соответствующей выдержки при заданном режиме извлекают, промывают и просушивают. Концентрация электролита, плотность тока и продолжительность выдержки образца при электротравлении значительно ниже, чем при электрополировании. В некоторых случаях образец помещают в ванну в качестве катода.

Цветное (пленочное) травление

Цветное (пленочное) травление основано на получении на поверхности шлифа тонких пленок оксидов или каких-либо иных химических соединений. Образование пленок приводит к изменению отражательной способности покрытых ими участков. При падении белого света на полированную поверхность металла, покрытую тонкой пленкой, возникает интерференция отраженных лучей, вследствие чего отдельные участки пленки кажутся окрашенными в разные цвета (эти цвета зависят от химического состава, физических свойств, ориентации элементов структуры).

Существуют три способа получения цветных оксидных пленок:

- химическое травление в горячих растворах сильных окислителей;
- электрохимическое травление в электролитах, образующих при взаимодействии с металлом комплексные соединения или соли;
- тепловое травление (нагрев в воздушной среде до температур, не нарушающих структуру металла).

Для равномерного окисления поверхности образцы помещают в жидкую среду, предварительно нагретую до температуры, не влияющей на структуру сплава. Например, для нагрева стали обычно используют свинец, эвтектические смеси свинца и сурьмы или свинца и олова. Шлиф, промытый спиртом и тщательно просушенный фильтровальной бумагой, погружают полированной поверхностью вверх в ванночку с расплавленным сплавом. Температуру ванны и продолжительность выдержки образцов устанавливают эмпирически в зависимости от типа сплава.

Для получения идентичных результатов необходимо, чтобы:

- поверхность образцов во всех случаях выступала над уровнем расплавленного металла не больше чем на 1-2 мм;
- размер и форма образца сохранялись постоянными;
- условия охлаждения образцов были одинаковыми (например, на массивной чугунной плите).

Особенно эффективен этот метод окисления поверхности для выявления структуры твердых растворов различной концентрации, так как он дает цветовые контрасты, что обычно с трудом достигается другими методами.

Химическое пленочное травление

При этом способе травления в качестве окислителей применяют растворы, содержащие сильные щелочи (NaOH, KOH) и окисляющие травители с перманганатом, бихроматом, перекисью водорода и др. В этих растворах происходит избирательное травление карбидов, нитридов и фосфидов, на которых образуются пленки.

Электрохимическое пленочное травление

Электрохимический способ получения пленок имеет несколько вариантов.

При катодном травлении из раствора осаждается тонкий слой металла. Вследствие различия электрохимических потенциалов фаз пленки будут образовываться избирательно, и фазы будут окрашены в разные цвета.

При анодном травлении на поверхности шлифа будут возникать пленки оксидов металла шлифа. Пленки, образующиеся на зернах разных фаз, будут отличаться не только по толщине, но и по химическому составу.

Тепловое пленочное травление

При тепловом травлении на поверхности шлифа получают тонкие пленки с интерференционными полосами. При этом виде травления применяют разные способы нагрева: нагрев в воздушной среде (печи), нагрев образца в расплавленном металле или солях, нагрев образца в вакууме.

Примеры применения реактивов для цветного пленочного травления представлены в табл. 2.5. В табл.2.6 приведены примеры цветного окрашивания карбидов и сигма – фазы в нержавеющей стали.

Таблица 2.1 Способы избирательного выявления (цветного окрашивания) структурных составляющих в конструкционных металлах и сплавах

Состав травителя (или способ выявления структуры)	Режим травления	Результаты цветного окрашивания
Стали		
Гипосульфит 30 г, пиросернистокислый калий 10 г, уксусная к-та 5 мл, вода 100 мл	Травление химическое	Для идентификации α - и γ -мартенсита и других структурных составляющих в марганцевохромистых сталях
Насыщенный раствор тиосульфата натрия с добавкой пиросульфата калия (10 г на 100 мл раствора)	Травление химическое	Для выявления структуры высоко-марганцовистых сплавов. Хорошо различаются γ -, ε -, α -фазы. Фазы приобретают следующие цвета: ε - белый, γ - серый, α – черный
Реактив Мураками: а) красная кровяная соль 10 г, едкий кали 10 г, вода 100 мл б) красная кровяная соль 30 г, едкий кали 30 г, вода 60 мл	Травление химическое: а) при 70- 80°C в свежеприготовленном реактиве 1,5-10 мин; б) травление при температуре кипения	Цементит окрашивается позже других карбидов в цвета от голубого до серого. В хромоникелевых сталях аустенит остается белым, α -фаза приобретает оттенки от радужного до темно-коричневого, феррит - коричневатожелтый. В ниобиевых сталях фаза Fe_2Nb окрашивается в голубой цвет. В хромистых и хромомарганцевых сталях α -фаза имеет светло-синий оттенок, феррит окрашивается в желтоватый цвет, карбиды - в темные цвета. В никелевых и молибденовых сталях феррит окрашивается в серый цвет
Красная кровяная соль 10 г, вода 100 мл	Травление электрохимическое: $U = 2,5$ В, $\tau = 20-30$ с	На светлом фоне аустенита ярко-голубые карбиды и темно-коричневая α -фаза
Насыщенный водный раствор едкого натра	Травление электрохимическое: $D_a = 0,5$ А/см ² , $\tau = 15$ с	На светло-голубом фоне аустенита α -фаза светло-желтого цвета или на сером фоне аустенита α -фаза - ярко-голубая с черной окантовкой
Царская водка 20 мл; метиловый спирт 60 мл	Травление химическое в течение 30 с - 9 мин	Аустенит светло-коричневый, α -фаза ярко-белая
Уксуснокислый свинец 10 г, вода 90 мл	Травление электрохимическое: $D_a = 0,05- 0,2$ А/см ² , $\tau = 1-2$ с	Аустенит светло-голубой, α -фаза темно-голубая

Состав травителя (или способ выявления структуры)	Режим травления	Результаты цветного окрашивания
Тепловое травление	Нагрев до 500°C, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе	α -фаза белая, аустенит темно-желтый, коричневатый, ϵ -фаза желтоватая
Сплавы на основе алюминия		
Азотная к-та ($d = 1,4$) - 10 - 25 мл; вода 90-75 мл	Травление химическое в нагретом до 70°C растворе 10-40 с	Фазы CuAl_2 , NiAl_3 , Mg_2Si чернеют, FeAl_3 приобретает пурпурную окраску. После травления в течение 2-3 с фаза CuAl_2 в сплавах алюминий- медь окрашивается в цвет от голубого до коричневатого. Остальные интерметаллиды остаются светлыми
Серная кислота ($d = 1,84$) - 5-20 мл; вода 95-80 мл	Травление химическое в нагретом до 50-60 °C растворе 5-30 с	Фаза FeAl_3 темнеет, а CuAl_2 и NiAl_3 не травятся. В сплавах алюминия с марганцем γ -фаза темнее β -фазы. В сплавах алюминий-магний-кремний травится только Mg_2Si
Едкий натр 5 - 20 г, вода 100 мл	Травление химическое на холоде 2 мин, в горячем растворе несколько секунд. Темный налет с поверхности шлифа удаляют погружением в азотную кислоту	При кратковременном травлении сначала выявляется фаза FeAl_3 . При дальнейшем травлении фазы NiAl_3 и CuAl_2 окрашиваются в темно-коричневый цвет, причем NiAl_3 окрашивается скорее. Фаза Al_3Mg_2 не выявляется
40 % плавиковая кислота - 2-3 мл, вода 98-97 мл	Травление химическое 10-40 с. Темный налет с поверхности шлифа удаляют погружением в азотную кислоту	Соединения алюминия с железом и никелем окрашиваются в коричневато-желтый цвет, с кремнием - в пурпурный
10%-ный водный раствор красной кровяной соли 5 мл; плавиковая кислота (40 %) - 5 мл; азотная кислота ($d = 1,4$) - 5 мл, перекись водорода (30 %) - 50 мл, вода 100 мл (раствор красной кровяной соли прибавляют перед употреблением)	Травление химическое	В сплавах алюминий - кремний фазы FeAl_3 и FeAl_4Si_2 окрашиваются в голубоватый цвет. 10%-ный раствор красной кровяной соли в сплавах алюминий-никель и алюминий- медь-никель окрашивает фазу Al_2Ni в темно-серый, Al_3Ni – в светло-серый, CuAl_2 - в коричневый цвет
Сплавы на основе меди		
Насыщенный водный раствор хромпика 50-100 мл, серная кислота ($d = 1,84$) - 10 мл	Травление химическое 30-60 с	В двухфазных латунях сильно травится β -фаза, α -фаза - слабее. В сплавах медь-цинк β -фаза окрашивается, γ -фаза остается светлой
Хромовый ангидрид 5- 20 г, вода 100 мл	Травление химическое 10-30 с	В двухфазной латуни альфа-фаза имеет оранжевый оттенок, β -фаза окрашивается в лимонно-желтый цвет
Насыщенный водный раствор хлорного железа 5 мл; 4%-ный водный раствор соляной кислоты ($d = 1,19$) - 30 мл, этиловый спирт 30 мл, амиловый спирт 30 мл	Травление химическое	Для сплавов меди с оловом, цинком, алюминием: α -фаза оранжевая; β -фаза в алюминиевых бронзах - черная; β -фаза коричневая
Насыщенный водный раствор брома	Травление химическое 10-60 с. Пленку удаляют раствором аммиака	В двухфазных латунях β -фаза темнеет, α -фаза не травится. В сплавах медь - цинк γ -фаза темнеет, β -фаза не травится
Сплавы на основе титана		

Состав травителя (или способ выявления структуры)	Режим травления	Результаты цветного окрашивания
Щавелевая кислота 5 г, лимонная кислота 5 г; 85%-ный раствор ортофосфорной кислоты ($d = 1,71$) - 5 мл, 85%-ный раствор молочной кислоты 100 мл, вода 35 мл, этиловый спирт 60 мл	Травление электрохимическое: U $= 65$ В, $\tau = 1,5$ с, расстояние анод - катод 12 мм	Зерна α -фазы, ориентированные в базисной плоскости, окрашиваются в желтый цвет, остальные зерна этой фазы - в красный, β -фаза - в темно-красный или фиолетовый
Щавелевая кислота 5 г, винная кислота 5 г, лимонная кислота 5 г, ортофосфорная кислота ($d = 1,71$) - 3 мл; вода 50 мл, этиловый спирт 27 мл, метиловый спирт 20 мл	Травление электрохимическое: U $= 60$ В, $\tau = 2$ с	α -фаза темно-голубая; β -фаза малиновая или фиолетовая; бориды титана желтые, $TiCr_2$ желтый
Сплавы на основе магния		
Соляная кислота 2 мл; вода 98 мл	Травление химическое при комнатной температуре	Твердый раствор магния темнеет в зависимости от продолжительности травления. Фазы Mg_4Al_3 и Mg_2Cu изменяют окраску от белой до голубой и розовой соответственно. Фаза $Mg_2Cu_3Al_2$ сереет

Магнитная металлография

Одной из задач, часто решаемых применительно к аустенитным сталям, является определение в них с помощью магнитной металлографии наличия и распределения α -фазы.

Для обнаружения на микрошлифе структурных составляющих, обладающих ферромагнетизмом, применяют методы магнитного коллоида и магнитной пасты. По первому способу магнитная фаза обнаруживается путем осаждения на полированной поверхности коллоидных частиц оксида железа, которые под влиянием магнитного поля притягиваются к структурным составляющим, обладающим ферромагнетизмом. По образованным из коллоидных частиц узорам можно судить о распределении этих ферромагнитных составляющих. При этом частицы соединений железа приобретают темную окраску, в то время, как парамагнитные участки остаются светлыми.

По второму способу расположение магнитной фазы выявляют путем нанесения на поверхность микрошлифа слоя специальной пасты, содержащей магнитные частицы, и последующей отмычки ее мыльной пеной для удаления частиц, не зафиксированных ферромагнитной составляющей. Поверхность шлифа перед нанесением магнитной пасты подвергают электрополированию для удаления деформированного слоя. Наилучшая обработка достигается при вращении обоих электродов, т.е. при однородности электролита и удаления газовых пузырьков с поверхности шлифа.

В настоящее время этот метод успешно применяется для исследования тонкой структуры металлов.

Прочие методы выявления микроструктуры

Вакуумное травление

При этом методе выявление микроструктуры происходит вследствие избирательного испарения при нагреве в вакууме и появления рельефа на поверхности нетравленного шлифа.

Полированный образец нагревают в вакууме, в результате чего на поверхности шлифа фиксируется структура, свойственная металлу при температуре нагрева. Этот рельеф

сохраняется на поверхности после полного охлаждения образца, благодаря этому может быть определена структура сплава при высокой температуре.

Образцы нагревают током низкого напряжения, причем скорость нагрева составляет 500 – 600°С/мин. Столь высокая скорость нагрева препятствует фиксации на поверхности образца микроструктур, свойственных более низким температурам. При температуре нагрева образец выдерживают 3 - 5 мин, разрежение в камере составляет $10^{-4} - 10^{-5}$ мм рт.ст.

Для того, чтобы получить на поверхности шлифа пленку с видимой окраской, необходимо уменьшить разрежение воздуха в камере до $8 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$ мм рт.ст. Цвет пленки оксида при этом зависит от температуры нагрева образца в момент понижения давления, химического состава сплава, продолжительности выдержки при данной температуре. При стандартных условиях травления цвета пленок на различных структурных составляющих стабильны. Поэтому вакуумный метод пригоден для избирательного окрашивания различных фаз в сплавах. Нагрев полированного шлифа в вакууме может быть использован для наблюдения структурных превращений при высоких температурах, например, в простых и сложнелегированных сталях, а также для выявления аустенитного зерна в эвтектоидных и заэвтектоидных углеродистых сталях.

Ионное травление

При этом методе выявление микроструктуры происходит в результате избирательного испарения при ионной бомбардировке (катодного травления) и появления рельефа на поверхности нетравленного шлифа.

Рельефное полирование.

Метод применяется, когда структурные составляющие сплава значительно различаются по твердости. Такое полирование сплава ведут на упругой подкладке (замше, резине или пергаменте), натянутой на гладкую деревянную доску. В процессе полирования круг смачивают водой с взмученным в ней оксидом алюминия или сульфидом магния. В результате такого полирования составляющие сплава, имеющие неодинаковую твердость, истираются с различной скоростью и образуют на поверхности шлифа микрорельеф, хорошо различимый под микроскопом.

Травящее полирование

В отдельных случаях для полирования цветных и некоторых редких металлов применяют травящие химически активные реактивы. Эти реактивы наносят непосредственно на полировальное сукно, и травление ими производят в процессе приготовления шлифа. Травящие реактивы ускоряют процесс полирования и выявляют структуру металла без последующего дополнительного травления (например, раствор желтой кровяной соли).

В некоторых случаях отдельные фазы в сплавах могут быть выявлены и идентифицированы на нетравленных полированных шлифах. Примеры таких фаз приведены в табл. 2.6

Таблица 2.2 Наименее употребляемые электролиты и режимы электролитического выявления карбидов специальных сталей

Растворы травления	Режимы электролитического травления для выявления карбидов								
	железа			хрома			ванадия		
	Плотность тока, А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры	Плотность тока А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры	Плотность тока А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры
0,5 % - ный раствор едкого натра	0,5	12	Карбид после травления светлый	0,5	2	Карбид при травлении темнеет	0,5	2	Карбид при травлении темнеет
10 %- ный раствор едкого натра	7	30	Карбид при травлении темнеет медленно	2	1,2	Карбид при травлении темнеет	0,7	4	Карбид при травлении темнеет же
3 % - ный раствор аммиака	0,4	5 - 10	Карбид при травлении темнеет медленно	0,3	12	Карбид при травлении темнеет	0,5	2	Карбид при травлении темнеет
Насыщенный раствор щавелевой кислоты	0,3	3	Карбид после травления светлый. Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко	0,3	2	Карбид при травлении темнеет	0,3	2	Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко
10 % - ный раствор щавелево-калиевой соли	0,3	3	Карбид после травления светлый. Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко	0,3	2	Карбид при травлении темнеет	0,3	2	Карбид при травлении темнеет
10 % - ный раствор щавелево-калиевой соли	0,3	1 - 2	Карбид при травлении темнеет. Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко	0,3	2	То Карбид при травлении темнеет же	0,3	2	Карбид после травления светлый. Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко
10 % - ный раствор синеродистой ртути	0,2	6	Карбиды при протравливании темнеют. Протравливание неравномерное	0,1	2	Карбид при травлении темнеет	0,1	5	Карбид после травления светлый. Протравливание неравномерное
10 % - ный раствор лимонной кислоты	0,3	5	Карбид после травления светлый	0,3	2	Карбид при травлении темнеет	0,3	1	Карбид при травлении темнеет
10 % - ный раствор лимонно-алюминиевой соли	0,2	5	Карбид после травления светлый	0,2	2	Карбид после травления темнеет	0,2	2	Карбид при травлении темнеет
10 % - ная уксусная кислота	0,2	1	Наблюдается неравномерное протравливание	0,2	2	Карбид при травлении темнеет	0,2	3	Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко
10 % - ный раствор ацетата калия	0,2	5	Карбид после травления светлый	0,2	1	Карбид при травлении темнеет	0,2	1	Карбид при травлении темнеет

Растворы травления	Режимы электролитического травления для выявления карбидов								
	железа			хрома			ванадия		
	Плотность тока, А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры	Плотность тока А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры	Плотность тока А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры
5 % - ный раствор ацетата меди	0,2	5	Протравливание неравномерное	0,2	1	Карбид при травлении темнеет	0,2	1	Карбид при травлении темнеет
10 % - ный раствор углекислого натрия	0,3	5	Карбид после травления светлый	0,3	1	Карбид после травления темнеет	0,3	2	Карбид при травлении темнеет
10 % - ный раствор синеродистого натрия	0,2	2	Карбид после травления светлый	0,2	2	Карбид при травлении темнеет	0,2	2	Карбид при травлении темнеет
<i>Примечание:</i> анодом служит образец, катодом – платиновая проволока									

Таблица 2.3 Электrolитическое выявление карбидных и интерметаллидной фаз в быстрорежущей стали

Электролит	Режим электрического травления для выявления карбидов и интерметаллидов				
	карбида железа	карбида хрома	карбида ванадия	карбида вольфрама	вольфрамида железа
0,5 % - ный раствор едкого натра	0,5 А/дм ² , 12 В, светлый	0,5 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,5 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 30 В, темнеет
10 % - ный раствор едкого натра	7 А/дм ² , 30 В, темнеет медленно	2 А/дм ² , 1 - 2 В, темнеет	0,7 А/дм ² , 4 В, темнеет	0,1 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,05 А/дм ² , 1 В, темнеет
8 % - ный водный раствор аммиака	0,4 А/дм ² , 5 – 30 В, темнеет медленно	0,3 А/дм ² , 12 В, темнеет	0,5 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 20 В, темнеет медленно
Насыщенный раствор щавелевой кислоты	0,3 А/дм ² , 3 В, светлый, основа равномерно травится	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет, основа равномерно травится	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, светлый, основа травится равномерно
10 % - ный раствор щавелевокалиевой соли	0,3 А/дм ² , 3 В, светлый, основа равномерно травится	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 в, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, светлый, основа травится равномерно
10 % - ный раствор щавелевокислого железа	0,3 А/дм ² , 1 – 2 В, темнеет, основа травится	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, светлый, основа травится равномерно	-	—
10 % - ный раствор лимонной кислоты	0,3 А/дм ² , 5 В, светлый	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 6 В, светлый
10 % - ный раствор лимонно-алюминиевой соли	0,2 А/дм ² , 5 В, светлый	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 5 В, темнеет
10 % - ный раствор ацетата калия	0,2 А/дм ² , 5 В, светлый, травление неравномерное	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 5 В. Темнеет
10 % - ный раствор углекислого натрия	0,3 А/дм ² , 5 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 5 В, светлый
10 % - ный раствор углекислого аммония	0,3 А/дм ² , 6 В, светлый	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 7 В, светлый
10 % - ный раствор уксусной кислоты	0,2 А/дм ² , 1 В, светлый, травление неравномерное	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 3 В, темнеет, основа травится равномерно	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет, травление неравномерное
5 % - ный ацетат меди	0,2 А/дм ² , 5 В, светлый, травление неравномерное	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	—	0,2 А/дм ² , 5 В, светлый, травление неравномерное
10 % - ный раствор синеродистого натрия	0,2 А/дм ² , 2 В, светлый	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 2 В, светлый	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 2 В, светлый
10 % - ный раствор синеродистой ртути	0,2 А/дм ² , 6 В, темнеет, травление неравномерное	0,1 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,1 А/дм ² , 5 В, светлый, травление неравномерное	0,1 А/дм ² , 1 В, темнеет, травление неравномерное	0,1 А/дм ² , 3 В, светлый, травление неравномерное
Примечание: 1. Концентрация электролитов, % (масс) 2. При травлении образец служит анодом, платиновая проволока – катодом					

Таблица 2.4 Электролиты и режимы электроотравления для дифференциации карбидов и интерметаллидов различных элементов в стали

Электролит	Режим электроотравления	Интерметаллиды (с железом)			карбиды		
		не окрашиваются	окрашиваются	не выявляются	не окрашиваются	окрашиваются	не выявляются
10 % - ный раствор щавелевой кислоты	0,1 – 0,5 А/дм ² , 5 – 20 с	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–
10 % - ный раствор хлорного железа + 1 % - ный раствор соляной кислоты	1 – 4 В, 5 – 15 с	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–
Травящая электрополировка в фосфорохромовом электролите	0,1 – 0,5 А/дм ² , 3 – 10 с	Cr, Mo, V	W, Ti, Nb	–	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–
Лимонная кислота, йодистый калий, соляная кислота	1 – 4 В, 2 – 20 с	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–
Щелочной раствор пикрата натрия	1 – 3 В, 5 – 30 с	Mo, V, Nb	Cr, W, Ti	–	Cr, Ti, Nb	W, Mo, V	–

Таблица 2.5 Условия электролитического травления нержавеющей стали для выявления карбидов и сигма-фазы

Реактив	Режим		Окраска		
	Напряжение, В	сВремя,	Сигма-фазы	Карбидов	Основы
Концентрированный раствор NaOH	6	30	-	Синяя	-
Концентрированная кислота HNO ₃	1,5	5	Темная	-	Светлая
10-н. раствор КОН	3	0,4	Розово-коричневая	-	-
10-н.раствор КОН	3	1,2	Зеленая и коричневая	Белая	-
0,1-н. раствор КОН	3	25	Тускло-желтая или синяя	Синяя	-
1-н. раствор (CH COO) ₂	3	5	Пурпурно-красная	Рыжевато-коричневая	Светлая
Насыщенный раствор Ba(OH) ₂	6	2	Желтая	Коричневая и белая	-
Щелочной раствор KMnO ₄	6	3	Ярко-розовая или оранжево-коричневая	Светло-коричневая	-
50 % - ный раствор КОН	1,5	12	Синяя	Белая	-
10 % - ный раствор C (CH COO) ₂	1,5	15	Белая	Темно-синяя	Тускло-желтая
2-н. раствор NaOH	3	7	Коричневая	-	-
Концентрированный раствор КаОН	6	10	-	Желтоватая	-
10-н. раствор КОН	1,5	3	Синяя	-	-

Таблица 2.6 Характеристика фаз, идентификация которых возможна на нетравленных шлифах

Фаза	Характеристика фазы
Mg ₂ Si	Серо - голубая, на воздухе быстро тускнеет, покрываясь радужной пленкой
CaSi ₂	Серая, быстро тускнеет
CuAl ₂	Светло-розовая
NiAl ₂	Светло-серая
FeAl ₂	От бледно-лилового до серого с фиолетовым оттенком
MnAl ₆	Бледно-серая в двойных Al-Mn сплавах (чем больше марганца, тем темнее)
CrAl ₇	Светло-серая
Si	Четкие рельефные включения серого цвета
α (AlMnSi)	Светло-серая, более темная и тусклая, чем CrAl ₇
β (AlMgSi)	Более темная, чем фаза AlMnSi, с более заметным серо-голубым оттенком, обычно в виде продолговатых игл
Al ₂ CuMg	Бледно-лиловая с голубым оттенком
α (AlFeSi)	Серая с фиолетовым оттенком, часто имеет вид китайских иероглифов
β (AlFeSi)	Светло серая, обычно иглообразной формы
AlCuFe	Серая
AlFeMn	Бледно-серая, как фаза MnAl ₆
AlCuNi	Серая с фиолетовым оттенком
AlFeSiMg	Перламутрово-серая
AlCuFeMn	Светло-серая
Ni ₄ Mn ₁₁ Al ₆	Серая с фиолетовым оттенком
<i>Примечание.</i> Фазы, состав которых точно не установлен, приведены в скобках	

2.3 Методы микроскопического исследования

Методы исследования металлографических шлифов основаны на применении различных видов освещения их поверхности с выявленной травлением (или иным способом) структурой и рассмотрении этой поверхности с помощью микроскопов.

Все современные оптические микроскопы оснащены приспособлениями для проведения исследований различными методами.

Методики проведения исследований указанными ниже методами приведены в инструкциях к микроскопам, поэтому в данном справочнике подробно не рассматриваются.

Метод светлопольного освещения

Метод является наиболее распространенным и универсальным. Это основной метод исследования в оптическом металломикроскопе. Свет, падающий на поверхность шлифа, отражается от нее в объектив как от зеркала. Детали рельефа, отражающие свет в других направлениях (диффузно рассеивающие его), кажутся поэтому темными на фоне хорошо освещенного (светового) поля. Этот вид исследования позволяет составить общее представление о структуре материала шлифа. Для освещения используется белый и монохроматический свет.

Метод косого освещения

Наряду с осевыми пучками света, параллельными оптической оси микроскопа, для освещения шлифа могут использоваться и «косые» лучи. В этом случае свет на поверхность шлифа падает так образом, что при своем отражении лишь частично попадает в объектив и участвует в формировании изображения. Этот способ освещения пригоден для рельефных объектов исследования. «Косое» освещение применяют и при оценке качества подготовки шлифа, для выявления царапин, «хвостов» и подобных дефектов.

Метод темнопольного освещения

При темнопольном освещении в микроскопе рассматривается изображение шлифа, сформированное только косыми лучами, т.е. в объектив попадает только рассеянная элементами структуры шлифа часть света. Зеркально же отраженные лучи объектива не достигают, и поверхность шлифа выглядит темной. Мало отличающиеся по своей отражающей способности элементы структуры, не различимые при исследовании в светлом поле, могут проявить сильное отличие при темнопольном освещении. Так, темнопольное исследование успешно применяется для выявления отдельных частиц (например, при изучении загрязненности стали неметаллическими включениями), особенно при малых их размерах. Частицы на темном поле выделяются в виде ярких точек.

Метод освещения поляризованным светом

При использовании плоскополяризованного света для освещения поверхности шлифа, что достигается путем введения в осветительную систему микроскопа поляризатора, происходит преобразование плоскополяризованного света в эллиптически поляризованный и поворот плоскости поляризации.

Применение поляризованного света целесообразно для выявления двойников, субзерен, перлитных областей, наличия гидридов и иных включений и т.п.

Особенно ценную информацию дает использование поляризованного света при исследовании неметаллических включений.

При подготовке шлифа к исследованию в поляризованном свете необходимо особенно тщательно проводить все стадии подготовки шлифа, так как остающиеся царапины, риски, выкрашивания, питтинги и т.п. нарушают затемнение при скрещенных полярофильтрах и своим изображением затушевывают картину строения шлифа.

Метод фазового контраста

Метод основан на том, что при отражении света от зеркальной поверхности происходит сдвиг по фазе, равный четверти длины волны падающего света.

С этой целью в оптическую систему микроскопа вводят элементы, доводящие сдвиг фаз прямого и отраженного света до половины длины волны. Если наложить друг на друга изображения, сформированные непосредственно отраженными лучами и лучами, дополнительно получившими сдвиг по фазе на четверть волны, то произойдет взаимное их гашение. Так как рельеф, образующийся на элементах структуры, вызывает сдвиг по фазе, отличный от четверти волны, то полного гашения при совмещении изображения не происходит, и рельеф микрошлифа выявляется на изображении достаточно четко.

Фазовый контраст можно с успехом применять при изучении деформационного рельефа. Металлографические шлифы для изучения их методом фазового контраста травят значительно слабее, чем при вышеизложенных способах исследования.

Метод интерференционного контраста

Интерференционный метод используется для исследования качества обработки поверхности и выявления рельефных дефектов поверхности. Исследования выполняются с помощью специальных приборов – микроинтерферометров.

Для получения систем волн, способных интерферировать между собой, производят разделение на два пучка лучей, исходящих из одного источника света. В результате совмещения двух систем волн в фокальной плоскости окуляра наблюдаются интерференционные полосы. Величину смещения выражают в долях интервала между интерференционными полосами. Зная длину волны света, можно определить величину неровностей поверхности.

Кроме метода двухлучевой интерференции, используют метод многолучевой интерференции, достигаемой посредством помещения на пути лучей плоской эталонной

пластинки, которая частично пропускает, а частично отражает лучи света на поверхности образца.

2.4 Методы электронно-микроскопических исследований

Методы электронной микроскопии позволяют расширить и дополнить сведения, получаемые с помощью макро- и микроисследований. Более подробно изучить характерные особенности тонкого строения металлов, элементы микрорельефа, необходимые для определения механизмов разрушения, механизмы пластической деформации в зоне разрушения, элементы структуры, являющиеся источником зарождения микротрещин. При этом наиболее широко применяются методы просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) электронной микроскопии.

Увеличение при работе на электронном микроскопе выбирают в зависимости от решаемой задачи. В практике обычно применяются ПЭМ с разрешающей способностью 2,5 – 5 нм и РЭМ – 7 – 10 нм.

Метод ПЭМ включает следующие способы:

- косвенный – с помощью реплик, получаемых с поверхности образца;
- полупрямой – с помощью реплик с извлеченными из металла частицами;
- прямой – с помощью тонких фольг.

Первым способом обычно изучают морфологию и размеры тонких деталей микроструктуры.

Вторым способом проводят микродифракционный анализ – идентифицируют дисперсные фазы в металлической матрице (карбиды, нитриды, неметаллические включения и т.д.); способ эффективен при малой объемной доле этих фаз в металле.

Третьим способом изучают морфологию и размеры тонких деталей микроструктуры, проводят идентификацию фаз (микродифракционный анализ), определяют ориентировку кристаллов и ориентационные соотношения, разориентировку зерен и субзерен. Изучают особенности фазовых превращений (мартенситные превращения, распад пересыщенных твердых растворов и дислокационную структуру).

Метод РЭМ применяют для структурных исследований на шлифах в основном при изучении морфологии и количества неметаллических включений и при изучении сложно легированных сплавов, имеющих гетерогенное строение, а также для исследования поверхностей разрушения.

Сравнительные преимущества и недостатки РЭМ и ПЭМ.

Выбирая любой метод исследования структуры и изломов (ПЭМ или РЭМ), следует учитывать различия в подготовке объектов исследования, прежде всего трудоемкость изготовления образцов.

На РЭМ изучают непосредственно поверхность шлифа или излома, на ПЭМ – реплики с поверхности образцов или фольги, вырезанные из образцов.

Изготовление реплик и фольг для ПЭМ – процесс весьма трудоемкий. Исследования методом РЭМ – менее трудоемкий: требуется только вырезка образцов, размеры которых соответствуют размерам объектодержателя. Кроме того, РЭМ позволяет исследовать пластиковые реплики, оттененные металлом, снимаемые с крупногабаритных объектов. РЭМ дает возможность существенно проще, чем ПЭМ изучать точечные или единичные элементы структуры металла. РЭМ позволяет исследовать образцы с площадью до 20 x 70 мм, в то время, как максимальный размер реплик для ПЭМ – 3 x 3 мм. Благодаря этому при использовании РЭМ можно регистрировать одновременно многие элементы структуры и устанавливать взаимосвязь между ними. Для этой же цели при применении ПЭМ для получения сравнимой достоверности необходимо исследовать на репликах по меньшей мере в два раза большую по площади поверхность, так как необходимо обеспечить перекрытие краев реплик, кроме того, значительная часть площади реплики экранируется поддерживающей сеткой.

Недостатки исследования структуры с помощью РЭМ:

- искажение размеров элементов структуры, располагающихся под большими углами к электронному пучку;

- затрудненность изучения образцов со слабо выраженным плоским рельефом поверхности.

Недостатки исследования структуры с помощью ПЭМ:

- возможность повреждения поверхности образца при снятии реплик;
- погрешности, вносимые при изготовлении реплик;
- невозможность снятия реплик с изломов, имеющих грубую или сильно развитую поверхность;
- невозможность исследования микротрещин, не совпадающих с поверхностью разрушения.

Большой дополнительный материал может быть получен путем сопоставления результатов исследования на ПЭМ и РЭМ. Большая разрешающая способность используемых в заводской практике ПЭМ - (2,5 нм и 7 – 10 нм соответственно) позволяет при исследовании на ПЭМ выявлять более мелкие детали микрорельефа, не разрешаемые при использовании методов РЭМ. Поэтому РЭМ обычно используют при увеличении до 10000 крат, а ПЭМ – до 30000 крат.

Полезным методическим приемом является нанесение на поверхность образца пластиковой координатной сетки, позволяющей точно фиксировать место, которое будет изучаться с помощью электронного микроскопа.

Изучение структуры металлов с помощью ПЭМ.

Для исследований применяются одноступенчатые угольные реплики, двухступенчатые пластиково-угольные реплики, оксидные реплики и тонкие фольги.

Преимущество одноступенчатых угольных реплик – высокая точность воспроизведения исследуемой структуры, недостаток – повреждение исследуемой поверхности при изготовлении реплик.

Преимущество двухступенчатых пластиково-угольных реплик – возможность многократного исследование одного и того же участка образца, а также отдельных участков крупногабаритных деталей без их разрезки. Недостаток метода – возможные искажения истинной картины строения структуры, обусловленные техникой изготовления реплик. Для исследования тонкой структуры алюминиевых сплавов применяются оксидные реплики.

Преимущество фольг:

- возможность исследовать структуру в объеме металла;
- возможность использовать большие увеличения.

С помощью реплик обычно изучают тонкое строение структуры металла, а также проводят идентификацию таких дисперсных фаз, как карбиды, нитриды, неметаллические включения и т.д., определяя их размеры, форму и распределение по поверхности (косвенный или экстракционный способ). Экстракционный способ особенно эффективен при малой объемной доле этих фаз в металле.

Процесс изготовления реплик связан с рядом методических особенностей, которые могут исказить реальные элементы структуры или обусловить появление деталей строения самой реплики, не отражающих истинное строение структуры. Такие искажения истинной структуры называются артефактами.

Для металловеда – практика, участвующего в интерпретации результатов исследований, проводимых с помощью реплик, важно учитывать возможность возникновения артефактов, искажающих получаемые результаты.

Характерные артефакты, основные причины их возникновения в одноступенчатых угольных репликах и способы их устранения:

- чужеродный материал в реплике; появляется из-за недостаточно тщательной очистки поверхности образца; способ устранения – улучшение очистки и контроль поверхности образца перед изготовлением реплики с помощью светового микроскопа;
- искажение или маскирование мелких (менее 2 – 5 нм) элементов структуры, плохая проработка копируемой поверхности; возникают из-за слишком большого количества напыленного углерода или оттеняющего металла; для предупреждения следует изготавливать реплики минимальной толщины;

- отверстие (разрыв) в реплике, образующееся в процессе ее отделения от поверхности образца; причины – слишком плотное прилипание тонкой реплики к исследуемой поверхности; для предупреждения следует увеличить толщину реплики;

- растворение экстрагированных в реплике частиц; происходит при использовании для снятия реплик неправильно подобранных химических реактивов; предупреждение – подбор химических реактивов, не растворяющих изучаемые фазы;

- складки и разрывы в репликах; образование их связано с высоким уровнем сил поверхностного натяжения при сушке реплики; предупреждение – отработка процесса высушивания реплики, а также применение сушки реплик методом вымораживания; дефект в основном присущ поверхностям разрушения, имеющим большие гребни и впадины или нерегулярное строение;

- вспучивание реплики; причина – нарушение режима напыления (неудовлетворительный вакуум); не возникает при вакууме ниже 10 Па;

- зернистая (глобулярная) структура реплики; образуется из-за расплавления оттеняющего реплику металла; предупреждение – корректирование фокусировки электронного пучка и применение для оттенения платины;

Характерные артефакты, основные причины их возникновения в двухступенчатых пластиково-угольных репликах и способы их устранения:

- ложная структура; образуется из-за неполного растворения желатины, используемой для отделения угольной реплики от поверхности образца; устраняется при тщательном соблюдении методических рекомендаций при растворении желатины;

- неточное воспроизведение поверхности разрушения пластиковым отпечатком; с увеличением степени шероховатости поверхности разрушения такая возможность возрастает;

- неизбежная деформация пластикового отпечатка на разных стадиях изготовления двухступенчатой реплики;

- неполное удаление пластика с поверхности угольной реплики при растворении пластикового отпечатка; предупреждение – тщательное соблюдение методических рекомендаций при растворении пластмассы.

Недостатки изготовления двухступенчатых пластиково-угольных реплик хоть и вносят определенные искажения в истинную картину структурных исследований, их широко применяют в практике, особенно при изучении изломов, неповреждаемость поверхности разрушения которых является желательной.

Кроме самих изломов с помощью РЭМ можно исследовать толстые двухслойные пластиковые реплики с изломов. Для изготовления толстых пластиковых реплик вместо угля напыляют сплошное электропроводящее покрытие из платины или смеси угля с платиной толщиной около 10 нм.

Большую дополнительную информацию можно получить при использовании приставок и вспомогательного оборудования к РЭМ. К ним относятся, в частности, приставки спектрофотометров для микроанализа, позволяющие проводить локальный химический анализ включений или отдельных микроучастков поверхности разрушения, а также исследовать интегральное распределение химических элементов по всей поверхности разрушения; специальные детекторы изображения, позволяющие изучать изломы в режиме катодolumинисценции (для соединений, которые светятся при бомбардировке пучком электронов).

2.5 Характерные микроструктуры основных конструкционных металлов

Материалы на основе железа (рис.2.1-2.8)

Низколегированные стали

Структура этих сталей чаще всего двухфазная, редко – однофазная или многофазная.

Матрица – твердый раствор углерода в железе (феррит). Основные фазы: Fe_3C (цементит), Fe_2C (ϵ -карбид). Другие фазы: включения оксидов, сульфидов, оксисульфидов, нитридов, карбонитридов и боридов.

Первичная структура дендритная или ячеистая, вторичная структура разнообразная в зависимости от вида термической или термомеханической обработки.

Высоколегированные стали

Структура этих сталей может быть одно-, двух- или многофазная. Она содержит карбидные или интерметаллидные фазы в матричном твердом растворе, образованные легирующими элементами - хромом, марганцем, никелем, молибденом, вольфрамом, кобальтом, кремнием. В этих сталях присутствуют также фазы – сложные карбиды, цементит, специальные карбиды (простые или двойные карбиды ниобия, титана, вольфрама и других элементов). Форма карбидов глобулярная, стержнеобразная, пластинчатая. Распределение в матрице: равномерное по объему, в виде скоплений, в виде сетки. Структуры: ферритная (α - или β -феррит), аустенитная, аустенитно-ферритная, ледебуритная. Метастабильные карбиды и их переходные формы в оптическом микроскопе не разрешаются, их идентифицируют физическими методами.

Чугуны (рис. 2.9 – 2.11)

Основные типы структур те же, что и у стали. Свободный углерод присутствует в виде графитных включений пластинчатой, шаровидной или хлопьевидной формы. Виды пластинчатого графита: равномерно-пластинчатый, неравномерно пластинчатый, междендритный, сетчатый, ветвистый, розеточный, гнездообразный. Виды сфероидизированного графита: совершенной или несовершенной глобулярной формы, червеобразной, узелковой, веретенообразной и др. Виды хлопьевидного графита: компактный, рыхлый, узелковый, облаковидный и т.д. Наряду с графитом, образовавшимся при кристаллизации (сегрегационный графит), в структуре присутствуют тройная или псевдобинарная фосфидная эвтектика (Fe_3P , Fe_3C , Fe). В ледебуритной структуре первичный цементит бывает компактным, мелкодисперсным, сетчатым, пластинчатым, иглообразным. Вторичный цементит бывает пластинчатым или ромбовидным. Возможная форма цементита: глобулярная, пластинчатая, многогранник, ветвистая. Сульфиды железа и марганца распределены неравномерно.

Графитная фаза в чугунах очень мягкая и хрупкая, выкрашивается при механической обработке, при химической или электрохимической обработке устойчива.

Цветные металлы

Сплавы меди (рис. 2.12-2.14)

Структура чаще всего одно- или двухфазная, реже – многофазная.

Матрица представляет собой однородный твердый раствор на основе меди; зерна обычно полиэдрические, двойникованные. Избыточные фазы – интерметаллидные соединения, образовавшиеся при перитектических реакциях или эвтектоидных превращениях.

Первичная структура – эвтектика. Свинец присутствует в виде самостоятельной фазы из-за низкой растворимости в меди.

Сплавы алюминия (рис. 2.15, 2.16)

Алюминиевые сплавы представляют собой твердый раствор, легированный различными элементами.

Структура сплавов преимущественно многофазная, реже – однофазная. Чистый алюминий обычно представляет собой крупные полиэдрические зерна без двойников; α -твердый раствор имеет низкую предельную растворимость легирующих элементов, чаще всего увеличивающуюся с повышением температуры, что вызывает появление эвтектики; разнообразные интерметаллидные соединения алюминия с легирующими элементами (например, Al_2Cu , Al_3Fe , Al_6Mn , Mg_2Si , $\text{Al}_3\text{Si}_2\text{Fe}_2$) часто встречаются в характерных сочетаниях.

Металлографическая идентификация интерметаллидов по форме и травимости возможна, но затруднительна, исключением являются сплавы системы Al-Si: первичные выделения кремния компактны, имеют лентообразную, пластинчатую или иглообразную форму. Эвтектика Al-Si грубозернистая, после термической обработки приобретает мелкозернистую форму.

Сплавы магния (рис. 2.17, 2.18)

Основными легирующими элементами в магниевых сплавах являются алюминий и цинк. Они входят как в состав твердого раствора, так и образуют интерметаллидные соединения Mg_4Al_3 , $MgZn_2$, $Mg_4Al_3Zn_3$, $MgAlZn$.

Структура однофазная или многофазная. Магний с алюминием, марганцем, цинком образует твердые растворы с ограниченной, зависящей от температуры растворимостью. Интерметаллидные фазы с алюминием резко ограниченные, белого цвета. Труднорастворимые кристаллиты часто выглядят как распавшаяся эвтектика. Эвтектика Mg_2Si с первичными кристаллами магния серо-голубого цвета. В литейных сплавах могут быть выделения кристаллов фазы $Mg_{17}Al_{12}$ по границам зерен и частицы $ZnZr$ и $ZnZr_3$. В деформированных сплавах встречаются фазы $Mg_{17}Al_{12}$ в виде строчек в направлении деформации, а также фазы $Mg_{12}Nd$, Mg_3Th , $Mg_{24}Y$ и др.

Сплавы титана (рис. 2.19 , 2.20)

Сплавы титана бывают одно-, двух- и многофазные; чистый титан полиморфен: гексагональный α -титан устойчив до $882^\circ C$, β -титан с ОЦК решеткой устойчив до $1668^\circ C$. При охлаждении он претерпевает превращения мартенситного типа. Промышленные сплавы титана имеют структуру трех типов: α , $\alpha + \beta$ и β . Для сплавов титана характерно образование твердых растворов внедрения, карбидов, нитридов, интерметаллидных фаз $TiAl$, $TiAl_3$, Ti_2H_7 .

Сплавы никеля (рис. 2.21)

Основными легирующими элементами в никелевых сплавах являются те, которые создают гетерогенную структуру с упрочнителями в виде сложных интерметаллидных соединений и карбидов (C, Al, Nb, Ti, Hf, V, Mo, Cr, W).

Основные составляющие структуры сплавов: матрица – аустенитная γ -фаза на никелевой основе, интерметаллидная γ' -фаза, выделяющаяся когерентно с аустенитом, карбиды по границам и в объеме зерен, тройные эвтектики, γ -, γ' -карбиды (MC), карбоборидные фазы.

Структура сварных соединений (рис. 2.22, 2.23)

Структура сварных соединений подразделяется на структуру шва, зону сплавления и зону термического влияния. Характерная структура сварного соединения проката из стали 30X2H2M приведена на рис.2.22, из алюминиевого сплава В92 (система Al-Zn-Mg), модифицированного титаном и цирконием, - на рис.2.23.

2.6 Методы количественной оценки структуры

Неавтоматизированные методы

Существует несколько простых методов количественной оценки элементов структуры, проводимых визуально или с помощью оптических приборов, имеющих небольшие увеличения. Этими же методами оценивают фотографии этих элементов, снятых в натуральную величину или с любым увеличением.

Метод визуальной оценки

Исследуемые элементы структуры или их фотоизображения визуально сравнивают с эталонными шкалами, специальными атласами – классификаторами, картами или схемами дефектов, представляющими собой набор характерных изображений, подобранных по заданной градации (см. Приложение 3, ГОСТ 8233-56, ГОСТ 1778-79).

Метод эталонной сетки

Этот метод более объективен, но более трудоемок, чем предыдущий. При его использовании из прозрачного материала (например, целлулоид) изготавливают эталонную сетку по размеру шлифа или излома. Эта сетка представляет проекцию площади объекта, разделенную на 100 клеток, каждая из которых составляет 1 % площади объекта. Эталонную сетку накладывают на поверхность объекта и мелом или смываемым карандашом обводят участки шлифа или излома, занятые определяемым структурным элементом (например, отдельные структурные составляющие или кристаллическую сыпь, участки кристаллического или шестоватого строения или другие участки излома, подлежащие количественному обсчету). Затем подсчитывают число клеток, занятых структурными элементами. Клетки, заполненные свыше 50 %, считают полностью занятыми, менее 50 % - незанятыми. Подсчитанное число клеток с определяемым структурным элементом определяет количество этого элемента в процентах. Примеры определения процента площади излома, занятой структурным элементом, приведены на рис.

Метод взвешивания

Из фотографии излома или кальки, на которую нанесены анализируемые структурные составляющие, вырезают изображения элементов излома, подлежащих оценке, и взвешивают. В этом случае содержание анализируемого элемента структурной составляющей (с.с.) излома (в процентах) определяют по формуле:

$$\% \text{ с.с.} = (P_1/P_2) \cdot 100\%,$$

где P_1 - масса фотографии или кальки, приходящаяся на анализируемый элемент (с.с.); P_2 - общая масса фотографии или кальки.

Полученные результаты обрабатывают с привлечением аппарата математической статистики.

Метод планиметрирования

С помощью планиметра обводят контуры участков изображения структуры, подлежащих обсчету, и определяют их площадь.

Методы визуальной оценки, эталонной сетки, взвешивания и планиметрирования имеют существенные недостатки:

- большую погрешность измерения;
 - невозможность измерения линейных размеров дефектов сложной формы;
 - затрудненность использования и возрастание ошибки при оценке изломов или их изображений, имеющих малые размеры;
- субъективность документальной фиксации результатов оценки.

Метод секущих

Применяется при обсчете элементов излома, имеющих замкнутые контуры (ямки, фасетки и др.). Проводится, по фотографиям. Метод заключается в нанесении на фотоснимок в произвольных направлениях секущих линий определенной длины. Вдоль этих линий определяются размеры сечений элементов счета, их средний размер и разделение элементов по размерам.

Метод профилограмм

С помощью этого метода определяют шероховатость поверхности разрушения. Данные о размерах элементов строения излома в направлении координаты Z позволяют судить о величине микропластической деформации металла, оценивать размер кристаллитов в изломе и других элементов строения излома, определять форму и объем частиц включений в зоне разрушения и т. п.

Для исследования изломов применяют два способа построения профилограмм поверхности разрушения:

- путем механического разреза излома по выбранному сечению и построения профилограммы с использованием световых металлографических или инструментальных луп и микроскопов;
- с помощью профилографов (путем перемещения тонкой иглы профилографа по поверхности разрушения с записью профилограммы).

Характеристики шероховатости (одну или несколько) выбирают из номенклатуры.

Отсчеты ведут по средней линии профиля m , представляющей собой базовую линию, проведенную так, что среднеквадратичное отклонение профиля от этой линии минимально; S_m определяют как среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины l ; S - как среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по выступам в пределах базовой длины l ; R_{max} - как среднее расстояние между линией выступов профиля и линией впадин в пределах базовой длины l ; R_a и R_z в пределах базовой длины.

Метод определения пластической деформации при образовании излома

На участке излома с максимальной величиной скоса боковых кромок измеряют величину скоса. Указанная величина называется утяжкой излома, измеряется в миллиметрах и в заводской практике входит в число оценочных характеристик качества металла.

Наиболее существенный недостаток описанных неавтоматизированных методов количественной оценки строения изломов - их значительная трудоемкость.

Автоматизированные методы

Метод количественного анализа элементов структуры позволяет автоматически производить подсчет площади, линейных размеров (длины, ширины, периметра), расстояния между элементами структуры, плотности распределения элементов структуры на шлифах и поверхностях разрушения. Следует отметить, что достаточная достоверность и объективность результатов измерений возможна только в том случае, когда между определяемыми элементами строения имеется четко выраженная граница раздела, иначе говоря, существует различие в отражательной способности отдельных элементов или их различие по цвету, находящееся в пределах чувствительности прибора. Это обуславливает высокие требования к качеству объекта исследования.

Аппаратура для количественного автоматизированного подсчета элементов изображений подразделяется на две группы: полностью автоматизированные и полуавтоматизированные системы.

В системах, полностью автоматизированных, для подсчета элементов изображения используется принцип линейного анализа. Выполняется он с помощью светового луча, сканирующего исследуемую поверхность. Изображение объекта фиксируется телевизионной камерой, сигналы с которой поступают одновременно на автоматический анализатор изображений (ААИ) и на экран видеоконтрольного устройства (ВКУ). ААИ выделяет, классифицирует и разделяет по заданным оператором градациям импульсы, соответствующие оптической отражательной способности элементов исследуемой поверхности в соответствии с контролируемыми параметрами элементов строения поверхности металла. Электронно-вычислительные устройства ААИ снабжены электронной памятью, что позволяет итоговый результат измерений фиксировать с помощью показывающего прибора или печатающего устройства. Наиболее совершенными из выпускаемых серийно в настоящее время являются приборы серии «Квантимет». В этих приборах использована сканирующая телевизионная камера с высокой разрешающей способностью, позволяющей дифференцировать частицы практически по 20 световым (от черного к белому) оттенкам.

Автоматические анализаторы изображения позволяют одновременно измерять площадь нескольких структурных составляющих разного типа.

Измерение линейных размеров элементов строения на шлифах и изломах с помощью ААИ в большинстве случаев проводят по фотографиям или голографическим изображениям. При этом целесообразно ретушировать или очерчивать объект счета таким образом, чтобы его границы были четкими и замкнутыми. В поле зрения изучаемых элементов не должны находиться

изображения, соизмеримые с границами других элементов изображения по контрасту или размерам.

Следует, отметить, что полностью автоматизированные системы ограниченно применимы для оценки реальных шлифов и изломов по следующим причинам:

- в строении большинства объектов исследования отсутствуют четко очерченные границы структурных элементов, поэтому они не могут однозначно детектироваться (выделяться) ААИ;
- в строении объектов исследования имеются одинаковые структурные элементы, различающиеся по цветовым оттенкам или блеску из-за различной их ориентации по отношению к источнику освещения, поэтому идентификация их с помощью ААИ затруднена;
- в связи с шероховатостью поверхности изломов требуется изменение фокусировки в процессе работы, что затруднено при работе приборов в автоматическом режиме.

Для исследования поверхностей разрушения весьма эффективны полуавтоматизированные системы обработки изображений (ПААИ).

Принципиальное отличие этих систем от полностью автоматизированных заключается в следующем: неподвижное изображение исследуемой поверхности передается на экран ВКУ с помощью электронного устройства «световое перо», управляемого оператором. Графическая информация, наблюдаемая на экране ВКУ, преобразуется в электрические сигналы, которые обрабатываются с помощью электронно-вычислительного устройства, вводятся в систему памяти, а затем выдаются в виде окончательного суммарного результата.

Полуавтоматические анализаторы изображений позволяют:

- анализировать мелкодисперсные структурные элементы или элементы с нечетко выраженными границами раздела;
- оценивать элементы поверхности разрушения путем применения оптических систем со сменными объективами, имеющими различное фокусное расстояние и обеспечивающими получение резкого изображения отдельных участков шероховатой поверхности;
- выделять границы объектов, имеющие плавное изменение световой плотности (степени почернения), что значительно повышает точность измерения их геометрических размеров;
- выделять из сложных многофазных объектов, однотонных по цвету, структурные элементы, подлежащие обсчету.

В этом состоит несомненное преимущество полуавтоматических анализаторов перед ААИ.

С помощью «светового пера» оператор на экране ВКУ может корректировать анализируемое изображение, исключая из него ненужные элементы, или, наоборот, дорисовывать нечетко видимые элементы строения излома. Оператор может очерчивать контур анализируемых элементов изображения, устанавливать те элементы структуры, расстояние между которыми или плотность распределения которых необходимо определить. При этом, что особенно важно, определяется линейная протяженность элементов структуры излома (например, расслоений).

Такая работа анализаторов изображений в полуавтоматическом режиме значительно расширяет методические возможности приборов и позволяет исследовать не только поверхность шлифов, фотографий и голограмм изломов, но и сами изломы.

Последовательность проведения количественной оценки площади дефектов двух типов в литой стали на полуавтоматическом анализаторе изображения ПААИ состоит в следующем. Излом технологической пробы устанавливают под объектив сканирующей камеры и получают изображение поверхности разрушения на экране ВКУ. С помощью «светового пера» оператор оконтуривает общую площадь поверхности разрушения и измеряет ее, после чего оконтуривает и измеряет площадь одного из дефектов (например, кристаллической составляющей). Измерение сопровождается цветовым индизированием оконтуренного участка. (Этот участок окрашен в белый цвет). На цифровом табло при этом появляется число, обозначающее площадь оконтуренного участка.

Последовательность количественной оценки дефектов, рассредоточенных по поверхности разрушения (например, «фасетки» камневидного излома ударных образцов катаной стали)

производится по той же методике и последовательности, что и при проведении этой оценки для литой стали.

Анализатор ПААИ применим для анализа фотоизображения, полученного на РЭМ. При этом на ПААИ можно измерять следующие параметры элементов структуры поверхности разрушения:

- кратчайшее расстояние между включениями или ямками для вязких участков;
- линейные размеры включений или ямок;
- площадь участков хрупкого или вязкого разрушения;
- площадь каждой ямки в отдельности для вязкого разрушения.

Анализатор ПААИ может быть применен и для измерения элементов строения голографических изображений изломов.

ГЛАВА 3

НАИБОЛЕЕ УПОТРЕБЛЯЕМЫЕ РЕАКТИВЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ХИМИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ТРАВЛЕНИЕМ

К черным металлам относится железо во всем многообразии его сплавов – в виде различных сталей и чугунов.

Для оценки работоспособности черных металлов и изделий из них необходимо получать информацию о макро и микростроении металла. При этом наиболее массовым методом контроля их структуры являются металлографические методы, позволяющие выявлять наличие различных по природе и строению фаз, их форму и размеры, количество, взаимное расположение, наличие металлических и неметаллических включений, наличие в структуре дефектов и т.д.

Приведены реактивы и режимы травления для химического и электрохимического выявления структуры сталей и чугунов, покрытий на сталях, электроискровой обработки стали, поверхностных упрочняющих слоев стали, сварных и паяных соединений, твердых сплавов на основе железа.

3.1 ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Таблица 3.1.1 Углеродистые и низколегированные стали

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макро- и микроструктуры углеродистых и низколегированных сталей в различном состоянии В малоуглеродистой стали выявляет границы зерен феррита, третичный цементит можно отличить от феррита. Возможно окрасить в желтоватый цвет аустенит, сорбит и троостит – в коричневый, при этом мартенсит не травится В термически обработанных сталях выявляет структуру перлита, сорбита и т.д. Карбиды не травятся	0,5 – 6 %- ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить обычным способом при комнатной температуре. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от природы и состояния металла и концентрации реактива. Для замедления травления в качестве растворителя рекомендуется применять амиловый спирт или глицерин При травлении закаленных углеродистых сталей рекомендуется применять амиловый спирт. Для установления разницы между аустенитом и мартенситом можно заменять спирт глицерином
Для выявления макроструктуры углеродистых и легированных сталей Хорошо выявляет неоднородность, возникшую при литье, сварке, поверхностной термической обработке и др, а также дефекты типа трещин и пузырей.	10 - 25 % - ный водный раствор азотной кислоты в воде	Травление проводить на холоде с помощью тампона для больших поверхностей или погружением 3-30 мин с последующей тщательной промывкой

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления макроструктуры углеродистых сталей. Хорошо выявляются дендриты, ликвационные участки, различные дефекты и макронесплошности	50 % - ный водный раствор соляной кислоты	Травить в нагретом до 60-80°C растворе 15 - 60 мин. В случае применения неразбавленной технической кислоты время травления сокращается. После травления макрошлиф необходимо нейтрализовать в теплом растворе соды, промыть и высушить. Для усиления контраста изучаемую поверхность полезно протереть мягкой резинкой
Для выявления микроструктуры углеродистых сталей. В отожженной аустенитной стали травятся границы зерен, в закаленных сталях выявляются иглы мартенсита. Аустенит имеет более темную окраску по сравнению с ферритом	Соляная кислота 10 - 50 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить при 70 – 80°C, продолжительность травления находится в пределах нескольких минут. Для замедления травления можно уменьшать количество кислоты либо заменять этиловый спирт изоамиловым
Для выявления макро- и микроструктуры сталей В результате травления феррит, цементит и аустенит остаются светлыми. В закаленной стали мартенсит окрашивается от светло-желтого до коричневого цвета (в зависимости от содержания углерода в стали). Реактив выявляет сегрегации фосфора: места, богатые фосфором, окрашиваются в первую очередь	Пикриновая кислота 2-5 г; этиловый спирт до 100 мл	Травить на холоде любым способом, Время травления зависит от природы и состояния сплава и достигает нескольких минут. Замедление травления достигается уменьшением количества кислоты или применением изоамилового спирта. Для выявления макроструктуры травить в горячем растворе основного состава с добавкой 8-10 капель соляной кислоты. При замене этилового спирта метиловым можно выявить общую сегрегационную неоднородность
Для различий в вязком и хрупком состояниях сталей, подверженных отпускной хрупкости Реактив выявляет границы прежнего аустенитного зерна	Эфир 200 мл; пикриновая кислота 25 г; вода 100 мл	Для приготовления реактива смешать воду с эфиром, затем добавить пикриновую кислоту. Смесь хорошо взболтать и выдержать 24 ч. Шлиф травить 5 минут, затем обработать 5 % - ным раствором целлюлозы в ацетоне. Образующаяся корка отделяется через 5-15 минут. При обработке спиртом целлюлозная пленка затвердевает и легче удаляется. Для выявления аустенитных зерен предлагается до травления данным реактивом предварительно нагреть шлиф до 300-600 С выдержать 8-12 ч, что повышает травимость зерен аустенита. Для выявления границ аустенитных зерен рекомендуется применять смесь из одного объема водного насыщенного раствора пикриновой кислоты и трех объемов монобутилового эфира этиленгликоля
Для выявления макро- и микроструктуры сталей. Реактив выявляет макронеднородность, образовавшуюся в результате отливки,ковки и др. Реактив окрашивает тростит в темный цвет, мартенсит и аустенит – в разные цвета, феррит и цементит не травятся. Также он выявляет границы аустенитных зерен в состоянии обратимой отпускной хрупкости	Насыщенный на холоде раствор пикриновой кислоты в воде	Макротравление проводить в несколько приемов 6-8 ч, затем шлиф промыть в струе воды и высушить. Затем поверхность слегка протереть тонкой наждачной бумагой и опять поместить в свежеприготовленный реактив. Такую операцию повторить до получения отчетливой макроструктуры. Для микротравления реактив составлять растворением кристаллической пикриновой кислоты в слегка нагретой воде до выпадения осадка кислоты после охлаждения. Продолжительность микротравления от одной до 10-15 минут. Если остается налет, то необходима легкая полировка шлифа (2-3 сек). Границы аустенитных зерен выявляет нагретый до 50°C насыщенный водный раствор пикриновой кислоты

Область применения	Состав травителя	Применение
Для определения структурных составляющих в завалянных сталях сорбит и троостит окрашиваются в коричневый цвет, мартенсит – голубой, аустенит –оранжеый. Хорошо выявляется неоднородность троостита в сталях с развитой ликвацией по углероду. В стали Гадфильда реактив окрашивает аустенит в серый цвет, феррит не травится	А. 4 % - ный раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте; Б. 4 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Шлиф травить сначала 2 с в растворе А, затем 10 с. В растворе Б. Стали Гадфильда сначала травить в растворе Б до 15-20 с, затем в растворе А до 2-5 минут
Для выявления микроструктуры закаленных сталей : троостит окрашивается в темнокоричневый цвет; мартенсит и аустенит не травятся. Выявляет неоднородность перлита в отожженной стали	А. 4 % - ный раствор азотной кислоты в уксусном ангидриде 10 мл; Б. Амиловый спирт 10 мл; этиловый спирт 10 мл; метиловый спирт 10 мл	Реактив составлять непосредственно перед употреблением из трех частей раствора Б и одной части раствора А. Время травления от 20 с до нескольких минут
Для выявления троостита и сорбита в термически обработанных сталях	А. 4 % - ный раствор азотной кислоты в уксусном ангидриде 30 мл; Б. метиловый спирт 20 мл; амиловый спирт 20 мл; бутиловый спирт 10 мл; этиловый спирт 20 мл	Реактив составлять свежей смесью из трех частей раствора А и семи частей раствора Б. Травить в течение нескольких минут
Для выявления структурных составляющих в термически обработанной стали. Сорбит, троостит и игольчатый мартенсит окрашиваются в различные цвета. Аустенит и карбиды имеют более светлый оттенок	А. Насыщенный раствор ортонитрофенола в этиловом спирте 10-30 мл; Б. 4 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте 10 мл	Для приготовления реактива растворы А и Б смешать в указанных количествах непосредственно перед употреблением; время травления до 10 минут. Раствор Б можно заменить равным количеством 20 % - ного раствора соляной кислоты в амиловом спирте. Травление производить при комнатной температуре. Вместо ортонитрофенола можно применять нитроанилин
Для выявления структуры углеродистых сталей.	А. 4 % - ный водный раствор желатины; Б. 3 % - ный водный раствор формалина; В. 3 % - ный раствор азотной кислоты	На поверхность слегка нагретого шлифа наносить тонкий слой раствора А, нагретого до 60°С, после сушки желатины шлиф погрузить шлифованной поверхностью вверх в реактив Б , где выдержать от 30 с до 2 мин, затем шлиф перенести в раствор В и после 0,5 - 2 мин травления сушить спиртом. Азотную кислоту можно заменить равным количеством соляной или пикриновой кислот
Для выявления микроструктуры углеродистой стали. Реактив выявляет границы аустенитных зерен в термически обработанных сталях	Соляная кислота 3-5 мл; пикриновая кислота 1-4 г; этиловый спирт 95-100 мл	Травить на холоде до 60 с
Для выявления цементита в углеродистой стали. После травления цементит становится темным, перлит окрашивается слабее. Нитриды не травятся	Красная кровяная соль 1 - 4 г; вода до 100 мл	Травить обычным способом в горячем свежем растворе. Время подбирать эмпирически

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры стали, содержащей карбидообразующие элементы. В результате травления цементит, троостит и сорбит темнеют; феррит, мартенсит и аустенит не травятся	Азотная кислота 25 мл; метиловый спирт 75 мл; нитробензол 80 мл	Шлиф травить погружением на 10-30 с. Образующую пленку стирать крепким водным раствором оксида натрия. Затем промыть шлиф водой или спиртом
Для выявления структуры углеродистых сталей. Феррит темнеет, цементит не травится	А. 15 % - ный раствор молибдата аммония в воде; Б. 5-10 % - ный раствор азотной кислоты в воде	Смесь равных объемов реактивов А и Б отстаивать несколько дней, затем – отфильтровать. Для получения травящего реактива смешать 0,5 – 2 мл этой смеси с 100 мл этилового спирта. Травить погружением на время от нескольких минут до 1,5 ч. в зависимости от природы металла и концентрации раствора. Затем шлиф промыть водой и высушить теплым воздухом. Вместо молибдата аммония можно применять ванадат или уранат аммония в том же количестве
Для выявления структурных составляющих в углеродистых сталях	2-6 % - ный раствор йода в этиловом спирте	Травить в холодном растворе 10 с и более. Шлиф промыть только спиртом
Для выявления микроструктуры сталей, особенно заэвтектоидных	Йод кристаллический 1,25 г; йодистый калий 1,25 г; вода 1.25 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить в холодном реактиве 0,5-2 мин. Образующийся на поверхности шлифа налет удалять водным раствором NaHSO_2 .
Для выявления макроструктуры сталей	Йод кристаллический 10 г; йодистый калий 20-30 г; вода 100 мл	Травить на холоде. Время травления 5 -10 с. Осажденные продукты травления удалять легкой полировкой
Для выявления общей структуры сталей, особенно перлита	Салициловая кислота 10 г; этиловый спирт 100 мл	Шлиф травить погружением или смачиванием тампоном при комнатной температуре несколько минут
Для выявления структуры сталей, особенно после термической обработки. Мартенсит травится раньше феррита, обогащенные кислородом участки травятся очень медленно	Хромовый ангидрид 10 г; едкий натр 50 г; вода 100 мл	Реактив составлять добавлением небольших порций едкого натра к раствору хромового ангидрида. Травить в кипящем реактиве 7-20 мин и более, затем промыть и сушить шлиф теплым воздухом
Для контрастного выявления микроструктуры закаленных и отпущенных сталей	Монохлоруксусная кислота 70 г; этиловый спирт 100 мл	Травить на холоде обычным способом. Время травления зависит от состава и структуры сталей и находится в пределах 3-10 мин
Для выявления макро- и микроструктуры углеродистых сталей, а также макропороки, сегрегацию фосфора (обогащенные зоны темнеют).	Соляная кислота 100 мл; хромовый ангидрид 40 г; хлористый никель 16 г; вода 100 мл	Хлористый никель добавлять к нагретому раствору соляной кислоты в воде; после охлаждения растворить хромовый ангидрид. Микрошлиф травить погружением на время до одной минуты с последующей промывкой. Макрошлиф.травить обычным способом
Для выявления дендритного и зернистого строения, двойников, линий деформации и ориентации кристаллов, ликвацию мышьяка в углеродистых и низколегированных сталях. Мартенсит, троостит и сорбит темнеют /100/	Едкий натр 40 г; нитрат натрия 15 г; вода 60 мл	Реактив является окрашивающим. Наилучшие результаты получают при использовании горячего или кипящего раствора. Можно применять также последовательное травление сначала в 4 % - ном спиртовом растворе азотной кислоты, а затем в указанном реактиве. Нитрат натрия можно заменить равным количеством нитрита натрия или 8 - 12 г бихромата натрия

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры	А. Хлор-амин Т 10 г; вода 100 мл; Б. Лимонная кислота 10 г; вода 100 мл	Раствор лимонной кислоты добавить к раствору хлорамина в соотношении 1:3. При перемешивании выпадает кристаллический осадок. Травить на полировальном круге, смоченном реактивом. После этого шлиф промыть, протереть от осадка и высушить. Травленный шлиф удобно изучать в косом освещении
Выявляет макроструктуру деформированных сталей	Соляная кислота 40 мл; хлорная медь 5 г; вода 30 мл; этиловый спирт 25 мл	Травить в холодном реактиве погружением или смачиванием тампоном. Время травления зависит от марки стали и составляет 20 - 25 мин
Для выявления макро- и микроструктуры сталей. Выявляется дендритное строение литой стали, ликвация фосфора. В незакаленной стали феррит окрашивается, перлит остается светлым. В закаленных сталях сорбит и троостит темнеют	Хлорная медь 10 г; хлористый магний 40 г; соляная кислота 20 мл; вода и этиловый спирт до 1000 мл	При составлении реактива сначала растворить все соли и кислоту в небольшом количестве воды (50 мл), затем долить спирта до 1000 мл раствора. Воды в реактиве должно быть порядка 20 - 25%. Хлористый магний возможно заменить на хлористую медь. Макротравление производить нанесением на шлиф тонкого слоя холодного реактива на 0,5-2 минут. Операцию повторять несколько раз в свежей порции реактива, затем шлиф промыть в горячей воде и в спирте и высушить. Осадок меди удалять аммиаком или легкой ручной полировкой
Для выявления макро- и микроструктуры сталей. В незакаленных сталях перлит почти не травится, феррит темнеет. В термически обработанных сталях троостит и сорбит темнеют, мартенсит не травится	Хлорное железо 30 г; соляная кислота 100 мл; хлорное олово 0,5 г; хлорная медь 10 г; Вода 1000 мл	При микротравлении шлиф погружать в свежий раствор на 10 - 120 с. Рекомендуется чередовать травление с легкой полировкой, причем каждый раз травить в свежем растворе. Воду можно наполовину заменить спиртом. При макротравлении травить рекомендуется нанесением на шлиф ваткой свежих порций реактива. При этом поверхность шлифа рекомендуется тщательно обрабатывать вплоть до ее полирования
Для макроструктуры углеродистых и легированных сталей	Серная кислота 5-20 мл; вода 100 мл	Травить в нагретом до 60 -70°C реактиве. Продолжительность травления до 2 ч и более (в холодном растворе – больше)
Для выявления дефектов в макроструктуре стали: крупные включения, сегрегацию, пористость и т.д.	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 мл; серная кислота 10 мл, вода 60 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре
Для выявления макроструктурной неоднородности малоуглеродистой стали, образовавшейся при литье и горячей обработке	Хлористоаммиачная медь 5-15 г; вода 100 мл	Участки, богатые фосфором, углеродом и, как правило, серой травятся сильнее. При более продолжительном травлении выявляется дендритная структура. Шлиф погрузить шлифованной поверхностью вверх в раствор на время до одной минуты, затем промыть в струе воды и одновременно удалить ваткой темный налет. Налет можно также удалять раствором аммиака. В процессе травления нужно следить, чтобы на поверхности шлифа не возникало пузырьков воздуха
Для выявления макроструктурной неоднородности и дендритной структуры, а также сегрегаций углерода и фосфора в углеродистых и низколегированных сталях	А. 4-6 % - ный раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте Б. 10-12 % - ный раствор хлористоаммиачной меди	Шлиф погрузить на несколько часов в раствор А, затем слегка протереть тонкой наждачной бумагой и травить раствором Б. Образующийся темный налет удалять раствором аммиака или протиранием тампоном

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления дендритной структуры углеродистых и легированных сталей	А. Хлористоаммиачная медь 8-12 г; вода 100 мл Б. Хлористоаммиачная медь 8-12 г; соляная кислота 3-5 мл; вода 100 мл	Шлиф поместить изучаемой поверхностью вверх в реактив А на 10-30 мин, затем перенести на 20-30 мин в реактив Б, затем шлиф снова травить реактивом Б 30 мин, при этом в реактив добавить 15 мл соляной кислоты. Реактив выявляет дендритную структуру
Для выявления дендритного и волокнистого строения, пористости, сегрегации примесей в углеродистых и малолегированных сталях	Соляная кислота 250 мл; серная кислота 35 мл; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре обычным способом. Время травления подбирать эмпирически в зависимости от состава стали
Для выявления макроструктуры сталей и сегрегации фосфора	Азотнокислый никель 40 г; хлорная медь 12 г; хлорное железо 48 г; вода 100 мл	Шлиф травить погружением на время до нескольких минут, затем промыть и высушить. Для сокращения времени травления можно в готовый раствор добавить 100 - 120 мл этилового спирта. На поверхности шлифа образуется осадок от красного до коричневого цвета, а обогащенные фосфором участки остаются светлыми
Для выявления дендритной структуры литых сталей	Сернокислая медь 1-2 г; вода 100 мл	Шлиф погрузить от 30 мин до нескольких часов в раствор, затем промыть водой и высушить теплым воздухом. Образовавшийся осадок меди выявляет дендритную структуру
Для выявления первичной структуры и сегрегации фосфора в литых сталях	Соляная кислота 80-100 мл; хлорное железо 80-200 г; хлорная медь 3-6 г; вода 1000 мл	Шлиф травить 2-5 мин, потом сошлифовать тонкой наждачной бумагой и опять травить 20-30 мин.
Для выявления макроструктуры (дендритного строения) стали	Серная кислота 60 мл; хромпик 25 г; Вода 500 мл	Травить окунанием при 20°C 10 – 30 мин, промыть холодной водой и высушить
Для выявления макроструктуры (дендритного строения) и микроструктуры (волокнистого строения) стали	10-15 % - ный водный раствор персульфата аммония	Травить при 70 -90°C. Для выявления структуры через каждые 3-5 минут протирать шлиф под струей воды ватным тампоном для снятия темного налета. Макрошлиф сушить фильтровальной бумагой и струей воздуха. После окончательной промывки и сушки для увеличения контрастности можно протравить еще другими растворами
Для выявления макроструктуры (дендритного строения) и несплошностей в сталях	Реактив Совера: соляная кислота 100 мл; серная кислота 200 мл; вода 300 мл	Травить в нагретом до 95°C реактиве 30 минут
Для выявления макроструктуры (дендритного строения, ликваций) и несплошностей в сталях	Реактив Кешиена: соляная кислота 500 мл; серная кислота 70 мл; вода 180 мл	Травить погружением в горячий (95 - 100°C) реактив от 30 минут до 2 часов, затем промыть водой и высушить
Для выявления макро - ликвационных неоднородностей в литых сталях	Реактив Фри: соляная кислота 40 мл; вода 30 мл; хлорная медь 5-30 г; спирт этиловый 25 мл	Травить в холодном или нагретом до 60°C реактиве; продолжительность травления 2 часа. Шлиф периодически протирать ватным тампоном
Для выявления макроструктуры (при чрезмерном росте зерна при рекристаллизации стали)	Надсернокислый аммоний 10 г; вода 90 мл	Травить при комнатной температуре протираaniem поверхности шлифа хлопчатобумажной тканью, пропитанной раствором

Таблица 3.1.2 Сложнолегированные стали

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры хромистых и хромоникелевых сталей	Хромовый ангидрид 3 г; серная кислота 25 мл; вода 75 мл	Для травления рекомендуются следующие режимы: при содержании хрома в стали %: 5, 7 - 20, 25 ; температура раствора : 30, 40, 100°C (соответственно); время травления: 20 с, 30 с, 3 - 4 мин (соответственно)
Для выявления структуры хромистых, вольфрамовых, ванадиевых, марганцовистых, кремнистых, молибденовых и других сложнолегированных сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20-30 мл; глицерин 20-30 мл	Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или пользоваться нагретым реактивом. Продолжительность травления в свежеприготовленном растворе составляет 10-40 с и более. Можно также применять многократное травление с переполировкой
Для выявления структуры хромистых, никелевых, кобальтовых, кремнистых, марганцовистых и других сложнолегированных сталей. Может быть использован для стали Гадфильда и быстрорежущих сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 мл; глицерин 20-30 мл; перекись водорода 10 мл	Смесь кислот выдержать сутки; перекись водорода и глицерин добавить перед употреблением. Для ускорения или замедления травления можно изменять количество соляной кислоты. Продолжительность травления в нагретом реактиве доходит до нескольких минут. Рекомендуется применять двух- трехразовое травление с переполировкой
Для выявления границ зерен хромистых, хромоникелевых, хромомарганцовистых, марганцовистых, марганцовованадиевых и других сталей, находящихся в состоянии отпускной хрупкости, даже если при комнатной температуре не наблюдается падения ударной вязкости	Пикриновая кислота 10 г; ксилол 100 мл; этиловый спирт 10 мл	Травить погружением изучаемой поверхностью шлифа вниз 10-60 мин. После травления шлиф можно слегка отполировать. Аналогичные результаты можно получить с применением водного раствора пикриновой кислоты или раствора глицерина с пикриновой кислотой
Для выявления микроструктуры хромистых, хромоникелевых, вольфрамовых сталей. Травятся карбиды хрома и цементит; сигма-фаза окрашивается в коричневый цвет, аустенит – в голубой или желтый, феррит окрашивается быстрее аустенита и приобретает цвет от желтого до коричневого. Для раздельного выявления карбидов в сложнолегированных сталях для выявления сигма-фазы (окрашивание) и интерметаллидов	Марганцовистый калий 4 г; едкий натр 1-4 гр; вода 100 мл	Травить в свежеприготовленном кипящем растворе 1-3 мин и более. При 20°C время травления увеличивается до 1 ч. Окрашивание сигма-фазы проводить в нагретом до 65 - 70°C растворе
Для выявления микроструктуры в закаленных и состаренных хромоникелевых и хромоникелькобальтовых сталях	Соляная кислота 100 мл; серная кислота 10 мл; сернокислая медь 20 г; перекись водорода 2 мл; вода 100 мл	Шлиф погрузить в свежий раствор на 30-50 с и затем промыть. Перекись водорода добавлять непосредственно перед употреблением

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макро- и микроструктуры жаропрочных сталей.	Соляная кислота 100 мл; серная кислота 50 мл; серноокислая медь 20 г; вода 100 мл	Травить в холодном растворе, допускается разбавление водой или спиртом. Для травления сложнолегированных сталей ферритного, полуферритного и аустенитного класса с повышенным содержанием кремния рекомендуется исключать из реактива воду и в 10 раз уменьшить количество серной кислоты При травлении макрошлифов при комнатной температуре шлиф слегка натирать ватным тампоном, смоченным в реактиве
Для выявления макро- и микроструктуры хромистых, никелевых, хромоникелевых, в т.ч. жаропрочных и нержавеющей сталей. Феррит травится сильнее, чем аустенит, цементит и другие карбиды. Мартенсит травится сильнее феррита. При макротравлении выявляется дендритная структура литой стали. Реактив можно применять для быстрой отсортировки автоматных сталей от обычных	Соляная кислота 120 мл; хлорная медь 90 г; вода 100 мл	При выявлении микроструктуры погрузить шлиф в холодный реактив или смачивать тампоном; время травления зависит от состава стали и качества поверхности шлифа и может достигать 25 мин. При выявлении микроструктуры реактив разбавить четырехкратным количеством воды. При кратковременном травлении хорошо выявляются границы . При отсортировке автоматных сталей реактив нанести на поверхность прутка, очищенную от загрязнений. На поверхности стали, не обогащенной серой пятно благодаря выделению меди окрашивается через 10-20 с в светло-красный цвет; на поверхности автоматной стали пятно окрашивается в темно красно-коричневый или в темно-коричневый цвет
Для выявления микроструктуры и опознавания ряда структурных составляющих в легированных сталях Выявляются карбиды и вольфрамы в вольфрамовых, хромовых и быстрорежущих сталях, окрашиваются карбиды хрома, вольфрама и ванадия, вольфрамы не травятся. Цементит окрашивается позже других карбидов в цвета от голубого до серого. Аустенит остается белым, сигма-фаза приобретает оттенок от радужного до темно-коричневого, феррит становится коричнево-желтым. В ниобиевых сталях фаза Fe ₂ Nb окрашивается в голубоватый цвет. В хромистых и хромомарганцовистых сталях сигма-фаза имеет светло-синий оттенок, феррит окрашивается в желтый цвет, карбиды- в темные цвета. В никелевых и молибденовых сталях феррит окрашивается в серый цвет. Реактив используется для окрашивающего травления хромоникелевых сталей с молибденом, вольфрамом, бором и титаном	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Реактив хранить в темной посуде и применять вскоре после приготовления. Состав не постоянен. Для выявления карбидов ванадия количество щелочи уменьшать. Для карбидов хрома – увеличивать количество красной кровяной соли. Для разделения феррита и сигма-фазы в хромоникелевых сталях уменьшить количество воды до 20 мл. При этом травление в горячем или кипящем растворе окрашивает сигма-фазу в цвет от радужного до темно-коричневого, феррит становится коричнево-желтым, карбиды не травятся. Холодный раствор применять для травления перлита углеродистых сталей. Нитриды не травятся. Нагретый реактив с меньшим количеством воды использовать для окрашивающего травления хромоникелевых сталей с молибденом, вольфрамом, бором и титаном. В нагретом до 65 – 75°C реактиве (время травления 4-10 с) выявляются интерметаллиды, феррит и сигма-фаза; карбиды не травятся

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для идентификации альфа - и эпсилон мартенсита и других структурных составляющих марганцовохромистых сталей	Гипосульфит 30 г; пироксернистоокислый калий 10 г; уксусная кислота 5 мл; вода 100 мл	Травить на холоде обычным способом
Для выявления микроструктуры и границ зерен высоколегированных и нержавеющей сталей аустенитного класса, термически обработанных быстрорежущих сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 30 мл	Реактив готовить за 24 ч до применения. Шлиф травить погружением или натиранием тампоном 5 – 60 с и более
Для выявления микроструктуры аустенитных сталей и особенно для хромоникелевых сталей с карбидообразующими элементами	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 100 мл; вода 100 мл	Травить в кипящем или нагретом реактиве. Для получения лучших результатов рекомендуется применять двух - трехкратную полировку
Для выявления макро- и микроструктуры никелевых, кремнистых, хромистых, хромоникелевых сталей	Персульфат аммония 1-15 г; вода 100 мл	Для выявления микроструктуры: Травить в холодном или слегка нагретом свежеприготовленном реактиве 5 - 20 с и более. Воду можно заменить равным количеством спирта. Рекомендуется травить шлиф от 0,5 до 5 минут в указанном реактиве с промежуточной переполровкой, причем подогретый раствор применять только один раз. Для выявления макроструктуры шлиф травить в 15 % - ном растворе двумя способами: по первому способу нагретый макрошлиф травить в горячем (70 – 90°С) реактиве, причем через каждые 3 - 5 мин ваткой под струей воды снимать образующийся на поверхности шлифа темный налет. Эту операцию повторять несколько раз. После окончательной промывки и сушки шлиф для увеличения контрастности протравить 1-2 мин в 5 % - ном растворе азотной кислоты с последующим удалением налета или протиркой тонкой наждачной бумагой. Последней операцией является однократное травление в холодном растворе персульфата аммония с последующим удалением налета и сушкой. По второму способу: макрошлиф травить 2,5 - 10 мин в холодном реактиве. После снятия темного налета и промывки шлиф травить 1 - 2 мин в 10 % - ном растворе азотной кислоты. Затем окончательно промыть, высушить
Для выявления микроструктуры железобольфрамных и молибденовых сталей. В первых выявляются карбиды вольфрама и сложные железобольфрамные карбиды, во вторых – выявляются сначала молибденит (за одну минуту), затем карбиды молибдена (3 -5 мин)	3 % - ный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натра 10 - 20 мл	Реактив применять только свежеприготовленным, Реактив можно использовать в холодном и нагретом состояниях. Образующиеся при травлении пузырьки газа нужно периодически удалять

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для цветной идентификации элементов микроструктуры в сложнолегированных сталях. В вольфрамовых сталях вольфраматы и карбиды железа и сложные карбиды типа Fe_2W_2C окрашиваются; простые карбиды типа WC и феррит не травятся. Карбид железа окрашивается позже остальных, что позволяет отличать его от карбидов вольфрама и хрома. В сталях типа хромансиль феррит окрашивается в различные цвета побежалости, перлит, сорбит, троостит окрашиваются в серый цвет, мартенсит приобретает оттенки от желто-коричневого до темно-серого	Пикриновая кислота 2-5 г; едкий натр 20-25 г; вода 75-100 мл	Пикриновую кислоту растворить в заранее приготовленном растворе едкого натра в половинном количестве воды. В полученный раствор, нагретый на водяной бане, добавить остальное количество воды до растворения всего осадка. Реактив не должен кипеть, чтобы не менялся его состав. Приготовленный реактив следует хранить в темной герметичной посуде. Стали типа хромансиль для окрашивания структурных составляющих травить в кипящем растворе от 1 до 200 мин
Для выявления микроструктуры мартенситных и ферритных нержавеющих и жаропрочных сталей. Феррит и карбиды реактив травит слабо. Выявляются границы аустенитных зерен в термически обработанных легированных сталях, содержащих марганец, кремний, молибден, хром, вольфрам, никель	Соляная кислота 3 - 5 мл; пикриновая кислота 1 - 4 г; этиловый спирт 95-100 мл	Травить на холоде до 60 с. Иногда рекомендуется многократное травление от 2 до 10 минут с переполировкой. Соляную кислоту можно заменить азотной, при этом время травления следует сократить. При травлении сталей, содержащих большое количество легирующих элементов концентрацию кислот можно увеличить
Для выявления макро- и микроструктуры легированных сталей / При травлении троостит темнеет, мартенсит и аустенит окрашиваются в разные цвета, феррит и цементит не травятся. Хорошо выявляется микроструктура марганцовистых, кремнистых, хромистых, хромомолибденовых и аустенитных никелевых сталей, несколько хуже – мартенситных никелевых и хромоникелевых сталей. Выявляются также границы аустенитных зерен сталей в состоянии обратной отпускной хрупкости. Реактив выявляет макронеоднородность стали, образовавшуюся в результате отливки,ковки и другой горячей обработки	Насыщенный на холоду раствор пикриновой кислоты в воде	Реактив составлять растворением кристаллической пикриновой кислоты в слегка нагретой воде до выпадения осадка кислоты после охлаждения. Продолжительность травления микрошлифов от одного до 10-15 мин. Налет на шлифе удалять легкой полировкой. Макротравление проводить в несколько приемов 6 – 8 ч, после чего шлиф промыть в струе воды и высушить. Затем поверхность слегка протереть тонкой наждачной бумагой и опять поместить в свежеприготовленный реактив. Такую операцию повторять до получения отчетливой макроструктуры

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры закаленных легированных сталей. При этом мартенсит окрашивается в более темный цвет, чем аустенит	Метанитробензосульфоновая кислота 5 мл; этиловый спирт 95 мл	Травление проводить в свежем реактиве при комнатной температуре 15-30 с. Этиловый спирт можно заменить изоамиловым
Для выявления микроструктуры хромистых, хромокремнистых и хромоникелевых сталей	Серная кислота 8,5 мл; азотная кислота 5,5 мл; вода до 100 мл	Шлиф травить при комнатной температуре погружением на 3-5 мин. Для хромистых сталей в реактиве увеличить содержание серной кислоты и травить при 50-60°C
Для выявления границ зерен и карбидные фазы в закаленных и состаренных хромоникелевых и хромоникелькобальтовых сталях	Соляная кислота 100 мл; серная кислота 10 мл; сернокислая медь 20 г; перекись водорода 2 мл; вода 100 мл	Шлиф погрузить в свежий реактив на 30 - 50 с и затем промыть. Перекись водорода добавлять непосредственно перед употреблением
Для выявления и идентификации элементов микроструктуры хромистых, хромоникелевых, вольфрамовых сталей. Выявляются карбиды хрома и цементит, сигма-фаза окрашивается в коричневый цвет, аустенит – в голубой или желтый, феррит окрашивается быстрее аустенита и приобретает цвет от желтого до коричневого. Реактив применяется для раздельного выявления карбидов в сложнолегированных сталях	Марганцовокислый калий 4г; едкий натр 1-4 г; вода 100 мл	Травить в свежеприготовленном кипящем реактиве 1-3 мин и более. При травлении при комнатной температуре время травления увеличивается до одного часа. Окрашивающее травление сложнолегированных сталей рекомендуется проводить в нагретом до 65-70°C реактиве

Таблица 3.1.3 Быстрорежущие стали

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры сложнолегированных быстрорежущих сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 – 30 мл; глицерин 20-30 мл	Травить в свежеприготовленном реактиве 10-40 с и более. Можно применять многократное травление с переполнками. Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или пользоваться нагретым реактивом
Для выявления микроструктуры быстрорежущей стали	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 мл; глицерин 20-30 мл; перекись водорода 10 мл	Смесь кислот выдерживать сутки, перекись водорода и глицерин добавлять перед употреблением. Для ускорения или замедления травления можно изменять количество соляной кислоты. Продолжительность травления в нагретом реактиве доходит до нескольких минут. Можно применять двух - трехразовое травление с переполнками
Для цветного идентификации структурных составляющих в быстрорежущей стали	Бензольный ангидрид 6г; едкий натр 20 г; вода 100 мл	Травить погружением в кипящем реактиве 10-20 мин. Реактив окрашивает зернистый перлит сильнее пластинчатого, вольфраמיד железа темнеет через 2 - 5 мин; цементит темнеет через 30 – 45 мин, остальные карбиды не окрашиваются

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для цветного идентификации структурных составляющих в быстрорежущих сталях. Выявляются карбиды хрома и цементит, сигма-фаза окрашивается в коричневый цвет, аустенит – в голубой или желтый, феррит окрашивается быстрее аустенита и приобретает цвет от желтого до коричневого	Марганцовистокислый калий 4 г; едкий натр 1 - 4 г; вода 100 мл	Травить в свежеприготовленном кипящем реактиве одну – три минуты и более. При 20°C время травления увеличивается до 1 ч
Для выявления макро- и микроструктуры быстрорежущих сталей после термической обработки	<i>Для микроструктуры:</i> соляная кислота 20 мл; хлорная медь 1 г; вода 15 мл; этиловый спирт 65 мл <i>Для макроструктуры:</i> соляная кислота 50 мл; хлорная медь 1 г; вода 100 мл; этиловый спирт 50 мл	Для микроструктуры: травить погружением или смачиванием тампоном 20-30 с в холодном реактиве. Затем шлиф осторожно промыть спиртом и высушить. Макроструктуру реактив травит весьма контрастно и рекомендуется для хорошо отполированных шлифов
Для выявления микроструктуры быстрорежущих сталей (цветное окрашивание). Окрашиваются карбиды хрома, вольфрама и ванадия, вольфраматы не травятся. Цементит окрашивается позже других карбидов в цвета от голубого до серого	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Реактив хранить в темной посуде и использовать вскоре после приготовления. Состав реактива не постоянен; для выявления карбидов ванадия количество щелочи уменьшают, для карбида хрома увеличивают количество красной кровяной соли
Для выявления микроструктуры быстрорежущих сталей: карбид вольфрама темнеет, цементит не травится	3 % - ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натра 10 -20 мл	Реактив применять только свежеприготовленным. Он пригоден только для однократного употребления. Травить на холоде 3-5 минут и более. Может быть использован и в горячем состоянии. Образующиеся при травлении пузырьки газа надо периодически удалять тампоном
Для выявления структуры быстрорежущих сталей	10 % - ный раствор едкого натра в воде	Травить на холоде с добавкой перекиси водорода. Вместо перекиси водорода можно употреблять газообразный кислород Раствор едкого натра можно заменять раствором едкого калия
Для выявления границ зерен в термически обработанных быстрорежущих сталях	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 25 мл; вода 200 мл	Применять попеременное травление 10 и более минут, чередуя со слабыми полировками. Воду можно заменить этиловым или метиловым спиртом
Для выявления в быстрорежущей стали карбидной фазы и границ аустенитных зерен	5 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить при комнатной температуре. Продолжительность травления несколько минут в зависимости от состава стали

Таблица 3.1.4 Нержавеющие стали

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры нержавеющей сталей	Азотная кислота 10-20 мл; плавиковая кислота 10-20 мл; глицерин 20-60 мл	Травить смесью равных объемов плавиковой и азотной кислот, разбавленной глицерином. Время травления на холоде до 5 минут
Для выявления микроструктуры нержавеющей сталей	Уксусная кислота 100 мл; перекись водорода 0,5 мл; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре погружением от 0,5 до 3 минут и более. Перекись водорода добавлять перед употреблением
Для выявления микроструктуры нержавеющей богатых никелем и кобальтом сталей	Азотная кислота 20 мл; уксусная кислота 30 мл	Травить при комнатной температуре свежеприготовленным реактивом одну минуту и более
Для испытания нержавеющей сталей на интеркристаллическую коррозию	Серная кислота 25 мл; сернокислая медь 6 г; вода 500 мл	Травить в горячем растворе несколько часов
Для выявления микроструктуры нержавеющей сталей	Насыщенный раствор хлорного железа в соляной кислоте с небольшим количеством азотной кислоты	Травить при комнатной температуре. Время травления подбирать эмпирически в зависимости от химического состава
Для выявления микроструктуры нержавеющей сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20-30 мл; глицерин 20-30 мл	Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или применять нагретый реактив. Продолжительность травления в свежеприготовленном реактиве составляет 10-40 с и более. Можно применять многократное травление с переполировкой
Для выявления микроструктуры нержавеющей хромоникелевых сталей	Хромовый ангидрид 10 г; соляная кислота 1 мл; вода 100 мл	Соляную кислоту добавлять перед употреблением. Травление проводить обычным способом; можно чередовать с полировками
Для выявления микроструктуры нержавеющей сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 мл; глицерин 20-30 мл; перекись водорода 10 мл	Смесь кислот выдержать сутки; перекись водорода и глицерин добавлять перед употреблением. Для ускорения или замедления травления можно изменять количество соляной кислоты. Продолжительность травления в нагретом реактиве доходит до нескольких минут. Можно применять двух - трехразовое травление с переполировками
Для выявления карбидов и других выделений по границам зерен в нержавеющей аустенитных сталях, а также для выявления зон, обедненных	Хлорная кислота 100 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл	Травить погружением на 15 мин и более в нагретый реактив до появления белого дыма, затем шлиф следует промыть теплой водой, спиртом и высушить
Для выявления микроструктуры нержавеющей сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 30 мл; плавиковая кислота 10 мл; уксусная кислота 20 мл	Травить в нагретом до 40°C реактиве три минуты. Реактив перед употреблением выдержать сутки
Для выявления микроструктуры нержавеющей сталей	Соляная кислота 100 мл; азотнокислая ртуть 7г; вода 100 мл	Травить на холоде несколько минут. При составлении реактив можно подогреть
Для выявления микроструктуры хромистых, хромоникелевых нержавеющей сталей	Серная кислота 8,5 мл; азотная кислота 5,5 мл; вода до 100 мл	Шлиф погрузить на 3 - 5 мин в реактив при комнатной температуре, далее промыть и высушить. При травлении хромистых нержавеющей сталей добавить в реактив серную кислоту и травить с нагревом до 50 - 60°C.

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры нержавеющей сталей с никелем, хромом, кобальтом	Соляная кислота 100 мл; серноокислая медь 20 г; вода 100 мл	Травить погружением на 1 -2 мин с последующей промывкой водой и спиртом. Можно применять многократное травление с промежуточными полировками, особенно для хромистых сталей. Можно использовать нагретый до 50 -70°C реактив, воду частично заменить спиртом
Для выявления макро- и микроструктуры нержавеющей сталей	Соляная кислота 100 мл; хлорная медь 5 г; вода 100 мл; этиловый спирт 100 мл	Реактив применять в холодном или нагретом до 40-50°C состоянии, время травления от 0,5 до 1 минут и более. При кратковременном травлении хорошо выявляются границы зерен. Для травления макрошлифов рекомендуется следующий состав: соляная кислота 30 мл; хлорная медь 1,5 г; вода 95 мл; этиловый спирт 30 мл. Шлиф погружать в холодный реактив или смачивать тампоном. Время травления зависит от состава и состояния стали и может составлять 20-25 минут. При необходимости удаления осадка меди шлиф необходимо промыть слабым раствором аммиака.
Для выявления макроструктуры нержавеющей сталей ферритного и аустенитного класса	Соляная кислота 100 мл; азотная кислота 10 мл; двуххромовокислый калий 25 г; вода 100 мл	Шлиф травить в нагретом до 60 -70°C реактиве в свинцовой ванне под вытяжкой 30-60 минут
Для выявления макро- и микроструктуры нержавеющей сталей аустенитного и ферритного классов. Выявляются границы зерен, ликвация, карбиды и другие элементы структуры. Зерна феррита и аустенита окрашиваются в цвета разных оттенков и интенсивности. В литых сталях выявляется дендритное строение /88\	Хлорное железо 1 – 25 г; соляная кислота 1 -50 мл; вода 100 -120 мл	Травить протиранием шлифа тампоном 10 - 60 с. Макротравление рекомендуется проводить в реактиве состава хлорного железа 2,5 г; соляной кислоты 2,5 мл; воды 1000 мл
Для выявления микроструктуры хромоникелевых нержавеющей сталей	Персульфат аммония 1 -15 г; вода до 100 мл	Травить в свежеприготовленном холодном или слегка подогретом реактиве 5-20 с и более. При повышенной температуре реактива (свыше 35°C) получается пятнистая поверхность. Рекомендуется применять промежуточные переполировки, причем слегка подогретый раствор используют только один раз
Для выявления макроструктуры литых нержавеющей сталей	Плавиковая кислота 1 -5 мл; азотная кислота 1 -5 мл; вода 98 -90 мл	Травить в нагретом до 60-70°C реактиве несколько часов
Для выявления микроструктуры (в т.ч. границ зерен и дисперсных выделений второй фазы) высоколегированных нержавеющей сталей аустенитного класса	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 30 мл	Реактив готовить за 24 ч. до применения Травить погружением или натиранием тампоном 5 -60 с и более

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры мартенситных и ферритных нержавеющих сталей. Феррит и карбиды травятся слабо. Хорошо выявляются границы аустенитных зерен	Соляная кислота 3 -5 мл; пикриновая кислота 1 -4 г; этиловый спирт 95 -100 мл	Травить на холоде окутанием или натиранием тампоном 60 с, далее промыть этиловым спиртом и высушить
Для выявления структурных составляющих в т.ч. цветного индифицирования В отожженной аустенитной стали при нагреве в окислительной атмосфере (на воздухе) выявляются границы зерен, в закаленных сталях - иглы мартенсита. Аустенит приобретает более темную окраску по сравнению с ферритом	Соляная кислота 10 -50 мл; этиловый спирт 90 -50 мл	Травить в подогретом до 70 - 80°C реактиве продолжительностью несколько минут. Для замедления травления можно уменьшить количество кислоты или заменить этиловый спирт изоамиловым
Для выявления сульфидов в нержавеющих	А Хлористый свинец 0,5 г; соляная кислота 3 мл; вода 100 мл Б.Соляная кислота 100 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл	В реактив А добавить несколько капель смачивающего вещества. Перед погружением в реактив А образец предварительно травить в реактиве Б. В результате травления поверхность шлифа покрывается тонким черным налетом свинца, на фоне которого видны сульфиды (серебристые блестки)
Для выявления нитридов и карбидов в нержавеющих сталях типа нимоник. При этом нитриды окрашиваются в желтый, карбиды – в серый цвет	Соляная кислота 20 мл; метабисульфит калия до 1 г; фтористый аммоний 2,4 г; вода 100 мл	Реактив использовать после добавления метабисульфита калия в количестве 0,1 – 1 г на 100 мл реактива в зависимости от состава стали: чем больше никеля, тем больше нужно добавлять метабисульфита калия. В результате травления на поверхности шлифа появляется тонкий налет сульфидов, выявляющий границы между зернами и окрашивающий нитриды в желтый цвет. При выявлении карбидов воды в реактиве должно быть 600 - 800 мл. В этом случае карбиды приобретают серый цвет
Для выявления микроструктуры аустенитных сталей	Соляная кислота 30 мл; азотная кислота 100 мл	Травить погружением или протиранием тампоном в теплом реактиве, Реактив перед употреблением выдержать сутки
Для выявления микроструктуры аустенитных сталей	Реактив Крупа: соляная кислота 500 мл; азотная кислота 50 мл; хромпик 125 г; вода 500 мл;	Травить погружением в реактив, нагретый до 40 -70°C.
Для выявления макроструктуры аустенитных (нержавеющих) сталей	Соляная кислота 500 мл; серная кислота 25 мл; медный купорос 100 г; вода 200 мл	Травить погружением в реактив при комнатной температуре. Перед травлением шлиф полировать, затем промыть водой и высушить струей воздуха

Таблица 3.1.5 Вольфрамовые стали

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления вольфрамида железа и железовольфрамовых карбидов	Нейтральный раствор пикрата натрия	Реактив готовить добавлением насыщенного водного раствора пикриновой кислоты к концентрированному раствору едкого натра. Отфильтрованный осадок высушить на воздухе осторожно ввиду его взрывоопасности. Осадок следует несколько раз промыть дистиллированной водой для выщелачивания и 2-3 раза перекристаллизовать. Нейтральность раствора контролировать лакмусовой бумагой. Вольфрамид железа выявляется за одну минуту травления, а железовольфрамовый карбид за 8-10 минут
Для выявления вольфрамовой эвтектики При травлении эвтектика темнеет. В вольфрамовых сталях вольфрамыды и карбиды железа, сложные карбиды типа Fe_2W_2C окрашиваются, простые карбиды типа WC и феррит не травятся. Карбид железа окрашивается позже остальных, что позволяет отличить его от карбидов вольфрама и хрома	Пикриновая кислота 2-5 г; едкий натр 20-25 г; вода 75-100 мл	Пикриновую кислоту растворить в заранее приготовленном растворе едкого натра в половинном количестве воды. В полученный раствор, нагретый на водяной бане, добавить остальное количество воды до растворения всего осадка. Раствор не должен кипеть, чтобы не менялся состав. Приготовленный реактив хранить в темной герметичной посуде, он должен иметь щелочную реакцию
Для выявления карбидов вольфрама и вольфрамовидов железа	Раствор едкого натра в воде с добавкой перекиси водорода	Для выявления карбидов вольфрама травить: в 10 % - ном холодном реактиве с добавкой раствора перекиси водорода 30 мин;_ в кипящем реактиве травить в реактиве без перекиси водорода 30 мин. Для выявления вольфрамовидов железа травить: в холодном реактиве с добавкой перекиси водорода 1 - 5 мин; в кипящем реактиве - без перекиси водорода 1 мин. Вместо едкого натра можно добавлять едкий калий
Для выявления макро- и микроструктуры (дендритной структуры, общего характера кристаллизации, границ зерен, ликвации и карбидов). Зерна феррита и аустенита окрашиваются в цвета разных оттенков и интенсивности	Хлорное железо 1-25 г; соляная кислота 1-50 мл; вода 100-120 мл	Варианты состава реактива многообразны, зависят от цели исследования и состава стали. Травить протиранием поверхности шлифа тампоном 10-60 с. Для сокращения времени травления употреблять более концентрированные растворы
Для выявления и идентификации структурных составляющих в стали. Выявляются сложные железовольфрамовые карбиды и карбиды вольфрама	3 % - ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натра 10 -20 мл	Реактив применять только свежеприготовленным. При травлении на холоде (до 3-5 и более минут) травятся и окрашиваются в темный цвет вольфрамыды железа. При травлении вольфрамовых сталей в нагретом реактиве время травления составляет несколько секунд

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры и идентификации некоторых структурных составляющих в вольфрамовых сталях. Карбиды окрашиваются, вольфраматы не травятся. Цементит окрашивается позже других карбидов в цвета от голубого до серого. Аустенит остается белым, сигма-фаза приобретает оттенок от радужного до темно-коричневого. Феррит остается коричневато-желтым. В сталях систем железо- карбид вольфрама травятся все карбиды, оставляя светлым фон твердого раствора, структуру которого можно выявить раствором пикриновой кислоты	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г вода 100 мл	Реактив хранить в темной посуде и использовать сразу после приготовления. При травлении в холодном или горячем (60 – 80°C) в свежеприготовленном реактиве 1,5 -10 минут выявляются карбиды и вольфраматы. Карбиды вольфрама окрашиваются, вольфраматы не травятся Рекомендуется распознавать карбиды не по окраске, а по времени выявления данным реактивом
Для выявления границ аустенитных зерен в термически обработанных вольфрамовых сталях	Соляная кислота 3-5 мл; пикриновая кислота 1-4 г; этиловый спирт 95-100 мл	Травить на холоде до 60 с. Рекомендуется многократное травление 2 -10 мин с переполровкой. После 15 мин отпуска при 200 -250°C структура выявляется контрастнее. Соляную кислоту можно заменить азотной. При этом время травления сокращается. При травлении сталей, содержащих большое количество вольфрама, концентрацию кислот можно увеличить
Для выявления микроструктуры вольфрамовых сталей	Марганцовокислый калий 4 г; едкий натр 1 - 4 г; вода 100 мл	Травить в свежеприготовленном кипящем растворе от одной до трех минут и более. При комнатной температуре время травления увеличивается до одного часа. Реактив можно применять для отдельного выявления карбидов в сложнелегированных вольфрамовых сталях

Таблица 3.1.6 Кренистые стали

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры сталей	Соляная кислота 10-50 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить погружением 70 - 80°C. Продолжительность травления в пределах нескольких секунд. Для замедления травления можно уменьшить количество кислоты или заменить этиловый спирт изоамиловым
Для выявления дендритной макроструктуры и зеренной микроструктуры; окрашивает обогащенные кремнием участки в малоуглеродистых кренистых сталях	А. Насыщенный спиртовой раствор йода; Б. Пикриновая кислота 4 - 6 г; этиловый спирт 100 мл	Травить несколько секунд в 1,5 % - ном растворе А, слегка очистить тампоном и на 40 -60 с перенести в раствор Б. Для увеличения контраста после травления шлиф слегка полировать. Обогащенные кремнием участки окрашивает раствор А

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления феррита в высококремнистых сталях	Насыщенный водный раствор хлорного железа 5 мл; 4 % - ный водный раствор соляной кислоты 30 мл; этиловый спирт 30 мл; амиловый спирт 30 мл	Травить при комнатной температуре 20 - 60 с. При этом феррит окрашивается в темно-серый цвет
Для выявления макро- и микроструктуры системы железо – углерод – кремний	Азотная кислота 40 мл; соляная кислота 60 мл; насыщенный водный раствор двухлористого железа 200 мл; вода 100 мл	Реактив составлять добавлением нагретой смеси кислот в раствор двухлористого железа, нагретый до 40 - 50°C. Воду добавлять непосредственно перед употреблением. Для снятия образующейся на поверхности шлифа пленки оксида кремния рекомендуется 10 % - ный раствор хлористого аммония в воде. Реактив травит четко, процесс легко управляется
Для выявления микроструктуры высококремнистых сталей	Азотная кислота 20 мл; уксусная кислота 30 мл	Травить погружением в свежеприготовленный реактив при комнатной температуре. Время травления более одной минуты
Для выявления структуры кремнистых сложнолегированных сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 мл; глицерин 20-30 мл; перекись водорода 10 мл	Смесь кислот выдержать сутки. Перекись водорода и глицерин добавить перед употреблением. Для ускорения или замедления травления можно изменять количество соляной кислоты. Травить в нагретом реактиве несколько минут. Можно применять двух - трехразовое травление с переполировкой
Для выявления структуры в т.ч. эвтектических выделений (ячеек) в простых и сложнолегированных кремнистых сталях высокой чистоты	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20- 30 мл; глицерин 20-30 мл	Шлиф до травления подогреть в горячей воде или использовать нагретый реактив. Травить погружением. Продолжительность травления в свежеприготовленном реактиве 10 -40 с и более. Можно также применять многократное травление с переполировкой
Для выявления макро- и микроструктуры сложнолегированных кремнистых сталей (с повышенным содержанием кремния) ферритного, полуферритного и аустенитного классов	Соляная кислота 100 мл; серная кислота 5 мл; серноокислая медь 20 г	Травить при комнатной температуре натиранием ватным тампоном, смоченным в реактиве
Для дифференцирования структурных составляющих в углеродистых кремниевых сталях. При травлении участки, обогащенные кремнием остаются светлыми	10 % - ный раствор йода в этиловом спирте	Травить 5 -15 мин в холодном реактиве, шлиф промывать только спиртом. Для выявления общей структуры шлиф вторично протравить раствором пикриновой кислоты

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макро- и микроструктуры кремнистых сталей	Персульфат аммония 1-15 г; вода 100 мл	На микроструктуру травить в холодном или слегка нагретом свежеприготовленном реактиве 5 -20 с и более. При повышении температуры реактива выше 35°C образуется пятнистая поверхность. Рекомендуется применять промежуточную переполіровку. Подогретый реактив использовать только один раз. На макроструктуру травить в 15 % - ном растворе .персульфата аммония /5/ в горячем (70 -90°C), причем через каждые 3 -5 мин ваткой под струей воды снимать образующийся на поверхности макрошлифа темный налет. Эту операцию нужно повторять несколько раз до выявления макроструктуры. После окончательной промывки и сушки для увеличения контрастности шлиф можно протравить от одной до двух минут в 5 % - ном растворе азотной кислоты с последующим удалением налета или протереть тонкой наждачной бумагой. Последней операцией является однократное травление в холодном растворе персульфата аммония с последующим удалением налета и сушки
Для выявления микроструктуры кремнистых сталей	Плавиковая кислота 10 мл; азотная кислота 10 мл; вода 10 мл	Травить при комнатной температуре десятки секунд, затем промыть водой и высушить
Для выявления внутрикристаллической ликвации кремния в кремнистых сталях	Нейтральный раствор пикрата натрия	Реактив готовить добавлением насыщенного водного раствора пикриновой кислоты к концентрированному раствору едкого натра. Отфильтрованный осадок высушить на воздухе осторожно, так как он взрывоопасен. Соль рекомендуется несколько раз промыть дистиллированной водой для выщелачивания и 2 - 3 раза перекристаллизовать. Шлиф поместить в нагретый до 60°C реактив на 2 -60 мин. Чем больше кремния в стали, тем меньше продолжительность травления. Для малокремнистых сталей можно повышать концентрацию пикриновой кислоты. Перлит травится интенсивнее феррита
Для контрастного выявления субструктуры кремнистой стали, также выявляет макроструктуру литых сталей	Пикриновая кислота 2-5 г; едкий натр 20 -25 г; вода 75 -100 мл	Пикриновую кислоту растворить в заранее приготовленном растворе едкого натра в половинном количестве воды. Полученный раствор нагреть на водяной бане и добавить остальное количество воды до растворения всего осадка. Раствор не должен кипеть, чтобы не менялся его состав. Приготовленный реактив хранить в темной герметичной посуде, и он должен иметь щелочную реакцию. Травить с подогревом несколько минут. Эвтектические участки структуры окрашиваются
Для выявления границ зерен в термически обработанных низко- и среднелегированных кремнистых сталях	Соляная кислота 3-5 мл; пикриновая кислота 1 -4 г; этиловый спирт 95-100 мл	Травить на холоде 60 с. Рекомендуется многократное травление от двух до десяти минут с переполіровкой. После 15 мин отпуска при 200 -250°C структура выявляется контрастнее

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления макро- и идентификации элементов микроструктуры и в т.ч. границ зерен кремнистых сталей. После травления троостит темнеет, мартенсит и аустенит окрашиваются в различные цвета. Феррит и цементит не травятся	Насыщенный на холоде раствор пикриновой кислоты в воде.	Реактив составлять растворением кристаллической пикриновой кислоты в слегка нагретой воде до выпадения осадка после охлаждения. Травить на холоде от одной до 10 -15 минут Если остается налет, необходима легкая полировка. Границы аустенитных зерен выявлять в нагретом до 50°С реактиве. Макротравление проводить в несколько приемов 6 -8 ч, после шлиф промыть и высушить затем поверхность шлифа слегка протереть тонкой наждачной бумагой и опять травить в свежеприготовленном реактиве. Такую операцию повторять до получения отчетливой микроструктуры

Таблица 3.1.7 Марганцовистые стали

Область применения	Состав травителя	Применение
Для идентификации структурных составляющих в отожженных сталях, содержащих марганец. Троостит окрашивается в темнокоричневый цвет, мартенсит и аустенит не травятся, выявляется неоднородность	А. 4 % - ный раствор азотной кислоты в уксусном ангидриде 10 мл; Б. Амиловый спирт 10 мл; этиловый спирт 10 мл; метиловый спирт 10 мл	Реактив составляют непосредственно перед употреблением из трех частей раствора Б и одной части раствора А. Травить на холоде. Время травления от 20 с до нескольких минут
Для идентификации структурных составляющих в углеродистых сталях, содержащих марганец	Раствор йода в этиловом спирте	Травить на холоде в 2 -6 % - ном растворе 10 с и более. Шлиф промывать только спиртом. Зоны феррита с повышенным количеством марганца травятся сильнее, чем обедненные
Для выявления границ зерен аустенита в термически обработанных (закаленных) марганцовистых сталях	Насыщенный водный раствор пикриновой кислоты 100 мл; алкисульфат натрия 0,5 -2 г	Травить погружением при комнатной температуре несколько раз по 2 - 20 мин с промежуточными легкими переполіровками. При нагреве реактива до 50 -60°С продолжительность травления сокращается до 1 -4 минут. Рыхлый слой оксидов на поверхности шлифа после непрерывного травления удалять ватным тампоном
Для выявления и идентификации альфа- и эpsilon-мартенсита в марганцовохромистых сталях	Гипосульфит 30 г; пироксернистокислый калий 10 г; уксусная кислота 5 мл; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре обычным способом
Для выявления макро- и микроструктуры марганцовистых сталей	Хлорная медь 10 г; хлористый магний 40 г; соляная кислота 20 мл; вода и этиловый спирт до 1000 мл	При приготовлении реактива необходимо сначала растворить все соли и кислоту в небольшом количестве воды (50 мл), затем долить спирт до 1000 мл. Воды в приготовленном реактиве должно быть 20 -25 %, в противном случае его чувствительность снижается. Макротравление проводить нанесением на шлиф тонкого слоя реактива от 0,5 до 2 минут. Операцию проводить несколько раз в свежей порции реактива, после чего промыть горячей водой, затем спиртом и высушить. Осадок меди удалять аммиаком или легкой речной полировкой. Оси дендритов в указанных термически обработанных сталях выявлять сначала травлением микрошлифа 3 -4 % -ным раствором азотной кислоты в спирте, затем данным реактивом

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макроструктуры. Позволяет уловить неоднородность распределения марганца и неметаллических включений	Хлорная медь 1г; пикриновая кислота 0,5 г; соляная кислота 1,5 – 2.5 мл; вода 10 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить нанесением реактива на поверхность макрошлифа до одной минуты. Образующийся осадок удалять раствором аммиака
Для выявления микроструктуры сложнолегированных марганцовистых сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 мл; глицерин 20-30 мл; перекись водорода 10 мл	Смесь кислот выдерживать сутки, перекись водорода и глицерин добавлять перед употреблением. Продолжительность травления в нагретом реактиве доходит до нескольких мин. Можно применять двух- трехразовое травление с переполировкой
Для выявления микроструктуры сложнолегированных марганцовистых сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20-30 мл; глицерин 20-30 мл	Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или пользоваться нагретым реактивом. Продолжительность травления в свежеприготовленном реактиве составляет 10 - 40 с. Можно применять многократное травление с переполировкой
Для выявления границ зерен в сложнолегированных марганцовистых сталях в состоянии начальной стадии отпускной хрупкости	Пикриновая кислота 10 г; ксилол 100 мл; этиловый спирт 10 мл	Травить погружением шлифом вниз 10 -60 мин. Затем шлиф слегка отполировать в течение одной минуты
Для изучения процесса выделения карбидов при отпуске марганцовистой стали	Марганцовокислый калий 4 г; едкий натр 1-4 г; вода 100 мл	Травить в свежеприготовленном кипящем реактиве от 1 до 3 минут и более
Для выявления границ аустенитных зерен низко- и среднелегированных марганцовистых сталей	Соляная кислота 3-5 мл; пикриновая кислота 1-4 г; этиловый спирт 95-100 мл	Травить на холоде 60 с. Рекомендуется многократное травление несколько мин (2 - 10) с переполировкой. После 15 мин отпуска при 200-250°C структура выявляется контрастнее. С повышением количества легирующих элементов в стали концентрацию кислот можно увеличить
Для выявления макро- и микроструктуры, границ зерен марганцовистых сталей. Выявляются макронеоднородности, образовавшиеся при отливке, ковке, поверхностной обработке и т.д.	Насыщенный на холоде раствор пикриновой кислоты в воде	Реактив составлять растворением кристаллической пикриновой кислоты в слегка нагретой воде до выпадения осадка кислоты после охлаждения. Продолжительность микротравления от одной до 10 -13 мин. При появлении налета необходима легкая переполировка (2 -3 с). Границы зерен травят в 50°C растворе. Сталь должна быть в состоянии обратимой отпускной хрупкости. Макротравление проводить в несколько приемов 6 - 8 ч., после чего шлиф промыть в струе воды и высушить, затем поверхность шлифа слегка протереть тонкой наждачной бумагой и опять поместить в свежеприготовленный раствор, Такую операцию повторять до получения отчетливой макроструктуры
Для выявления карбидной фазы, границ аустенитных зерен и идентификации отдельных фаз в высокомарганцовистых сталях. Аустенит возможно окрасить в желтоватый цвет, сорбит и троостит – в коричневый, мартенсит при этом не окрашивается	Раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Наиболее употребительным является реактив 4 – 6 % - ной концентрации. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких минут. Травит весьма контрастно. Применяя многократную переполировку в сочетании с травлением, можно выявлять ориентировку отдельных зерен феррита. Для цветного окрашивания структурных составляющих необходимо заменить этиловый спирт на амиловый

Таблица 3.1.8 Молибденовые стали

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
---------------------------	-------------------------	-------------------

Для выявления микроструктуры молибденовых сталей. Для идентификации молибденита и карбидов молибдена	3 % - ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натра 10-20 мл	Реактив применять только свежеприготовленным. Реактив пригоден только для однократного применения и может быть использован в холодном и в нагретом состояниях. Образующиеся при травлении пузырьки газа следует иногда удалять. При травлении травится сначала молибденит (за одну мин), затем карбиды молибдена (3 - 5 мин)
Для выявления микроструктуры молибденовых сталей	Красная кровяная соль 1 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить обычным способом в холодном или горячем (60 - 80°C) свежеприготовленном реактиве от 1,5 до 10 минут
Для выявления микроструктуры простых и сложных молибденовых сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 -30 мл; глицерин 20 -30 мл	Шлиф до травления рекомендуется подогреть или пользоваться нагретым реактивом, продолжительность травления 10 - 40 с Можно также применять многократное травление с переполровкой

Таблица 3.1.9 Никелевые стали

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры и идентификации фаз. В отожженной стали выявляются иглы мартенсита. Аустенит имеет более темную окраску по сравнению с ферритом	Соляная кислота 2-50 мл; этиловый спирт до 100 мл	При травлении реактив можно подогревать до 70-80°C. Продолжительность травления – в пределах нескольких минут. Для замедления травления можно уменьшить количество кислоты или заменить этиловый спирт изоамиловым
Для выявления макро- и микроструктуры аустенитных никелевых сталей	Насыщенный на холоду раствор пикриновой кислоты в воде	Реактив составлять растворением кристаллической пикриновой кислоты в слегка нагретой воде до выпадения осадка кислоты после охлаждения. Продолжительность микротравления от одной до 10 -15 мин. Налет осадка удалять легкой полировкой (2 -3 с). Макротравление проводить в несколько приемов 6 - 8 ч, после чего шлиф промыть в струе воды и высушить. Затем поверхность шлифа слегка протереть тонкой наждачной бумагой и опять поместить в свежеприготовленный реактив. Такую операцию продолжить до получения отчетливой макроструктуры
Для выявления границ аустенитных зерен	Соляная кислота 3-5 мл; пикриновая кислота 1 -4 г; этиловый спирт 95 -100 мл	Травить обычным способом на холоде до 60 с
Для выявления макро – и микроструктуры никелевых сталей	Персульфат аммония 1 -15 мл; вода до 100 мл	Микрошлиф травить в холодном или слегка нагретом свежеприготовленном растворе 5 -20 с и более. Воду можно заменять равным количеством спирта. Для макрошлифов использовать 15 % - ный раствор в нагретом до 70 - 90°C. Причем через каждые 3 -5 мин ваткой под струей воды снимать образующийся на поверхности шлифа темный налет, Эту операцию повторять несколько раз до четкого выявления макроструктуры После окончательной промывки и сушки шлиф для увеличения контрастности протравить 1 -2 мин в 5 % - ном растворе азотной кислоты с последующим удалением налета
Для выявления микроструктуры (границы зерен, ликвация, карбиды и др.).	Хлорное железо 1 - 25 г; соляная кислота, 1 -50 мл; вода 100 -120 мл	Варианты состава многообразны. Рекомендуется травить в реактиве 2,5г хлорного железа, 2,5 мл соляной кислоты, 100 мл воды. Травить протиранием поверхности шлифа тампоном 10-60 с при комнатной температуре
Для выявления микроструктуры никелевых сталей	Азотная кислота 20 мл; уксусная кислота 30 мл	Травить погружением при комнатной температуре в свежеприготовленном реактиве 5 -60 с. Для ускорения травления реактив можно подогреть до 40 -50°C; для замедления, а также для сталей, содержащих менее 25 % никеля рекомендуется добавить в реактив 20-50 мл ацетона
Для выявления структуры никелевых сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 10 мл; глицерин 20-30 мл; перекись водорода 10 мл	Смесь кислот выдерживают сутки; перекись водорода и глицерин добавлять перед употреблением. Продолжительность травления в нагретом реактиве составляет несколько минут. Можно применять двух-трехразовое травление с переполровкой. Для ускорения или замедления травления можно изменить количество соляной кислоты

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микро- и микроструктуры (границы зерен) никелевых сталей	Соляная кислота; Хлорная медь 5 г; вода 100 мл, этиловый спирт 100 мл	На микроструктуру: реактив применять в холодном или нагретом до 40 -50°C состоянии, время травления 0,5 -1 мин и более. На макроструктуру: реактив травит очень контрастно и рекомендуется для хорошо отполированных макрошлифов
Для выявления макро- и микроструктуры никелевых сталей	Соляная кислота 100 мл; серная кислота 50 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл	Травление проводить в холодном реактиве; допускается разбавление реактива водой или спиртом
Для выявления границ зерен аустенита в никелевых, никельмолибденовых и других высоколегированных сталях	Насыщенный водный раствор пикриновой кислоты 100 мл; алкилсульфонат натрия 0,5-2 г	Травить погружением при комнатной температуре несколько раз по 2-20 мин с промежуточной легкой переполнкой. При нагреве реактива до 50 -60°C продолжительность травления сокращается до 1 - 4 мин

Таблица 3.1.10 Хромистые стали

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры хромистых сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20-30 мл; глицерин 20-30 мл	Шлиф травить подогретым в горячей воде или пользоваться нагретым реактивом. Продолжительность травления в свежеприготовленном реактиве составляет 10 -40 с и более. Можно применять многократное травление с переполнкой
Для выявления структуры хромистых сталей	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 мл; глицерин 20-30 мл; перекись водорода 10 мл	Смесь кислот выдержать сутки; перекись водорода и глицерин добавлять перед употреблением. Травить в нагретом реактиве несколько минут. Можно применять двух- трехразовое травление с переполнкой. Для ускорения или замедления травления можно изменять количество соляной кислоты
Для выявления границ зерен в хромистых, хромоникелевых и хромомарганцовистых сталях, находящихся в состоянии отпускной хрупкости, даже если при комнатной температуре не наблюдается падения ударной вязкости.	Пикриновая кислота 10 г; ксилол 100 мл; этиловый спирт 10 мл	Травить погружением полированной поверхностью вниз 10 -60 мин, затем шлиф отполировать в течение одной минуты. Рекомендуется предварительно протравить шлиф в растворе азотной кислоты в этиловом спирте, чтобы на результаты травления не оказывали влияния остатки троостита или границы зерен феррита
Для выявления микроструктуры хромистых и хромоникелевых сталей	Хромовый ангидрид 2 г; серная кислота 25 мл; вода 75 мл	При содержании хрома в стали: 5, 7 - 20, 25 % рекомендуются следующие режимы травления: температура раствора: 30, 40 °C, кипящий; время травления: 20 с, 30 с, 3 - 4 мин соответственно
Для выявления микроструктуры хромистых и хромоникелевых сталей. Травятся карбиды хрома и цементит, сигма-фаза окрашивается в коричневый цвет, аустенит – в голубой или желтый; феррит окрашивается быстрее аустенита и приобретает цвет от желтого до коричневого	Марганцовокислый калий 4 г; едкий натр 1-4 г; вода 100 мл	Травить в свежеприготовленном кипящем реактиве от одной до трех минут и более. При 20°C время травления увеличивается до одного часа. Окрашивающее травление рекомендуется проводить в нагретом до 65 – 70°C в реактиве для выявления сигма-фазы и интерметаллидов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры (в т.ч. границы зерен, ликвация, карбиды) хромистых и хромоникелевых сталей. Зерна феррита и аустенита окрашиваются в цвета разных оттенков и интенсивности	Хлорное железо 1-25 г; соляная кислота 1-50 мл; вода 100-120 мл	Травить протираанием тампоном 10-60 с. Для сокращения времени травления можно употреблять более концентрированные растворы
Для выявления макро- и микроструктуры хромистых, хромоникелевых сталей	Соляная кислота 100 мл; хлорная медь 5 г; вода 100 мл; этиловый спирт 100 мл	Реактив применять в холодном или нагретом до 40-50°C состоянии, время травления 0,5 - 1 мин и более. При кратковременном травлении хорошо выявляются границы зерен. Этот реактив рекомендуется при изучении дендритной макроструктуры литой стали
Для выявления гамма- и дельта – фазы в термически обработанных хромистых сталях	Пикриновая кислота 4 г; хлорная медь 0,1-0,2 г; вода 100 мл	Травить погружением микрошлифа в реактив на время до нескольких минут с промежуточными полировками. Осадок меди удалять тампоном. Шлиф перед травлением рекомендуется слегка подогреть. При травлении дельта-фаза травится сильнее, чем гамма-фаза
Для выявления микроструктуры в марганцовохромистых сталях и идентификации альфа – и эpsilon- мартенсита	Гипосульфит 30 г; пиросернистокислый калий 10 г; уксусная кислота 5 мл; вода 100 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре
Для дифференциального металлографического анализа хромистых и хромотитановых сталей при исследовании карбидов	3 % - ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натра 10-20 мл	Реактив применять только свежеприготовленный. Он пригоден только для однократного применения и может быть использован в холодном и в нагретом состояниях. Время травления на холоде до 3 - 5 мин и более, в нагретом реактиве травить несколько секунд
Для выявления макро- и микроструктуры хромистых и хромоникелевых сталей	Персульфат аммония 1-15 г; вода до 100 мл;	Микроструктуру выявлять в холодном или слегка нагретом свежеприготовленном растворе 0,5 - 5 мин с промежуточной переполровкой При повышенной температуре раствора более 35°C может возникать на поверхности шлифа пятнистость. Подогретый раствор применять только один раз. Макроструктуру выявлять обычным способом в 15 % - ном растворе персульфата аммония
Для выявления структуры (в том числе границ зерен) стали, содержащей хром	Соляная кислота 3 -5 мл; пикриновая кислота 1 -4 г; этиловый спирт 95-100 мл	Травить на холоде до 60 с. Для выявления границ зерен рекомендуется многократное травление в течение 2 -10 мин с переполровкой
Для выявления структурных составляющих в закаленной стали (троостит окрашивается в темнокоричневый цвет; мартенсит и аустенит – не травятся) и неоднородности перлита в отожженной стали	А. 4 % - ный раствор азотной кислоты в уксусном ангидриде 10 мл Б. амиловый спирт 10 мл; этиловый спирт 10 мл; метиловый спирт 10 мл	Реактив составлять непосредственно перед употреблением из трех частей раствора Б и одной части раствора А. Травить при комнатной температуре от 20 с до нескольких минут

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макро- и цветного окрашивания микроструктурных составляющих хромистых, хромомолибденовых, хломоникельмолибденовых и хромоникелевых сталей. После травления троостит темнеет, мартенсит и аустенит окрашиваются в разные цвета. Феррит и цементит не травятся. Также выявляются границы аустенитных зерен сталей в состоянии обратимой отпускной хрупкости. Выявляют макронеоднородности, образовавшиеся в результате отливки,ковки и т.д.	Насыщенный на холоду раствор пикриновой кислоты в воде	Реактив составлять растворением кристаллической пикриновой кислоты в слегка нагретой воде до выпадения осадка кислоты после охлаждения. Продолжительность микротравления от одной до 10-15 мин; если на шлифе остается налет, то необходима легкая полировка. Границы зерен выявлять травлением в нагретом до 50°C насыщенном водном растворе пикриновой кислоты. Макротравление проводить в несколько приемов в приведенном реактиве при комнатной температуре 6 - 8 ч, после чего шлиф промыть в струе воды и высушить. Затем поверхность шлифа слегка протереть тонкой наждачной бумагой и опять поместить в свежеприготовленный реактив. Такую операцию повторять до получения отчетливой микроструктуры
Для выявления микроструктуры хромистых сталей	Соляная кислота 10-50 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить в холодном реактиве несколько минут. Реактив можно подогревать до 70 -80°C. Для замедления травления можно уменьшать количество кислоты или заменять этиловый спирт изоамиловым
Для выявления карбидов и цветного идентифицирования структурных составляющих в хромистых и хромомарганцовистых сталях. При травлении холодным реактивом сигма-фаза имеет светло-синий оттенок, феррит окрашивается в желтый цвет, карбиды – в темные цвета, цементит окрашивается позже других карбидов в цвета от голубого до серого. При травлении кипящим реактивом аустенит остается белым, сигма-фаза приобретает оттенок от радужного до темно-коричневого, феррит становится коричневатожелтым, карбиды не травятся	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Реактив хранить в темной посуде и применять вскоре после приготовления. Состав реактива непостоянен. Для карбида хрома надо увеличить количество красной кровяной соли. Для разделения феррита и сигма-фазы в хромоникелевых сталях рекомендуется уменьшить количество воды до 20 мл. Травить в холодном или в кипящем реактиве. Время травления подбирать эмпирически

Таблица 3.1.11. Ликвация и сегрегация примесей в сталях

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макронеоднородности распределения фосфора, марганца и кремния	Хлорная медь 1 г; пикриновая кислота 0,5 г; соляная кислота 2 мл; вода 10 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить нанесением реактива на поверхность макрошлифа на время до одной минуты. Образующийся осадок можно удалять раствором аммиака
Для выявления ликвации фосфора	Соляная вода 100 мл; этиловый спирт 50 мл	Травить на холоде погружением или смачиванием тампоном. Время травления зависит от состава стали и может продлиться до 25 минут. После травления шлиф вытереть, промыть спиртом и высушить. Промывать водой нежелательно, иначе осадок меди может потемнеть. Обогащенные фосфором участки после травления остаются светлыми
Для отделения серной сегрегации от фосфорной на отпечатках, снятых по Бауману или по Гейну	Йод кристаллический 12 г; йодистый калий 20-24 г; азид натрия 1,3 г; вода 1000 мл	Реактив наносить капельницей на предварительно намеченные участки отпечатков на серу по Бауману или по Гейну. О наличии сульфидов можно судить по выделению пузырьков азота на шлифе
Для выявления серной и фосфорной сегрегаций в сталях	Хлорная ртуть 10 г; соляная кислота 20 мл; вода 100 мл	Желатинную бумагу поместить в ванночку с реактивом на 2 -3 минуты, после чего приложить эмульсионной стороной к обезжиренной поверхности макрошлифа на 4 -5 минут. В процессе выдержки бумагу плотно прикатать к шлифу, затем отпечаток промыть в проточной воде и высушить. Образующиеся сульфиды ртути имеют более темный цвет по сравнению с фосфидами ртути
Для выявления сегрегации фосфора	Азотная кислота 6 мл; оксид меди 0,04 г; этиловый спирт до 200 мл	Шлиф погрузить в реактив от 0.5 до 1 минуты, где он должен постепенно покрыться красно-коричневой пленкой. Затем его промыть, после чего пленка легко отделяется вручную. Последующая легкая полировка на чистом сухом сукне выявляет рельеф, заметный при небольших увеличениях. Для получения более четкой картины травление можно повторить
Для опознания сернистых включений в стали	А. Желатин 25 г; глицерин 50 мл; вода 100 мл; Б. Двойная калийно-сурьмяная соль виннокаменной кислоты 7 г; вода 100 мл В. Серная кислота 20 мл; вода 100 мл	Желатин растворить в воде, затем добавить глицерин и всю смесь нагреть до полного растворения. К 40 мл раствора А добавить 1 мл раствора Б и 5 мл раствора В. Каплю полученной смеси нанести на пластинку, которую приложить к шлифу. В результате травления вокруг сернистых включений появляется красно-оранжевый ободок сульфида сурьмы
Для выявления участков стали, обогащенных кремнием	А Пикриновая кислота 4-6 г; этиловый спирт 100 мл Б. Насыщенный спиртовой раствор йода	Шлиф травить погружением на несколько секунд в растворе А, затем слегка очистить тампоном и перенести на 5 - 6 минут в раствор Б. В малоуглеродистых кремнистых сталях для увеличения контраста после травления шлиф слегка пополировать, затем провести обратный порядок травления (5 -15 мин в 1,5 % - ном растворе Б и 40 -60 с в растворе А). Раствор А выявляет общую структуру, раствор Б окрашивает обогащенные кремнием участки

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления ликвации кислорода	Хромовый ангидрид 10 г; едкий натр 50 г; вода 100 мл	Реактив составлять добавлением небольших порций едкого натра к раствору хромового ангидрида. Травить в кипящем реактиве, затем шлиф высушить теплым воздухом. Обогащенные кислородом участки травятся заметно медленнее основной структуры
Для выявления ликвации мышьяка в углеродистых и низколегированных сталях	Едкий натр 40 г; нитрат натрия 15 г; вода 60 мл	Травить в горячем или кипящем реактиве, однако, из-за испарения воды концентрация реактива меняется, что может привести к образованию на поверхности шлифа коричневого осадка, который необходимо удалять тампоном
Для выявления сегрегации фосфора в углеродистых сталях	Соляная кислота 100 мл; хромовый ангидрид 40 г; хлористый никель 16 г; вода 100 мл	Хлористый никель добавить к нагретому раствору соляной кислоты в воде; после охлаждения растворить хромовый ангидрид. Шлиф травить погружением до одной минуты с последующей промывкой. Сегрегации фосфора темнеют на фоне остальной структуры
Для выявления участков структуры, обогащенных марганцем, мышьяком, кремнием	10 % - ный раствор йода в этиловом спирте	Травить в холодном 5 -10 % - ном растворе 10 с и более. Для замедления травления можно увеличить количество йода. Шлиф промывать только спиртом. Феррит с повышенным количеством марганца травится сильнее, чем обедненный. Участки, обогащенные мышьяком, окрашиваются в темный цвет. Для выявления распределения кремния шлиф травить 5 -15 мин. Обогащенные кремнием участки остаются светлыми
Для выявления сегрегаций фосфора в сталях	Двууглекислая сода 5-20 г; вода 100 мл	Травить 8 -12 мин в нагретом до 70-80°C реактиве. Обогащенные фосфором участки травятся сильнее
Для выявления ликвации фосфора в углеродистых и низколегированных сталях	35-80 % - ный раствор бисульфита натрия	Травить 10-25 с при комнатной температуре
Для макроскопического выявления сегрегаций фосфора в сталях	Азотнокислый никель 40г; хлорная медь 12 г; хлорное железо 48 г; вода 100 мл	Шлиф травить погружением в реактив на несколько минут, затем промыть и высушить. Для сокращения времени травления можно в готовый реактив добавить 100 -120 мл этилового или метилового спирта
Для макроскопического выявления сегрегации фосфора в сталях	Соляная кислота 100 мл; хлорное железо 200 мл; хлорная медь 1г; вода 1000 мл	Шлиф травить 2 -5 мин, потом зашлифовать тонкой наждачной бумагой и опять травить 20-30 мин
Для выявления сегрегаций фосфора в сталях, особенно с содержанием более 0,4 % углерода	Хлорное железо 30 г; соляная кислота 50 мл; хлористое олово 0,5 г; хлорная медь 1 г; вода 500 мл; этиловый спирт 500 мл	Травить при комнатной температуре в свежеприготовленном растворе 10-120 с. Для получения лучших результатов можно 2-3 раза чередовать травление с легкой полировкой, причем каждый раз травить в свежем реактиве
Для выявления макроскопической ликвации фосфора в литых сталях	Хлорная медь 10 г; хлористый магний 40 г; соляная кислота 20 мл; вода либо этиловый спирт до 1000 мл	При составлении реактива сначала растворить все соли и кислоту в небольшом количестве воды (50 мл) и затем долить спирт или воду до 1000 мл. Медь отлагается на участках, обогащенных фосфором; после обработки аммиаком эти участки имеют более светлый оттенок

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления участков макроструктуры, обогащенных фосфором, углеродом и серой	Хлористоаммиачная медь 10 г; вода до 100 мл	Шлиф погрузить шлифованной поверхностью вверх в реактив на время около одной минуты, затем промыть в струе воды и одновременно удалить ваткой темный налет. Налет можно также удалять раствором аммиака. В процессе травления нужно следить, чтобы на шлифе не было пузырьков воздуха и удалять эти пузырьки ваткой
Для выявления макроскопических сегрегаций углерода и фосфора в углеродистых и низколегированных сталях	А. 4-6 % - ный раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте; Б. 10-12 % - ный раствор хлористоаммиачной меди в воде	Макрошлиф погрузить на несколько часов. В раствор А, затем слегка протереть тонкой наждачной бумагой и травить реактивом Б. Образующийся темный налет удалять раствором аммиака или протереть ватным тампоном
Для выявления макроскопических сегрегаций фосфора в углеродистых сталях	Хлорное железо 2,5 г; соляная кислота 2,5 мл; вода 1000 мл	Травить протираем шлифа при комнатной температуре 10 - 60 с. Участки, обогащенные фосфором, имеют более светлый оттенок
Для выявления макроскопических сегрегаций фосфора в углеродистых	Пикриновая кислота 3-5 г; этиловый спирт до 100 мл	Травить на холоде любым способом, время травления зависит от химического состава стали и достигает нескольких минут. Замедление травления достигается уменьшением количества кислоты, либо заменой этилового спирта Участки, богатые фосфором, окрашиваются в первую очередь

Таблица 3.1.12 Включения в сталях

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления сульфидов, карбидов, вольфрамов, нитридов, фосфидов и цементита в высоколегированных сталях	Пикриновая кислота 2-5 г; едкий натр 20-25 г; вода 75-100 мл	Растворить пикриновую кислоту в заранее приготовленном растворе едкого натра в половинном количестве воды. Полученный раствор нагреть на водяной бане, добавить остальное количество воды до растворения всего осадка. Раствор не должен кипеть, чтобы не менялся состав. Приготовленный реактив хранить в темной герметичной посуде, и он не должен иметь щелочную реакцию. Шлиф травить погружением в нагретый до 60°C реактив на 5 -30 минут. Реактив окрашивает цементит в темный цвет, вольфрамы и карбиды железа окрашиваются позже остальных, сульфиды окрашиваются позже нитридов
Для выявления сульфидов марганца в закаленной стали	Сернистая кислота 3-4 г; этиловый спирт 100 мл	Шлиф травить погружением поверхностью вверх на одну минуту и более, затем промыть водой, спиртом и высушить на воздухе. Сульфид марганца окрашивается в голубой цвет
Для макроскопического выявления сульфидов в нержавеющих сталях	Хлористый свинец 0,5 г; соляная кислота 3 мл; вода 100 мл	В реактив добавить несколько капель смачивающего вещества. Перед погружением в реактив образец предварительно протравить реактивом: соляная кислота 100 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл. При этом поверхность шлифа покрывается черным налетом свинца, на фоне которого видны сульфиды в виде серебристых блесков
Для выявления нитридов и карбидов в нержавеющих сталях	Соляная кислота 20 мл; метабисульфит калия 1г; фтористый аммоний 2.4 г; вода 100 мл	Травить на холоде обычным способом. В результате травления на поверхности шлифа появляется тонкий налет сульфидов, окрашивающий нитриды в желтый, карбиды – в серый цвет

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления включений цементита и фосфидов в сталях	А. Гипосульфит натрия 80 г; азотнокислый аммоний 60 г; вода 1000 мл; Б. Азотная кислота 1 мл; ортофосфорная кислота 2.5 мл	100 мл раствора А нагреть до 70 -75°C, затем добавить 0,4 - 0,5 мл раствора Б. Травить в свежеприготовленной смеси одну - три минуты. Цементит и фосфиды остаются светлыми, при этом хорошо различаются границы цементита
Для идентификации и определения распределения сульфидных включений в углеродистых и низколегированных сталях	Тиосульфат натрия 240 г; лимонная кислота 30 г; уксуснокислый свинец 25 г; нитрид натрия 2.5 г; вода 1000 мл	Растворить компоненты в указанном порядке. Реактив использовать через сутки после его приготовления. Предварительно исследуемый шлиф протравить 5 % - ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Затем образец на короткое время погрузить в реактив при комнатной температуре. В результате травления на сернистых включениях образуется пленка контрастного серебристого цвета. Остальные участки структуры покрываются более тонкой пленкой, имеющей окраску от синей до фиолетовой
Для выявления карбидов вольфрама и цементита в сложных хромоникелевых сталях с молибденом, бором, титаном сталях	Перекись натрия 10 г; едкий натр 10 г; вода 100 мл	Реактив применять однократно в свежеприготовленном состоянии. При травлении в течение 30 с при комнатной температуре карбиды вольфрама темнеют, цементит не травится
Для выявления карбидов хрома и вольфрама в легированных сталях	Цианистый натрий 10 г; вода 100 мл	Травить в нагретом до 60-70°C реактиве 30 -60 с. Карбиды хрома и вольфрама разъедаются. Шлиф рекомендуется изучать при больших увеличениях. Раствор очень ядовит
Для выявления свинцовистых включений в автоматных сталях	А. Уксусная кислота 50 мл; этиловый спирт 400 мл; Б. Двуххромовокислый натрий 35 г; вода 100 мл	Реактив составить перед употреблением из смеси 2 -2,5 ч раствора А и 1 ч раствора Б. Травленный ниталем и слегка отполированный шлиф травить смесью растворов А и Б 20-30 мин
Для выявления включений свинца в сталях	А. Цианистый калий 1 г; вода 100 мл Б Дифенилтио карбазон 0,25 г; хлороформ 10 мл	Предварительно травить микрошлиф в 4 % - ном водном растворе пикриновой кислоты; промыть водой и высушить. После этого от 0,5 до 1 минут протереть хорошо перемешанной смесью равных объемов растворов А и Б. При этом образуются комплексные соединения кирпично-красного цвета, хорошо видимые в темном поле и поляризованном свете, в том случае, если в стали есть свинец. Реактив очень ядовит
Для выявления сульфидов, карбидов и ликвации фосфора в малоуглеродистых сталях	35-80 % - ный раствор бисульфита натрия	Травить при комнатной температуре 10-25 с
Для идентификации фосфидов железа и цементита	Едкий натр 25 г; бромистый калий 0,5 г; вода 100 мл	Реактив составлять перед употреблением, добавляя бромистый калий к раствору едкой щелочи. Раствор использовать однократно. Травить на холоде несколько секунд. Реактив окрашивает фосфиды железа и позволяет отличать их от цементита
Для выявления цементита, фосфидов и силицидов в сталях	А. Едкий натр 50 г; вода 100 мл Б. Азотнокислый свинец 10 г; вода 100 мл	Реактив составлять перед употреблением из смеси равных объемов растворов А и Б. Травить в горячем реактиве несколько минут. Цементит окрашивается в темный цвет; глубоко травятся фосфиды и силициды

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления карбидов в нержавеющей аустенитных сталях	Хлорная кислота 100 мл; сернистая медь 20 г; вода 100 мл	Травить погружением на 15 мин и более в нагретый реактив до появления белого дыма, затем шлиф промыть теплой водой, спиртом и высушить. При этом четко выявляются карбиды по границам зерен и зоны, обедненные хромом
Для выявления вольфрамовидов железа и сложных железобольфрамовых карбидов в сталях	А. Цианистый калий 1 г; азотнокислая медь 1 г; вода 8 г; Б. Едкий натр 5 г; вода до 10 мл	Растворы А и Б смешать перед употреблением. Шлиф травить погружением на 20 - 40 с в нагретый до 60 -70°С реактив. Цианистый калий – сильный яд! Реактив окрашивает вольфрамид железа и сложный железобольфрамовый карбид в сталях Цементит окрашивается слабее. Прочие карбиды не окрашиваются
Для раздельного выявления карбидов в сложнолегированных сталях	Марганцовокислый калий 4 г; едкий натр 1-4 г; вода 100 мл	Травить в свежеприготовленном кипящем растворе одну - три минуты. При 20°С время травления увеличивается до одного часа. Травятся карбиды хрома и цементит. Травление в кипящем реактиве применяется для определения наличия цементита в быстрорежущих сталях
Для цветного окрашивания цементита всех форм, даже в сорбите и перлите	Азотнокислая медь 5 г; цианистый калий 5 г; вода 100 мл	Реактив готовить смешиванием 10 % - ных растворов азотнокислой меди и цианистого калия. Травить погружением на 1 -5 мин. Цианистый калий- сильный яд! Реактив окрашивает цементит всех форм
Для макроскопического выявления зон металла, обогащенных нитридами	А. Хлористая ртуть 1 г; соляная кислота 20 мл; этиловый спирт 100 мл; Б. Хлорная медь 1 г; хлорный магний 10 г; соляная кислота 40 мл; этиловый спирт 100 мл	Шлиф погрузить на несколько секунд последовательно в реактивы А и Б. Реактивы должны быть свежеприготовленными и использоваться однократно. Реактив окрашивает зоны металла, обогащенные нитридами. Рекомендуется для азотируемых сталей
Для выявления карбидов в закаленных и состаренных хромоникелевых и хромоникелькобальтовых сталях	Соляная кислота 100 мл; серная кислота 10 мл; сернистая медь 20 г; перекись водорода 2 мл; вода 100 мл	Шлиф погрузить в свежеприготовленный реактив на 30 - 50 с и затем его промыть. Перекись водорода добавить непосредственно перед употреблением
Для идентификации карбидов в хромокремнистых сталях	Плавиковая кислота 10 мл; вода 10 мл; этиловый спирт 20 мл	Реактив составляют добавлением небольших порций воды в спиртовой раствор плавиковой кислоты. При травлении до 5 - 6 ч. Цементит и железокремнистые карбиды окрашиваются, хромистые и железохромистые карбиды травятся значительно слабее
Для выявления сегрегаций фосфора в сталях	Азотная кислота 6 мл; оксид меди 0,04 г; этиловый спирт 200 мл	Травить погружением в при комнатной температуре от 0,5 до 1 минуты, где шлиф постепенно покрывается красно-коричневой пленкой. После шлиф промыть, при этом пленка легко отделяется вручную. Последующая легкая полировка на сухом сукне выявляет рельеф, заметный при небольших увеличениях
Для выявления оксидных и сульфидных включений	Гипосульфит натрия 30 г; метабисульфит калия 2 г; вода 100 мл	Травить в холодном насыщенном растворе гипосульфита. Оксидные и сульфидные включения на макрошлифе окрашиваются по разному
Для окрашивающего травления фосфидов, нитридов и карбидов в сталях	Соляная кислота 15 мл; селеновая кислота 10 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить на холоде погружением одну - три минуты. В результате травления вследствие восстановления селеновой кислоты образуется пленка селена на катодных участках микроструктуры, которыми являются нитриды, карбиды и фосфиды, имеющие разный цвет

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления карбидов и вольфрамов в хромовых, вольфрамовых и быстрорежущих сталях	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить в холодном или горячем (60-80°C) свежеприготовленном реактиве 1-10 мин. Карбиды хрома, вольфрама и ванадия окрашиваются, вольфраматы не травятся. Цементит окрашивается позже других карбидов в цвета от голубого до серого

Таблица 3.1.13 Поверхностное упрочнение сталей

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры и глубины азотированного и цементированного слоев на сталях	А. 4 % - ный раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте; Б. 4 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Шлиф травить в смеси растворов А и Б в соотношении 10:1 окунанием, затем сушить только воздухом
Для цветного выявления микроструктуры борированного слоя на сталях	Пикриновая кислота 2-5 г; едкий натр 20-25 г; вода 75-100 мл	Травить в горячем реактиве (60°C) 30-60 с. При этом борид железа FeB окрашивается в голубой цвет, Fe ₂ B – в желтый. При меньшем времени травления слой фазы FeB окрашивается в коричневый цвет
Для выявления микроструктуры азотированного слоя стали	А. Соляная кислота 30 мл; азотная кислота 10 мл; Б. Хлорное железо 10 г; соляная кислота 30 мл; азотная кислота 10 мл; спирт 100 мл	Шлиф последовательно травить несколько секунд в реактивах А и Б. После легкой полировки опять протравить реактивом Б до выявления структуры. Реактив А составлять перед употреблением. В реактиве Б азотную кислоту можно заменить равным количеством 2 -3 % - ным раствором плавиковой кислоты для ускорения травления
Для выявления микроструктуры и нитридов азотированного слоя хромоникелевых, хромованадиевых и других сталей	Хлористый магний 10 г; соляная кислота 2 мл; вода 100 мл; этиловый спирт 100 мл	Все компоненты растворить в воде, затем полученный реактив разбавить спиртом. Травить погружением в холодный раствор до одной минуты и более. Выявляются нитриды и структура азотированного слоя
Для выявления микроструктуры азотированного слоя в хромоникелевых, хромованадиевых сталях после высокого отпуска	4 % - ный спиртовой раствор азотной кислоты, мл; 4 % - ный спиртовой раствор пикриновой кислоты в соотношении 1:10	Травить погружением 60 с, затем промыть спиртом и высушить
Для выявления макро- и микроструктуры азотированного слоя на сталях	А. Хлористая ртуть 1г; соляная кислота 20 мл; этиловый спирт 100 мл; Б. Хлорная медь 1 г; хлорный магний 10 г; соляная кислота 40 мл; этиловый спирт 100 мл	Шлиф погрузить на несколько секунд последовательно в реактивы А и Б. Реактивы должны быть свежими и используются однократно. Реактив хорошо травит и окрашивает зоны, обогащенные нитридами
Для определения глубины и микроструктуры азотированного слоя на сталях	Соляная кислота 100 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл	Травить погружением на одну – две минуты с последующей промывкой теплой водой и спиртом

Таблица 3.1.14 Электроискровая обработка стали

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры поверхностного слоя стали после электроискровой обработки	3 % - ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натра 10-20 мл	Реактив применять свежеприготовленным. Травить в кипящем реактиве 3-5 мин. При этом травятся границы аустенитных и ферритных зерен и окрашиваются цементитные иглы, металл сердцевины не
Для выявления микроструктуры поверхностного слоя и основы стали после электроискровой обработки	Гипосульфит натрия 30 г; метабисульфит калия или натрия 2 г; вода 100 мл	Травить на холоде одну - две минуты
Для выявления микроструктуры и основы стали после электроискровой обработки	Метол 10 г; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре обычным способом

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры поверхностного слоя стали после электроискровой обработки	8 % - ный водный раствор красной кровяной соли 100 мл; 50 % - ный водный раствор соляной кислоты 50 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре
Для выявления микроструктуры поверхностного слоя стали после электроискровой обработки	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре

Таблица 3.1.15 Чугуны

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры металлической основы чугунов; для разделения цементита и фосфида в фосфидной эвтектике	Раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Для микроструктуры чугунов (в частности, для кремнистых) травить 2 % - ным раствором азотной кислоты в амиловом спирте. Для разделения цементита и фосфида в фосфидной эвтектике шлиф следует сначала протравить в 3 % - ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Время травления 10 -15 с. Затем быстро (за 3-5 мин) нагреть шлиф до 250-350°C и быстро охладить в ртутной ванне. В результате фосфид окрашивается в более темный цвет по сравнению с цементитом
Для выявления микроструктуры чугунов	Пикриновая кислота 3-5 г; этиловый спирт 100 мл	Травить на холоде любым способом. Время травления зависит от природы и состояния металла и достигает несколько минут. Замедление травления достигается уменьшением количества кислоты или применением изоамилового спирта
Для выявления структуры чугунов, особенно с ферритной основой (выявляется первичная дендритная структура). В серых чугунах феррит и перлит остаются светлыми	Пикриновая кислота 5 г; едкий натр 20 -25 г вода 75 -200 мл	Пикриновую кислоту растворить в заранее приготовленном растворе едкого натра в половинном количестве воды. В полученный раствор, нагретый на водяной бане, добавить остальное количество воды до растворения всего осадка. Раствор не должен кипеть, чтобы не менялся его состав. Реактив следует хранить в темной герметичной посуде и он должен иметь щелочную реакцию. Шлиф травить погружением в нагретый до 60°C реактив на 5 - 30 мин. Для чугунов после 20 -25 мин травления шлиф оставлять на 5 -10 мин в остывающем реактиве
Для выявления структуры чугунов	Персульфат аммония 10 г; вода 100 мл	Травить в холодном или слегка нагретом растворе 5-20 с и более. Реактив следует применять свежеприготовленным. Выявляются феррит и перлит, почти не травится фосфидная эвтектика
Для выявления графита в чугунах для электронно-микроскопических исследований	Насыщенный водный раствор хромпика 50 -100 мл; серная кислота 10 мл	Травить в горячем растворе одну - две минуты
Для дифференцирования структурных составляющих в чугунах	Раствор йода в этиловом спирте	Травить в холодном 2-6 % - ном растворе 10 с и более. Шлиф промывать только спиртом. Феррит с повышенным количеством марганца травится сильнее, чем обедненный
Для выявления структуры чугунов	Йод кристаллический 1,25 г; йодистый калий 1,25 г; этиловый спирт 100 мл	Травить в холодном реактиве 0,5 - 2 мин

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макро- и микроструктуры чугунов	Гипосульфит натрия 30 г; метабисульфит калия или натрия 2 г; вода 100 мл	Травить до образования темнокоричневого налета (время травления подбирать), после шлиф промыть водой, спиртом и высушить. Выявляется распределение фосфора и свободный цементит
Для окрашивающего выявления фосфидов, нитридов и карбидов в чугунах	Соляная кислота 15 мл; селеновая кислота 10 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить в холодном реактиве погружением одну – три минуты. Вследствие восстановления селеновой кислоты происходит образование пленки селена на катодных участках микроструктуры, которыми являются нитриды, карбиды и фосфиды
Для выявления фосфидной эвтектики	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 4 г; вода 100 мл	Для опознания фосфидной эвтектики шлиф опустить в кипящий раствор. При этом травится сначала фосфид, затем цементит. В холодном или нагретом до 40 -60°C реактиве фосфид окрашивается в цвета от светло-оранжевого до темно-коричневого в зависимости от температуры и времени травления
Для выявления границ зерен в чугунах	Хлорная медь 1 г; пикриновая кислота 0,5 г; соляная кислота 2 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить нанесением реактива на полированную поверхность макрошлифа одну минуту. Образующийся осадок удалять раствором аммиака
Для выявления эвтектического зерна в чугунах с содержанием до 0,08 % фосфора при разной толщине стенок отливки	Сернокислая медь 3 г; пикриновая кислота 3 г; соляная кислота 200 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить при комнатной температуре 30 с. После травления шлиф промыть горячей водой и высушить теплым воздухом
Для выявления микроструктуры чугунов	Соляная кислота 30 мл; хлорная медь 1,5 г; вода 95 мл, этиловый спирт 30 мл	Шлиф погрузить в холодный реактив или смачивать тампоном. Время травления зависит от состава чугуна. При травлении образующийся на шлифе налет удалять ваткой, смоченной раствором йода, затем шлиф вытереть и промыть эфиром
66 Для выявления серной и фосфорной сегрегаций в чугунах	Хлорная ртуть 10 г; соляная кислота 20 мл; вода 100 мл	Желатиновую бумагу поместить в ванночку с реактивом на две - три минуты, после приложить эмульсионной стороной к отшлифованной и хорошо обезжиренной поверхности макрошлифа на 4 -5 мин. В процессе выдержки бумагу плотно прикатать к макрошлифу валиком, затем отпечаток тщательно промыть в проточной воде и высушить. Образующиеся сульфиды ртути имеют более темный цвет по сравнению с фосфидами ртути
Для выявления первичной структуры и сильной ликвации фосфора в отливках из чугуна любого состава	Борная кислота 10-30 г; серная кислота 100 мл	Шлиф травить погружением на несколько секунд, затем промыть в проточной воде и слегка отполировать для удаления оксидов и графитных отложений. Травление можно производить несколько раз с промежуточной переполровкой. Реактив должен иметь молочно-белый цвет, так как в процессе травления состав изменяется, и раствор становится постепенно прозрачным; необходимо регулярно добавлять борную кислоту. Вместо борной кислоты можно использовать молочную кислоту
Для выявления ориентации зерен феррита в серых чугунах	4% -ный водный раствор пикриновой кислоты 78 мл; азотная кислота 2 мл; этиловый спирт 20 мл	Травить в холодном растворе несколько минут

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры чугунов, исследуемых при больших увеличениях	А. 4 % - ный водный раствор желатины; Б . 3 % - ный водный раствор формалина; В. 3 % - ный спиртовый раствор азотной кислоты	На поверхность слегка нагретого шлифа нанести тонкий слой раствора А, нагретого до 60°C. После сушки желатины шлиф погрузить полированной поверхностью вверх в раствор Б, где выдержать от 30 с до 2 мин, затем шлиф перенести в раствор В и после 0,5 – 2 мин травления сушить спиртом. Азотную кислоту можно заменять равным количеством соляной или пикриновой кислот
Для определения структурных составляющих в чугунах, дифференцирует фосфидную эвтектику	Нейтральный раствор пикрата натрия	Реактив готовить добавлением насыщенного водного раствора пикриновой кислоты к концентрированному раствору едкого натра. Отфильтрованный осадок следует высушить на воздухе очень осторожно, так как он взрывоопасен. Соль рекомендуется несколько раз промыть водой для выщелачивания и 2-3 раза перекристаллизовать. Продолжительность травления в свежем горячем или кипящем растворе колеблется в широких пределах от 1 до 30 мин. Реактив хорошо дифференцирует фосфидную эвтектику и окрашивает в темный цвет фосфид железа; цементит и другие составляющие не травятся
Для определения структурных составляющих в чугунах	Сернистая кислота 3-4 г; этиловый спирт 100 мл	Шлиф травить погружением поверхностью вверх на одну минуту и более, затем промыть водой, спиртом и высушить на воздухе
Для распознавания серы в графите серых чугунов	Ортофосфорная кислота 3 мл; вода 100 мл	Шлиф с нанесенной на поверхность каплей реактива рассматривать в микроскопе. Выделяющиеся пузырьки сероводорода свидетельствуют о наличии серы в графите. Травление чугуна несколько секунд после кратковременного (20 мин) нагрева до 280°C позволяет отличить цементит от фосфида. Цементит окрашивается в розовый цвет, фосфид – в светло-желтый
Для выявления макроструктуры (макропористость, сегрегацию фосфора) и микроструктуры чугунов	Соляная кислота 100 мл; хромовый ангидрид 40 г; хлористый никель 16 г; вода 100 мл	Хлористый никель добавлять к нагретому раствору соляной кислоты в воде; после охлаждения раствор в нем растворять хромистый ангидрид. Шлиф травить погружением до одной минуты с последующей промывкой и сушкой. Зоны, обогащенные фосфором, темнеют
Для выявления цементита и фосфидной эвтектики в чугунах	35 - 80 % - ный раствор бисульфита натрия	Травить обычным способом 10-25 с
Для выявления общей структуры чугунов	Салициловая кислота 10 г; этиловый спирт 100 мл	Травить погружением или смачиванием несколько секунд при 20°C
Для выявления первичной структуры в чугуне	Молочная кислота 30 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить при комнатной температуре одну - две минуты. Богатые фосфором участки остаются светлыми
Для выявления микроструктуры чугунов с высоким содержанием углерода и хрома	Пикриновая кислота 5 г; соляная кислота 5 мл; хлорное железо 2 г; этиловый спирт 100 мл	Травить при комнатной температуре, время травления подбирать. Участки гамма-фазы выявляются за 10 -15 с, дельта-фазы – за несколько минут. Если реактив действует слабо, рекомендуется травить в горячем 5 - 10 % - ном растворе соляной кислоты с небольшим количеством хлорного железа
Для выявления структуры чугуна	1 % - ный раствор брома в метиловом спирте	Травить при комнатной температуре обычным способом

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления дендритной структуры в серых чугунах и в чугунах с шаровидным графитом	Хлорное железо 4 г; серная кислота 40 мл; сернокислый натрий 2 г; вода 100 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре. Дендритная структура хорошо выявляется без повторных перешлифовок. Одновременно выявляется расположение графита в дендритной структуре и зерна эвтектики. рекомендуется последующее легкое полирование

Таблица 3.1.16 Твердые сплавы

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры твердых сплавов с кобальтом, титаном, танталом, карбидами и др	3 % - ный водный состав перекиси водорода	Травить в кипящем растворе обычным способом. Время подбирать эмпирически в зависимости от состава сплава
Для выявления структуры металлокерамических сплавов кобальта с карбидами вольфрама, молибдена, тантала	Азотная кислота 20 мл; уксусная кислота 30 мл	Травить погружением при комнатной температуре в свежеприготовленном реактиве. Время подбирать эмпирически в зависимости от состава сплава
Для выявления микроструктуры металлокерамических сплавов кобальта с карбидом тантала	Хлорная медь 8 г; 25 % - ный водный раствор аммиака 100 мл	Травить погружением или протиранием тампоном от одной до 10 минут. Твердый раствор и эвтектика окрашиваются, карбиды не травятся
Для выявления микроструктуры сплавов спекания системы кобальт – карбид молибдена	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20-30 мл; глицерин 20-30 мл	Шлиф до травления подогреть в горячей воде или пользоваться нагретым реактивом. Продолжительность травления в свежеприготовленном реактиве 10-40 с и более. Можно применять многократное травление с переполировкой
Для выявления микроструктуры металлокерамических сплавов систем карбиды – кобальт (вольфрам, молибден, хром). Выявляются избыточные и эвтектические карбиды. Твердый раствор не травится	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить в холодном или горячем (60 - 80°C) свежеприготовленном реактиве от двух до 10 минут
Для выявления микроструктуры сплавов спекания систем углерод – кобальт, карбид молибдена – кобальт и карбид тантала - углерод	Плавиковая кислота 10 мл; азотная кислота 10 мл	Травить погружением в нагретой безводной смеси кислот одну и более минут
Для выявления микроструктуры металлокерамических сплавов систем кобальт – карбид (вольфрама, молибдена, тантала и др).	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 30 мл	Травить погружением или натиранием тампоном 5-60 с и более Реактив готовить за 24 ч до употребления. На карбиды реактив не действует
Для выявления микроструктуры сплавов спекания с MoC – Co и C - Co	20 % - ный водный раствор азотной кислоты	Травить 15 - 30 мин в реактиве при комнатной температуре

Таблица 3.1.17 Покрытия на сталях

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры медных и никелевых покрытий на сталях	10 – 30 % - ный раствор азотной кислоты в воде	Травить при температуре реактива 50 -80°C 5 -20 с
Для выявления микроструктуры цинковых покрытий на железе и сталях. При травлении выявляются фазы Fe ₃ Zn ₂ (окрашивается в лимонно-желтый цвет), фаза FeZn ₇ (окрашивается в сиреневато-белый цвет) и фаза FeZn ₃ (окрашивается в коричневый цвет)	Пикриновая кислота 0,2 г; этиловый спирт 10-20 мл; вода 60 мл	Травить и полировать несколько раз до выявления структуры. Время травления от нескольких секунд до двух минут. Раствор должен быть свежим. Основной металл травить обычными реактивами. Для сохранения боковой поверхности шлифа рекомендуется покрыть ее лаком
Для выявления микроструктуры медных, никелевых и хромовых покрытий на сталях	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 10 мл	Реактив применять в горячем (до 70°C) состоянии. Травить последовательно одну минуту в соляной кислоте, затем после промывки 2 -3 с в азотной кислоте
Для выявления микроструктуры оловянистых покрытий на железе и стали	10 % - ный водный раствор персульфата аммония 50 мл; 28 % - ный водный раствор винной кислоты 2 мл	Травить погружением 20 - 120 с при комнатной температуре
Для выявления микроструктуры цинковых покрытий на железе и сталях	Красная кровяная соль 1 г; гидрат оксида аммония 4 мл; этиловый спирт 20 мл; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре 15 - 30 с. Шлиф промыть сначала в амиловом спирте, затем в бутиловом
Для выявления микроструктуры никелевых и хромовых покрытий на сталях	Насыщенный водный раствор хромпика 50-100 мл; серная кислота 10 мл	Травить при комнатной температуре несколько минут
Для выявления микроструктуры цинковых и кадмиевых покрытий на железе и сталях	Йод кристаллический 10 г; йодистый калий 20-30 г; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре обычным способом
Для выявления микроструктуры оловянных покрытий на сталях	Азотнокислое серебро 5 -10 г; вода 100 мл	Травить на холоде обычным способом
Для выявления микроструктуры цинковых покрытий на сталях	Хромовый ангидрид 10 г; соляная кислота 1 мл; вода 100 мл	Травить на холоде обычным способом
Для выявления микроструктуры цинковых, оловянных и других покрытий на сталях	2 -5 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить обычным способом
Для выявления структуры хромовых и никелевых покрытий на сталях	Насыщенный водный раствор хромпика 50-100 мл; серная кислота 10 мл	Травить при комнатной температуре несколько минут
Для выявления структуры цинковых покрытий на сталях	Красная кровяная соль 1г; гидрат окиси аммония 4 мл; этиловый спирт 20 мл; вода 100 мл	Травить обычным способом 15-30 с, затем шлиф необходимо промыть сначала в амиловом спирте, затем в бутиловом

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры оловянистых покрытий на сталях	10 % - ный водный раствор персульфата аммония 50 мл; 28 % - ный водный раствор винной кислоты 2 мл	Травить погружением на 20 -120 с при комнатной температуре
Для выявления структуры цинковых и кадмиевых покрытий на железе и сталях	Йод кристаллический 10 г; йодистый калий 20-30 г; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре 5-10 с Осажденные продукты травления удалять легкой полировкой. Рекомендуется реактив разбавлять равным количеством воды
Для выявления структуры цинковых покрытий на сталях	Хромовый ангидрид 10 г; соляная кислота 1 мл; вода 100 мл	Травить чередуя с переполировкой 15 -60 с. Соляную кислоту добавлять перед употреблением

Таблица № 3.1.18 Упрочняющие слои на сталях

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры и глубины азотированного и цементированного слоев в сталях	А 4%-ный раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте; Б 4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить обычным способом смесью растворов А и Б в соотношении 10: 1
Для выявления борированного слоя стали. При травлении борид железа Fe ₂ B окрашивается в голубой (иногда в коричневый) цвет, борид Fe ₂ B – в желтый	Пикриновая кислота 2-5 г; едкий натр 20-25 г; вода 75-100 мл	Травить в горячем, но не кипящем растворе. Время травления – 30-50 с и более. Приготовленный раствор хранить в темной герметичной посуде и должен иметь щелочную реакцию
Для выявления структуры азотированного слоя хромоникелевых, хромованадиевых и других сталей	Сернокислая медь 1,25 г; хлорная медь 2,5 г; хлористый магний 10 г; соляная кислота 2 мл; вода 100 мл этиловый спирт 1000 мл	Сначала все компоненты растворить в воде, затем полученный раствор разбавить спиртом. Состав раствора должен быть очень точным. Травить погружением в холодный раствор до одной минуты и более
Для выявления структуры азотированного слоя на сталях	А. Хлористая ртуть 1 г; соляная кислота 20 мл; этиловый спирт до 100 мл Б. Хлорная медь 1 г; хлорный магний 10 г; соляная кислота 40 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить погружением на несколько секунд последовательно в раствор А и Б. Растворы должны быть свежими и использоваться однократно
Для определения глубины азотированного слоя в сталях	Соляная кислота 100 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл;	Травить погружением на 1-2 мин с последующей промывкой теплой водой и спиртом. Можно применять многократное травление с переполировкой, можно пользоваться нагретым до 50 -70°C реактивом, можно воду частично заменить спиртом
Для выявления структуры поверхностных слоев после: азотирования, цементации и т.д.	0,5 – 6 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте;	Травить при комнатной температуре. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких мин в зависимости от природы металла и концентрации реактива
Для выявления структуры поверхностного слоя стали после электроискровой обработки	Гипосульфит натрия 30 г; метабисульфит калия или натрия 2 г; вода 100 мл	Травить шлиф в реактиве до образования темно-коричневого налета (время травления подбирают). Затем промывать водой, спиртом и высушивать
Для выявления структуры поверхностного слоя стали после электроискровой обработки	Метол 10 г; вода 100 мл	Травить обычным способом. Метол можно заменить двойным количеством гидрохинона

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры поверхностного слоя стали после электроискровой обработки	8 % - ный водный раствор красной кровяной соли 100 мл; 50 % - ный водный раствор соляной кислоты 50 мл	Травить обычным способом на холоде
Для выявления структуры поверхностного слоя сталей и феррохрома после электроискровой обработки	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить в кипящем растворе обычным способом. Реактив хранить в темной посуде и использовать свежеприготовленным
Для выявления структуры поверхностного слоя сталей после электроискровой обработки	Хлорное железо 1-25 г; соляная кислота 1-50 мл; вода 100 -120 мл	Травить протиранием поверхности шлифа тампоном в течение 10 - 60 сек. Для сокращения времени травления употреблять более концентрированный раствор, но в указанных пределах.
Для выявления структуры поверхностного слоя сталей после электроискровой обработки	Соляная кислота 100 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл	Травить погружением на 1 -2 мин с последующей промывкой теплой водой и спиртом. Можно применять многократное травление с переполнкой. Можно пользоваться нагретым до 50 -70°C реактивом
Для выявления структуры и глубины азотированного и цементированного слоя в стали	А. 4 % - ный раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте Б. 4 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить в смеси растворов А и Б в соотношении 10:1 обычным способом
Для выявления микроструктуры азотированного слоя на сталях	Плавиковая кислота 10 мл; соляная кислота 15 мл; вода 90 мл	Травить при комнатной температуре 10 -20 с и более, затем шлиф промыть теплой водой, погрузить на 1 -2 с в азотную кислоту и промыть

Таблица 3.1.19 Сварные и паяные соединения сталей

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры припоев при пайке сталей	Соляная кислота 5 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить от нескольких секунд до нескольких минут в холодном растворе
Для выявления структуры медных и латунных припоев для пайки углеродистых сталей	10-30 % - ный водный раствор аммиака	Травить погружением или смачиванием тампоном при комнатной температуре
Для выявления неоднородностей, возникающих в результате сварки углеродистых и легированных сталей, а также дефектов в виде трещин и пузырей	10 - 25 % - ный водный раствор азотной кислоты	Травление проводить на холоде с помощью тампона (для больших поверхностей) или погружением. Травить 3 - 30 мин с последующей тщательной промывкой
Для выявления структуры стали после дуговой наплавки и сварки	Соляная кислота 3 - 5 мл; пикриновая кислота 1-4 мл; этиловый спирт 95-100 мл	Травить на холоде до 40 с. Иногда рекомендуется многократное травление с переполнкой от двух до 10 минут
Для выявления первичной структуры при сварке или наплавке углеродистых и среднелегированных сталей	А. Пикриновая кислота 1г; соляная кислота 4 мл; этиловый спирт 100 мл; Б. Соляная кислота 4 мл; хлористая медь 5 г; этиловый спирт 25 мл; вода 30 мл;	Шлиф сначала травить несколько раз по одной минуте в растворе А с промежуточными переполнками, затем промыть проточной водой и высушить спиртом. После чего шлиф травить 1-2 с в растворе Б и промыть в проточной воде
Для выявления неоднородностей, возникающих при сварке сталей	10 -25 % - ный водный раствор азотной кислоты в воде	Травить на холоде с помощью тампона (для больших поверхностей) или погружением на 3 -30 мин с последующей тщательной промывкой

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры аустенитоферритных сварных швов	14 % - ный водный раствор персульфата аммония 10 мл; 50 % - ный водный раствор соляной кислоты 20 мл; насыщенный спиртовой раствор ортонитрофенола 10 мл	Перед травлением шлиф нужно промыть спиртом, затем погрузить при комнатной температуре в свежий реактив на 15 -30 с, затем промыть водой
Для выявления макроструктуры сварных швов из нержавеющей сталей	Плавиковая кислота 1-5 мл; азотная кислота 1-5 мл; вода 98 - 90 мл	Травить в нагретом до 60 -70°C растворе несколько часов
Для выявления макро- и микроструктуры сварных швов из углеродистых и легированных сталей	Азотная кислота 25 мл; метиловый спирт 75 мл; нитробензол 80 мл	Реактив составлять введением раствора азотной кислоты в безводном метиловом спирте в нитробензол с последующей выдержкой в темной посуде около месяца. Травить погружением на 10 -30 с, образующуюся пленку стирать крепким водным раствором оксида натрия, затем шлиф промывать водой или спиртом
Для выявления макроструктуры сварных швов из сталей	Йод кристаллический 10 г; йодистый калий 20-30 г; вода 100 мл	Травить на холоде 5 -10 с. Осажденные продукты травления удалять легкой полировкой
Для выявления макроструктуры сварных швов малоуглеродистой стали	Хлористоаммиачная медь 5-15 мл; вода до 100 мл	Шлиф погрузить шлифованной поверхностью вверх на время до одной минуты, затем промыть в струе воды и одновременно удалять ваткой темный налет. Налет можно также удалить раствором аммиака. В процессе травления следить, чтобы на шлифе не было пузырьков воздуха
Для выявления макроструктуры сварных швов из сталей	А. Пикриновая кислота 4-6 г; этиловый спирт 100 мл; Б. Насыщенный спиртовой раствор йода	Шлиф травить на холоде несколько секунд в растворе А, слегка очистить тампоном и перенести на 5 -6 мин в раствор Б. Для увеличения контраста его можно слегка полировать
Для выявления макро- и микроструктуры сварных швов сталей	Хлорная медь 10 г; хлористый магний 40 г; соляная кислота 20 мл; вода и этиловый спирт до 1000 мл	При составлении реактива необходимо сначала растворить все соли и кислоту в небольшом количестве воды (50 мл), затем долить спирта до 1000 мл раствора. Воды в реактиве должно быть всего 20-25 % иначе чувствительность реактива снижается
Для выявления структуры в сварных швах и зонах пайки аустенитной стали	Уксусная кислота 100 мл; вода 100 мл; перекись водорода 0,5 мл;	Травить погружением 0,5 – 3 мин и более Перекись водорода добавлять перед употреблением

3.2 ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Таблица № 3.2.1 Стали

Металл	Состав электролита	Режим электротравления			
		Е В	D_a А/дм²	t °С	T мин
Сталь низко- и среднеуглеродистая (границы зерен феррита)	Сернокислородное железо 3 %; вода 97 %	6 -8	10-20	20	20-40
Сталь ШХ-15 (феррит и перлит)	Хромовый ангидрид 10 %; вода 90 %	4 -6	10 -20	20	
Сталь ШХ-15 (феррит и перлит)	Соляная кислота 10 %; этиловый спирт 90 %	4 -6	10-20	10-20	5-10

<i>Металл</i>	<i>Состав электролита</i>	<i>Режим электроотравления</i>			
		<i>Е В</i>	<i>D_a А/дм²</i>	<i>t °С</i>	<i>Т мин</i>
Углеродистые и низколегированные стали	Соляная кислота 4 мл; пикриновая кислота 1 г; спирт 100 мл	2 -5	8 -12	10-20	10-20
Стали (цементит)	Хромовый ангидрид 10 г; вода 100 мл	6 -10	10 -20	20	20-40
Стали (цементит)	Пикриновая кислота 2 г; едкий натр 25 г; вода 100 мл	5 - 6	0,5–2,5	20	30 -120
Стали ферритные	Хлорное железо 100 г; соляная кислота (плотность 1,19) 3 мл; вода 100 мл	2 - 4	0,2-0,3	15 -20	30 -120
Стали ферритные	Хлораммиакат меди 0,5 г; вода 100 мл	4 - 6	0,5	15- 25	30
Стали кремнистые (0,085 углерода, 4% кремния)	Азотная кислота 0,2 %; вода 99,8 %	2	2-4	50	120
Стали кремнистые (0,085 углерода, 4% кремния)	Гипосульфит 0,5 %; вода 99,5 %	7,5 -8,5	1-2	50	15
Стали хромоникелевые	Уксусная кислота 10 %; серная кислота 1 %; вода 89 %	2,7	5,6	Менее 20	2 -15
Стали хромоникелевые	Серная кислота 5 %; вода 95 %	1,5	2,5	Менее 20	50
Стали хромистые	Щавелевая кислота 10 %; вода 90 %	4 - 6	10 - 20	10 -20	30 -40
Стали высоколегированные в т.ч. быстрорежущие	Лимонная кислота 45 г; йодистый калий 30 г; соляная кислота 5 мл; вода 1000 мл	2,5	2 - 3	10 -15	10 с
Стали высоколегированные в т.ч. быстрорежущие	Хромовый ангидрид 10 %; вода 90 %	4 - 6	10-20	10 -15	20 -40
Сварные швы углеродистых низколегированных и высоколегированных сталей	Хромовый ангидрид 20 г; вода 100 мл	3	1-5	15 -25	10-30
Сварные швы углеродистых низколегированных и высоколегированных сталей	Гидроокись кальция 10 %; вода 90 %	2,5	1-2	10 -25	0,5 – 5

Таблица 3.2.2 Чугуны

<i>Металл</i>	<i>Состав электролита</i>	<i>Режим электроотравления</i>			
		<i>Е, в</i>	<i>D_a, а/дм²</i>	<i>t °С</i>	<i>Т мин</i>
Чугуны (цементит) универсальный	Красная кровяная соль 10 %; вода 90 %	6	10-12	10-20	30-50
Чугуны (цементит) универсальный	Марганцовистый калий 4 г; едкий натр 4 г; вода 100 мл	10-12	10-20	15-20	60-180
Чугуны (карбиды)	Цианистый натр 10 г; вода 100 мл	6	1 - 2	10-15	5

Глава 4

НАИБОЛЕЕ УПОТРЕБЛЯЕМЫЕ РЕАКТИВЫ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ХИМИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ТРАВЛЕНИЕМ

Цветные металлы в зависимости от их физико-химических свойств подразделяют на группы, включающие следующие основные металлы :

1. Легкие цветные металлы (алюминий, бериллий, магний, титан)
2. Тяжелые цветные металлы (медь, никель, олово, свинец, хром, цинк)
3. Малые цветные металлы (висмут, вольфрам, кадмий, кобальт, кремний, молибден, ниобий, сурьма, тантал, цирконий)
4. Благородные цветные металлы (золото, палладий, платина, серебро)
5. Редкие металлы (гадолиний, галлий, германий, гольмий, диспрозий, европий, индий, иридий, лантан, мышьяк, осмий, селен, теллур, церий)
6. Радиоактивные металлы (торий, уран)

ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

4.1 Легкие цветные металлы

Таблица 4.1.1 Реактивы для выявления структуры алюминиевых сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры сплавов типа алюминий – медь – железо -марганец, алюминий -медь-железо и других алюминиевых сплавов, а также границы зерен в алюминии	Серная кислота 5 -20 мл; вода до 100 мл	В нагретом реактиве (до 70°C) травить 5 -30 с и охлаждать в холодной воде. В результате травления FeAl ₃ темнеет; CuAl ₂ и NiAl ₃ не травятся. В сплавах с марганцем гамма-фаза темнее бета-фазы. В сплавах Al-Mg-Si травится фаза Mg ₂ Si
Для выявления микроструктуры алюминиевых сплавов с кремнием, особенно эвтектического состава, для изучения дисперсных выделений из твердого раствора в сплавах алюминий-медь, а также аномальной кристаллизации эвтектики в заэвтектических алюминиевых сплавах	Едкий натр 15 г; красная кровяная соль 8 г; вода 100 мл	Травить в холодном или горячем (60-80°C) свежеприготовленном реактиве несколько минут. Реактив хранить в темной посуде
Для быстрого определения оксидов алюминия в алюминиевых сплавах	Пересыщенный водный раствор нитрата бериллия (возможно применение солей магния и других элементов, оксиды которых образуют с оксидами алюминия соединения типа шпинелей)	Реактив нагреть до 100 – 250°C, поместить в него на 3 -5 мин исследуемый шлиф, затем промыть в воде и высушить
Для выявления микроструктуры сплавов алюминия. В сплавах алюминий-кремний-магний твердый раствор не травится, силицид магния становится темно-фиолетовым, после дополнительной полировки – светло-голубым	Серная кислота 4 мл; плавиковая кислота 4 мл; хромовый нгидрид 2 г; вода 90 мл	Травить погружением в реактив при комнатной температуре на 5 - 20 с

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры алюминиевых сплавов	Едкий натр 1г; двууглекислая сода 1 г; насыщенный раствор хлористого олова 4 мл вода до 100 мл	Травить смачиванием тампоном до появления темного налета, удаляемого азотной кислотой. Хлористое олово можно заменить хлористым цинком
Для выявления микроструктуры медьсодержащих алюминиевых сплавов. Интерметаллиды с медью темнеют, другие включения не травятся	Азотнокислое железо 5-10 г; вода 100 мл	Азотнокислое железо готовить растворением чистого железа в азотной кислоте до насыщения. Полученный раствор смешивать с водой до 5-10 % - ной концентрации. Воду можно заменить равным количеством этилового спирта. Время травления 2-5 мин при комнатной температуре
Для выявления микроструктуры алюминия и его сплавов. Интерметаллиды с медью темнеют, с железом – не травятся	Сернокислое железо 5-10 г; вода 100 мл	Травить погружением на 2 -3 мин в реактив при комнатной температуре
Для выявления микроструктуры алюминия и его сплавов. Интерметаллидные фазы травятся сильнее	Азотная кислота 1-5 мл; соляная кислота 2-3 мл; плавиковая кислота 1-5 мл; вода 90 -96 мл	Травить погружением шлифа в реактив при комнатной температуре 10 -20 с. Можно чередовать полировку и травление. Интерметаллидные фазы травятся сильнее
Для выявления микроструктуры алюминия и его сплавов с цинком, магнием, кремнием, хромом, марганцем, литием, кадмием и др., а также тройных сплавов алюминия. При кратковременном травлении обнаруживается контраст между алюминиевой основой и $FeAl_3$. При более длительном травлении окрашивает в темно-коричневый цвет $CuAl_2$ и $NiAl_3$, причем последний окрашивается скорее. Al_3Mg_2 не травится	Едкий натр 5-10 мл; вода 80 -95 мл	Травить при комнатной температуре до 2 мин или в горячем реактиве несколько секунд. Темный налет с поверхности шлифа удалять погружением в азотную кислоту или в насыщенный раствор хромовой кислоты. Воду можно заменять спиртом. В этом случае время травления увеличивать
Для выявления структуры литых и деформированных алюминиевых сплавов. При изменении 2 - 3 % раствора 10 -40 с алюминиевая основа не травится, соединения с железом и никелем окрашиваются в коричнево-желтый цвет, с кремнием – в пурпурный. Растворы более высокой концентрации травят все интерметаллидные фазы	Плавиковая кислота 0,5 -10 мл; вода до 100 мл	Травить погружением или с помощью тампона 10-20 с, затем следует промывка теплой водой. Образующийся на поверхности шлифа темный осадок можно удалить погружением на несколько секунд в азотную кислоту. Воду можно частично заменить спиртом
Для цветного травления сплавов алюминия с медью	Марганцовокислый калий 4 г; едкий натр 1-4 г; вода 100 мл	До травления шлиф подвергать гомогенизирующему отжигу при 540°C с медленным (20-30 ч) охлаждением до 50°C. Травить при комнатной температуре 15 -20 с. В результате зерна в зависимости от легирующих элементов окрашиваются в разные цвета
Для выявления микроструктуры алюминия и его сплавов. Соединения с никелем имеют коричневый цвет	Двууглекислая сода 5 -20 г; вода 100 мл	Травить в кипящем реактиве несколько секунд. Образующиеся на шлифе темные пленки удалять раствором азотной кислоты. Промывать шлиф теплой водой и высушивать струей воздуха
Для выявления микроструктуры большинства алюминиевых сплавов	Ортофосфорная кислота 8 мл; хромовый ангидрид 0,5 г; перекись водорода 0,5 мл; вода 200 мл	Травить на холоде на время от нескольких секунд до одного часа. Наиболее быстро травятся многофазные структуры. Перекись водорода добавлять непосредственно перед употреблением

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры большинства алюминиевых сплавов	Азотная кислота 10 -20 мл; плавиковая кислота 10 -20 мл; глицерин 20 -60 мл	Травить рекомендуется при комнатной температуре 10-20 °С, затем шлиф промывать теплой водой. В железосодержащих алюминиевых сплавах эвтектика не травится, если количество железа менее 2,5 %. При большем содержании железа отдельные кристаллы соединений железа с алюминием становятся серо-голубыми. В сплавах с железом и медью сложные интерметаллические фазы окрашиваются
Для выявления микроструктуры большинства алюминиевых сплавов	Хромовая кислота 20 г; сульфит натрия безводный 2 г; соляная кислота 17 мл; вода 100 мл	Сплавы сначала травить обычным способом (10 % - ным раствором едкого натра), затем 50 % - ным раствором азотной кислоты. После промывки шлиф немедленно высушить сжатым воздухом
Выявляет микроструктуру деформируемых сплавов, а также фазы по границам зерен после старения	А. Азотная кислота 25 мл; вода 75 мл; Б. Фтористый натрий 0,5 г; азотная кислота 1 мл; соляная кислота 2 мл; вода до 100 мл	Травить погружением до 60 с в нагретом до 60-70°С растворе А, затем охлаждать в струе воды и погружать в раствор Б на 10-30 с
Для выявления микроструктуры большинства алюминиевых сплавов. В сплавах алюминий – кремний фазы FeAl ₃ и FeAl ₄ Si ₂ окрашиваются в голубой цвет. 10 % - ный водный раствор желтой кровяной соли окрашивает в сплавах алюминий-никель и алюминий-медь-никель фазу Al ₂ Ni в темно-серый, Al ₃ Ni - в светло-серый, CuAl ₂ - в коричневый цвет. Реактив без желтой кровяной соли применяется для выявления микроструктуры сплавов алюминия с бериллием	10 % - ный раствор желтой кровяной соли 5 мл; плавиковая кислота 5 мл; азотная кислота 5 мл; перекись водорода 50 мл; вода 100 мл	Раствор желтой кровяной соли готовить отдельно и прибавлять к остальному раствору перед употреблением. Реактив растворять в указанном порядке. Время травления подбирать эмпирически
Для выявления макроструктуры сплавов алюминия, особенно больших образцов	Серная кислота 10 мл; плавиковая кислота 10 мл; вода 80 мл	Травить на холоде, время травления до 30 минут
Для выявления микро - и макроструктуры алюминиевых сплавов	Ортофосфорная кислота 10 мл; плавиковая кислота 5 мл; вода 85 мл	Травить на холоде, время травления до 30 минут. Плавиковую кислоту можно заменить на равное количество соляной кислоты
Для испытания алюминиевых сплавов на межкристаллическую коррозию	Хлористый натрий 3 г; соляная кислота 2 мл; вода 100 мл;	Хорошо обезжиренный образец погрузить в реактив на время до 20 -24 ч, после слегка полировать, промыть и высушить Шлиф изучают через 2 ч после сушки
Для выявления макроструктуры алюминиевых сплавов	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 10 мл; плавиковая кислота 20 мл; вода 40 мл;	Травить на холоду обычным способом .После травления макрошлиф промыть водой и нейтрализовать раствором соды
Для выявления макроструктуры алюминиевых сплавов	10-20 % - ный раствор едкого натра в воде	Травить на холоде несколько минут. Темный налет с поверхности шлифа удалять погружением в азотную кислоту или насыщенный раствор хромовой кислоты в воде
Для выявления макроструктуры литых и деформируемых алюминиевых сплавов	Хлорное железо 5-25 г; соляная кислота 5-50 мл; вода 100-120 мл;	Травить протиранием поверхности шлифа тампоном на холоде 10 -15 с

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления макроструктуры алюминиевых сплавов и их сварных швов	Едкий натр 150-200 г; вода 1000 мл	Травить в горячем растворе. Темный налет удалять протираанием шлифа в азотной кислоте, затем промыть в воде и высушить
Для выявления макроструктуры алюминиевых сплавов и их сварных швов	Хлорное железо 5-10 г; соляная кислота 10-20 мл; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре. Темный налет удалять протираанием шлифа в азотной кислоте, затем промыть в воде и высушить
Для выявления микроструктуры большинства алюминиевых сложнотермически обработанных сплавов	10 % - ный водный раствор желтой кровяной соли 5 мл; плавиковая кислота 5 мл; азотная кислота 5 мл; перекись водорода 50 мл; вода 100 мл	Раствор желтой кровяной соли готовить отдельно и прибавлять к основному раствору перед употреблением. Реактивы растворять в указанном порядке. Время травления подбирать эмпирически
Выявляет структуру большинства алюминиевых сплавов	Хлористоаммиачная медь 5 – 15 г; вода до 100 мл	Шлиф погрузить полированной поверхностью вверх в реактив на время около одной минуты, затем промыть в струе воды и одновременно удалять ваткой темный налет. Налет можно также удалять раствором аммиака. В процессе травления надо следить, чтобы на поверхности шлифа не было пузырьков воздуха
Выявляет структуру сплавов типа алюминий - магний, алюминий - кремний, алюминий – медь - никель, алюминий-медь – марганец, алюминий – магний - кремний, алюминий – медь – магний	10 -25 % ная азотная кислота 10 мл; вода - остальное	Травить погружением на 10 -40 с в нагретый до 70°C раствор невысокой концентрации (10 - 25 %), затем шлиф быстро охладить в холодной воде. В результате травления фазы CuAl_2 , NiAl_3 , Mg_2Si чернеют, FeAl_3 становится пурпурной. Если травить 2-3 с, то фаза CuAl_2 в сплавах алюминий - медь окрашивается в цвет от голубого до коричневого. Остальные интерметаллиды остаются светлыми
Выявляет структуру высокопрочных алюминиевых сплавов алюминий –цинк - магний	Соляная кислота 2 мл; вода до 100 мл;	Травить погружением на время до трех минут, затем шлиф промыть и высушить
Выявляет структуру сплавов алюминия с медью	Пикриновая кислота 3 -5 г; этиловый спирт до 100 мл	Травить на холоде любым способом, время травления подбирают. После травления фаза SiAl темнеет, остальные фазы не травятся
Выявляет структуру литых сплавов алюминий – марганец	Соляная кислота 10 мл; азотная кислота 30 мл; вода 10 мл	Травить в нагретом до 40-45°C растворе 25-30 с
Выявляет структуру большинства алюминиевых сплавов	Азотная кислота 1 -5 мл; плавиковая кислота 1 -5 мл; соляная кислота 2 - 3 мл; вода 90 -95 мл (реактив Келлера)	Травить погружением при комнатной температуре, промывка холодной водой

Таблица 4.1.2 Реактивы для выявления структуры бериллия и его сплавов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры бериллия и некоторых его сплавов	А. 10 %-ный водный раствор бифторида аммония 10 мл; глицерин 10 мл; Б. Азотная кислота 20 мл; вода 80 мл	Травить обычным способом последовательно в растворах А и Б
Для выявления структуры бериллия и его сплавов	Смесь равных количеств азотной, соляной, плавиковой кислот и воды	Травить при комнатной температуре обычным способом, затем промыть водой
Для выявления структуры бериллия и его сплавов	20 %- ный раствор щавелевой кислоты	Травить в кипящем растворе, протирая тампоном, несколько минут. Промывать водой

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры бериллия с железом, алюминием, кремнием, титаном, цирконием и т.д. При этом соединения с алюминием почти не травятся, с кремнием окрашиваются в голубовато – коричневый цвет, карбиды и нитриды сереют	Плавиковая кислота 2 мл; вода до 100 мл	Травить погружением или протирать тампоном 10 -20 с, затем промыть водой и высушить. Воду можно частично заменить спиртом
Для выявления структуры соединений бериллия с железом и углеродом (окрашиваются в бурый цвет), с цирконием (в голубой цвет), соединения с магнием не травятся	10 % - ный водный раствор плавиковой кислоты	Травить при комнатной температуре несколько секунд. При травлении бериллиевых сплавов рекомендуется нагреть шлиф в горячей воде
Для выявления границ зерен бериллия	Азотнокислое серебро 5 г; вода до 100 мл	Травить с помощью тампона при комнатной температуре 20 -120 с. Если через несколько секунд образуется на шлифе рыхлый осадок, его быстро смывать теплой водой
Для выявления границ зерен бериллия же	Хлорное золото 0.5 г; соляная кислота 50 мл; вода 100 мл	Шлиф травить на холоде 10 -15 с, затем быстро промыть и травить две минуты ниталем. Затем снова промыть и слегка полировать. После этого шлиф необходимо промыть спиртом и высушить струей воздуха
Для выявления границ зерен бериллия и его сплавов	Серная кислота 5-20 мл; вода до 100 мл	Травить на холоде несколько секунд

Таблица 4.1.3 Реактивы для выявления структуры магниевых сплавов

Область применения	Состав травителя	Применение
Выявляет структуру магниевых сплавов. Рекомендуется для изучения структуры при небольших увеличениях	Пикриновая кислота 4мг; ортофосфорная кислота 0,7 мл; этиловый спирт 100 мл	Шлиф погрузить полированной поверхностью вверх на время менее 10 с до появления пятен на поверхности, затем промыть водой и ацетоном
Выявляет микроструктуру магниевых сплавов с алюминием, марганцем, цинком в различных состояниях. Включения никеля и меди окрашиваются в серый цвет	Винная кислота 10 г, вода 100 мл	Травить 10-20 с, затем промыть водой и ацетоном
Выявляет микроструктуру всех магниевых сплавов	Пикриновая кислота 5 г, уксусная кислота 5 мл, этиловый спирт 100 мл, вода 10 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном 5 -120 с. Соотношение кислот можно изменять от 1:20 до 10:1
Выявляет микроструктуру большинства магниевых сплавов. У магниевых сплавов травятся сначала основа – твердый раствор и включения – интерметаллиды типа Mg_4Al_3 и Mg_2Cu . У чистого магния травятся границы зерен	Соляная кислота 2 -50 мл; этиловый спирт, до 100 мл	Травить при комнатной температуре. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких минут. Промыть в воде, сушить воздухом
Выявляет микроструктуру магниевых сплавов. В результате травления основа – твердый раствор темнеет в зависимости от продолжительности травления. Фазы Mg_4Al_3 и Mg_2Cu изменяют окраску от белой до голубой и розовой, фаза $Mg_2Cu_3Al_2$ сереет	Соляная кислота 2 мл; вода 98 мл	Травить погружением при комнатной температуре от одной до 10 мин, затем промыть в воде, сушить воздухом

Область применения	Состав травителя	Применение
Выявляет микроструктуру магниевых сплавов	Пикриновая кислота 3-5 мл, этиловый спирт до 100 мл	Травить на холоде. Время травления до нескольких минут (зависит от состава и состояния сплава). Раствор должен быть свежим
Для выявления микро- и макроструктуры сплавов системы магний – марганец. Включения никеля и меди окрашиваются в серый цвет	Муравьиная кислота 5 г; азотная кислота 2 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить смоченным в реактиве тампоном 5 -20 с, затем промыть теплой водой и потом ацетоном. Азотную кислоту можно исключить из состава
Для большинства сплавов	А. 10 % - ный водный раствор плавиковой кислоты; Б. 5 % - ный спиртовой раствор пикриновой кислоты 10 мл; вода 100 мл	Травить втиранием тампоном раствора А одну – две секунды, затем промыть водой, затем спиртом и просушить. После этого нанести тампоном раствор Б, опять промыть и высушить. Можно применять водный раствор пикриновой кислоты. Для сплавов сложного состава можно применять раствор А с добавкой 1 -2 % хлористого олова
Для выявления макро- и микроструктуры большинства литейных и деформируемых магниевых сплавов	Пикриновая кислота 5 г; уксусная кислота 5 мл; этиловый спирт 100 мл; вода 10 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном 5 -120 с. Соотношение кислот можно изменять от 1 : 20 до 1:1
Для выявления макро- и микроструктуры магниевых сплавов в разных состояниях, особенно средне- и высоколегированных	Щавелевая кислота до 5 г; вода до 100 мл	Поверхность шлифа протирать тампоном, смоченным реактивом несколько секунд, затем промыть водой
Для выявления структуры сплавов в литом, ковном и термически обработанном состояниях. Включения с никелем и медью окрашиваются	2 % - ный водный раствор азотной кислоты 10 мл; 5 % - ный водный раствор яблочной кислоты 10 мл	Травить 10 -30 с тампоном, смоченным в растворе, затем промыть теплой водой и ацетоном. Высушить шлиф воздухом
Для выявления структуры сплавов системы магний – алюминий, магний – марганец, магний – цинк в разных состояниях. Включения никеля и меди окрашиваются	Винная кислота до 10 г; вода 100 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном 10-20 с, промыть водой, затем ацетоном
Для выявления структуры сплавов системы магний-церий	Лимонная кислота до 10 г; вода 100 мл; Возможен реактив: смесь равных объемов 1 % - ных растворов лимонной и азотной кислот с глицерином	Шлиф протереть тампоном, смоченным в реактиве, 5 - 40 с, затем промыть в теплой воде. Воду можно заменить спиртом
Для выявления структуры сплавов в различных состояниях, особенно средне - и высоколегированных	Щавелевая кислота до 5 г; вода 100 мл	Шлиф протереть тампоном, смоченным в реактиве, несколько секунд, промыть водой
Для выявления структуры кованых и термически обработанных конструкционных сплавов, а также сплавов систем магний – торий и магний- торий-цирконий	Уксусная кислота 20 мл; этилен - гликоль 60 мл; азотная кислота 1 мл; вода 20 мл	Травить тампоном, смоченным в реактиве, 5-20 с с последующей промывкой в горячей воде
Для выявления структуры термически упрочняемых сплавов после старения. Рекомендуется для изучения структуры при больших увеличениях	Азотная кислота 1мл; этилен -гликоль 75 мл; вода 24 мл	Травить погружением исследуемой поверхностью вверх до 60 с, затем промыть теплой водой
Для выявления структуры большинства магниевых сплавов	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 10 мл	Травить последовательно одну минуту сначала в соляной кислоте, затем (после промывки) 2 -3 с в азотной кислоте

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макро - и микроструктуры сплавов	5% раствор азотной кислоты в воде	Травить на холоде 5 -20 с. Промывка в теплой воде
Для выявления макроструктуры магниевых сплавов	А. Азотная кислота 10 мл; Б. Хлористый аммоний 25 г; вода 100 мл	Макрошлиф погрузить в реактив А до образования матово-серебристого оттенка поверхности; промыть, высушить; затем травить в реактиве Б 30 -60 с
Для выявления волокнистого строения деформированных магниевых сплавов	Двуххромовокислый калий 150 г; хромовый ангидрид 2 г; сернокислый аммоний 3 г; уксусная кислота 15 мл; вода 1000 мл	Макрошлиф нагревать 10 -20 мин до 150 -180°C и обезжирить при 50 -70°C 3 - 5 мин в растворе следующего состава: 50 г тринатрийфосфата + 5 -10 г едкого натра + 30 г жидкого стекла + 100 мл воды. После этого шлиф промыть холодной водой, затем 1-2 минуты нагретым до 60 -70°C 20 % - ным водным раствором хромового ангидрида и опять холодной водой. Далее шлиф подвергнуть окислению в указанном реактиве при 65 - 70°C в течение 2-3 минуты, промыть в холодной воде и смазать после сушки поверхность шлифа жидким маслом для увеличения контрастности и обеспечения сохранности шлифа. Операцией обезжиривания можно пренебречь, если поверхность макрошлифа не загрязнена

Таблица 4.1.4 Реактивы для выявления структуры титана и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макро- и микроструктуры титана и его сплавов	Плавиковая кислота 100 мл; глицерин (для макро - 100 мл) (для микро - 10 мл)	Травить на холоде на макроструктуру протиранием тампоном, на микроструктуру погружением. Время – до нескольких минут. При этом альфа-фаза травится сильнее бета –фазы
Для выявления структуры сплавов титана с хромом, ванадием, алюминием	Азотная кислота 10-20 мл; плавиковая кислота 10-20 мл; глицерин 20-60 мл	Травить на холоде. Продолжительность травления от нескольких секунд до 10 - 15 минут
Для выявления макро- и микроструктуры титана и титановых сплавов	Плавиковой кислоты 1-2 %- ный раствор в воде	Травить погружением или тампона в 10-20 с, затем шлиф промыть теплой водой. Образующийся на поверхности шлифа темный осадок можно удалить погружением на несколько секунд в азотную кислоту. Воду можно частично заменять спиртом
Для выявления границ зерен и двойников в титане. Реактив позволяет разделить альфа - и бета -фазы в хромотитановых и хроможелезотитановых сплавах	Плавиковая кислота 1-5 мл; азотная кислота 1-5 мл; вода 98-90 мл	Травить при комнатной температуре погружением на несколько минут, затем шлиф промыть теплой водой
Для выявления макроструктуры титановых сплавов	Соляная кислота 100 мл; фтористый натрий 3 г; вода 200 мл	Травить при комнатной температуре. Шлиф протирать тампоном
Для выявления макроструктуры сложнолегированных титановых сплавов	Плавиковая кислота 50 мл; азотная кислота 50 мл	Травить при комнатной температуре. Шлиф протирать тампоном

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления макроструктуры среднелегированных титановых сплавов.	Плавиковая кислота 150 мл; азотная кислота 100 мл	Травить смачиванием с быстрой последующей промывкой в воде и сушкой в струе воздуха, затем осветлить в концентрированной азотной кислоте с добавкой 2 – 5 %-ной плавиковой кислоты. Промывка холодной водой и осветление обязательны, особенно для сплавов типа ВТ14
Для выявления макроструктуры титана и его сплавов	Соляная кислота 250 мл; серная кислота 35 мл; вода 100 мл	Травить погружением шлифа в нагретый до 70 – 90°C реактив, продолжительность травления 15 – 20 с

4.2 Тяжелые цветные металлы

Таблица 4.2.1 Реактивы для выявления структуры баббитов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры баббитов	10 % - ный водный раствор персульфата аммония 50 мл; 28 % - ный водный раствор винной кислоты 2 мл	Травить погружением 20 -120 с. Промыть теплой водой, затем высушить воздухом
Для выявления структуры баббитов	Уксусная кислота 20 мл; этилен -гликоль 60 мл; азотная кислота 1 мл; вода 20 мл. Вода не обязательно	Травить тампоном 5 -120 с с последующей промывкой в горячей воде
Для выявления структуры баббитов	Хлорное железо 34 г; соляная кислота 1-50 мл; вода 100-120 мл	Варианты состава многообразны, зависят от состава и применения металла. Травить на холоде 10 -15 с обычным способом
Для качественного выявления структуры баббитов	Раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить обычным способом на холоде. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от природы и состояния металла и концентрации реактива. Для замедления травления в качестве растворителя применять амиловый спирт или глицерин
Для качественного выявления структуры баббитов	Соляная кислота 2-5 мл; этиловый спирт до 100 мл;	Травить обычным способом
Для выявления макроструктуры оловянистых баббитов	Раствор 1 – 10 % многосернистого аммония	Реактив готовить пропусканием от 2 до 3 ч сероводорода через 20 -25 %- ный водный раствор аммиака. В процессе насыщения сероводородом в раствор добавить тонкий порошок серы («серный цвет») из расчета 8 -10 г на 1 литр раствора. Приготовленный раствор должен иметь темный цвет. Травление производить под вытяжкой от 30 до 120 минут. Темный налет с поверхности шлифа удалить протираанием ваткой в струе воды

Таблица 4.2.2 Реактивы для выявления структуры меди и медных сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры сплавов медь - цинк. Богатые цинком составляющие в сплавах темнеют	Насыщенный водный раствор едкого натра 50 мл; насыщенный водный раствор азотнокислой меди 20 мл; лимонная кислота 2,5 г; вода 50 мл	Травить погружением на 10 -20 с, промывать водой
Для выявления структуры сплавов системы медь - цинк, медь -никель и др.	Цианистый калий 5 г; перекись водорода 0,5 мл; вода до 100 мл	Травить при комнатной температуре несколько секунд
Для выявления структуры меди и ее сплавов с никелем, свинцом, цинком и т.д. Бета-фаза в меднооловянных и медномарганцевокремниевых сплавах окрашивается	Соляная кислота 10 мл; азотная кислота 10 мл; серная кислота 5 г; жидкое мыло 5 г; насыщенный водный раствор двуххромовокислого калия 20 мл	Травить погружением до 30 с и более, затем промыть теплой водой
Для выявления структуры меди и однофазных ее сплавов	Двухлористая медь 4 г; соляная кислота 1000 мл	Хорошо отполированный и обезжиренный шлиф травить 5-6 мин, затем промыть водой, спиртом и высушить
Для выявления линий деформации в меди и медных сплавах	А. 15 % - ный водный раствор аммиака; Б. 3 % - ный водный раствор перекиси водорода; В. 50 % - ный водный раствор азотной кислоты	25-30 мл раствора Б добавить к 100 мл раствора А. В полученную смесь погрузить шлиф на 10-12 ч, затем его промыть водой и травить в растворе В до появления деформационных линий, после опять промыть водой и высушить. Для увеличения контраста при фотографировании образец можно поместить на некоторое время в раствор бихромата калия и серной кислоты
Для выявления закисы меди и границ зерен. В двухфазной латуни бета-фаза темнее альфа - фазы	Насыщенный водный раствор аммиака 10 мл; насыщенный водный раствор щавелевокислого аммония 30 мл; Щавелевокислый аммоний можно заменять мышьяковокислым калием	Травление производить под вытяжкой. Время травления доходит до 20-24 ч
Для выявления структуры в сплавах систем медь – цинк – свинец и медь – олово – цинк	А. Водный раствор сероводорода Б. Соляная кислота В. Азотнокислое серебро 10 г; вода 100 мл	Травление производить погружением в раствор А, затем добавить 1-2 капли раствора Б до появления пленки. После этого наливать раствор В до выявления структуры. Общее время травления составляет 10 с
Для выявления дендритного строения литой бронзы. Альфа-фаза становится темной. Эвтектид имеет светло -голубой оттенок. В латунях и бронзах травятся свинцовистые выделения. Также для выявления структуры меднокремниевожелезных и медносеребряных сплавов	А. 25 % - ный водный раствор аммиака 100 мл; перекись водорода 1 мл Б Хлорное железо 0,5 г; соляная кислота 50 мл; вода 100 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном в растворе А 15 -30 с, затем в растворе Б 20 -50 с с промежуточным переполнением. Иногда из состава нужно исключать перекись водорода
Для выявления границ зерен, линий сдвига и двойников в меди и однофазных медных сплавах	25 % - ный водный раствор аммиака 200 мл; перекись водорода 80 мл; 20 % - ный водный раствор едкого кали 20 мл; вода 100 мл	Травить в свежеприготовленном реактиве погружением или смачиванием тампоном от 0,5 до 1 минут

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для сплавов меди. В двухфазных латунях бета-фаза темнеет, альфа-фаза не травится. В сплавах меди с цинком гамма-фаза темнеет, бета-фаза не травится. В бета-латуни выявляются границы зерен. Реактив применяют также для сплавов меди с палладием	Насыщенный раствор брома в воде	Травить погружением на 10-60 с. Образующуюся на поверхности шлифа пленку удалять раствором аммиака (концентрацию раствора подбирать в зависимости от состава сплава)
Для выявления структуры меди, латуней и бронз	10 % - ный водный раствор персульфата аммония 40 мл; перекись водорода 10 мл	Травить одну - две минуты при комнатной температуре, затем промыть водой и высушить
Для выявления структуры меди и ее сплавов. В двухфазных латунях альфа-фаза темнеет, бета-фаза светлая. В сплавах системы медь – цинк гамма-фаза темнеет, бета-фаза не травится	25 % - ный водный раствор аммиака 20 мл; 0,4 % - ный водный раствор марганцовокислого калия 30 мл	Травить одну – две минуты, бурые пятна двуоксида марганца необходимо постоянно удалять аммиаком. Наиболее удобен раствор светло-коричневого цвета
Для выявления структуры латуней и других сплавов на медной основе	Бихромат натрия 10 г; хлорное железо 5 г; вода 100 мл	Травить окунанием на холоде несколько секунд, затем промыть и высушить
Для выявления структуры меди и медных сплавов. В однофазной латуни выявляется дендритная структура. В двухфазных сплавах альфа - и бета- фазы сначала одного цвета, затем на альфа -фазе появляются двойники. Бета -фаза темнеет после погружения на 10-15 с в 5 % - ный раствор хлорного железа	Персульфат аммония 10 г; концентрированный водный раствор аммиака 35 мл; вода 100 мл	Травить погружением в холодный или нагретый реактив на время от нескольких секунд до двух минут. Перед травлением хорошо отполированный образец обезжирить, затем тщательно промыть водой и высушить в спирте
Для выявления структуры медных сплавов, особенно алюминиевых и бериллиевых бронз	А. Хлорное железо 3 г; соляная кислота 2 мл; этиловый спирт до 100 мл; Б. Хлорная медь 10 г; хлористый магний 20 г; соляная кислота 20 мл	Травить погружением в растворе на время до двух минут, затем перенести шлиф в раствор Б, после чего удалить образовавшуюся пленку протиранием в смеси 10 мл соляной кислоты, 5мл плавиковой кислоты и 75 мл воды
Для высококачественного выявления структуры меди и медных сплавов, в т.ч. латуней сложного состава	Азотная кислота 10 мл; серная кислота 15 мл; хромовый ангидрид 1 г; вода 60 мл	Травить на холоде погружением или смачиванием шлифа тампоном из капельницы; время травления подбирают в зависимости от состава металла
Для выявления структуры медных сплавов, особенно с алюминием	А. Йод кристаллический 10 г; йодистый калий 10 г; вода 10 мл; Б. Азотная кислота 10 мл; этиловый спирт 100 мл	Шлиф травить последовательно в растворах А и Б несколько секунд
Для выявления структуры меди и ее сплавов. В двухфазных латунях альфа-фаза темнеет, в сплавах системы медь-цинк гамма-фаза темнеет, бета-фаза не травится. В оловянных бронзах эвтектид светлый, богатые медью дендриты темные. В сплавах медь – гадолиний альфа-фаза травится сильно, бета-фаза слабо, сигма-фаза не травится	25 % - ный водный раствор аммиака 100 мл; перекись водорода до 100 мл; вода 100 мл	Травить погружением в свежеприготовленный раствор до одной минуты и более. Соотношение перекиси водорода можно изменять в широких пределах. Иногда из состава реактива исключают воду

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры медных сплавов	10 – 30 % - ный водный раствор аммиака	Травить погружением или смачиванием тампоном. Промывать холодной водой. Насыщенный водный раствор аммиака применять при травлении медных и латунных припоев для пайки углеродистой стали
Для выявления структуры меди, латуни (бета-фаза темнеет)	Хлористоаммиачная медь 5-10 г; вода 100 мл	Травить погружением на 10-30 с с последующей тщательной промывкой водным раствором аммиака для удаления осадка на шлифе
Для выявления структуры большинства медных сплавов	Хромовая кислота 20 г; сульфат натрия безводный 2 г; соляная кислота 1,7 мл; вода 100 мл	Травить медь, латунь и бронзу 1-5 мин, затем шлиф следует промыть и высушить
Для выявления структуры меди и медных сплавов	Раствор соляной кислоты в воде	Травить погружением 1-10 мин, затем шлиф промыть и высушить. Концентрацию раствора подбирают эмпирически
Для выявления макро - и микроструктуры меди, латуней и бронз. В двухфазной латуни альфа-фаза не травится, бета-фаза темнеет. Реактив дает четкий рисунок дендритной структуры литой бронзы	Азотная кислота 10 -25 мл; вода 90 - 75 мл	Травить на холоде погружением или натираем тампоном от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от концентрации раствора с последующей тщательной промывкой и сушкой. С уменьшением концентрации уменьшается контрастность изображения. Для ликвидации потемнения структуры эвтектоида следует после травления протереть шлиф тампоном, смоченным аммиаком и перекисью водорода
Для качественного выявления структуры алюминиевой бронзы и некоторых других медных сплавов	Азотная кислота 50 мл; хромовый ангидрид 20 г; вода 75 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном, промывка спиртом и тщательная сушка
Для выявления структуры латуней и бронз, а также промежуточных фаз при изучении паяных соединений меди и латуни	Персульфат аммония 1-15 г; вода до 100.мл	Травить в 10 % - ном растворе в холодном или кипящем виде до 15 мин. Реактив улучшает свое действие при добавке перед употреблением нескольких капель концентрированного раствора аммиака
Для выявления структуры меди, латуней и бронз. Бета-фаза в латунях темнеет, хорошо выделяется эвтектоид. В сплавах меди с алюминием, фосфором и бериллием альфа-фаза темнеет	Хлорное железо 1-25 г; соляная кислота 1-50 мл; вода 100-200 мл	Варианты состава, как и цели применения данного реактива, чрезвычайно разнообразны. В большинстве случаев травить 0,5 – 3 мин и более. Образующуюся на шлифе пленку (например, на алюминиевой бронзе) удалять погружением на несколько секунд в 10 % - ный раствор соляной кислоты. Воду можно заменять спиртом
Для выявления структуры медных сплавов, особенно алюминиевых бронз	Хлорное железо 3,5 г; соляная кислота 25 мл; этиловый спирт 75 мл	Травить на холоде окунаем в раствор, затем промыть и высушить
Для выявления структуры меди, латуней и бронз	Йод кристаллический 10 г; Йодистый калий 20-30 г; вода 100 мл	Травить на холоде. При травлении латуней и бронз рекомендуется после травления на несколько секунд до трех минут погрузить шлиф в 10 % - ный реактив состава: йод кристаллический 1,25 г; йодистый калий 1,25 г; вода 1,25 мл; этиловый спирт 100 мл. Затем промыть и просушить
Для разделения фаз в алюминиевых бронзах	Гипосульфит натрия 10 г; вода 90 мл	Травить 1,5 - 2,5 мин при непрерывном перемешивании травителя. Растворы гипосульфита различной концентрации можно применять для травления монокристаллов меди

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры медных сплавов. В двухфазной латуни альфа-фаза темнеет. В медноцинковых сплавах травится гамма-фаза	Хлористоаммиачная медь 5-15 г; вода до 100 мл	Погружать образец полированной поверхностью вверх в раствор на одну – две минуты, затем промыть в струе воды и одновременно удалять ваткой темный налет. Налет можно также удалять раствором аммиака. В процессе травления нужно следить за тем, чтобы на шлифе не было пузырьков воздуха
Для выявления структуры медных сплавов	А Хлор - амин 10 г; вода 100 мл Б. Лимонная кислота 10 г; вода 100 мл	Раствор лимонной кислоты добавлять к раствору хлорамина в соотношении 1:3; при перемешивании выпадает кристаллический осадок, соотношение компонентов можно изменять эмпирически. Травление рекомендуется проводить на полировальном круге. После травления шлиф промыть и протереть
Для выявления структуры сплавов меди. В двухфазной латуни альфа -фаза имеет оранжевый оттенок, бета -фаза окрашивается в лимонно-желтый цвет	Хромовый ангидрид 5-20 г; вода до 100 мл	Травить погружением на 10 -30 с, при комнатной температуре, затем промыть и просушить
Для выявления структуры меди и ее сплавов	Соляная кислота 100 мл; хромовый ангидрид 40 г; хлористый никель 16 г; вода 100 мл	Хлористый никель добавлять к нагретому раствору соляной кислоты в воде; после охлаждения хромовый ангидрид растворяется. Шлиф травить погружением на время до одной минуты с последующей промывкой
Для выявления различия в концентрации твердого раствора в сплавах меди. Рекомендуется при изучении процессов диффузии и гомогенизации	Двууглекислая сода 5 -20 г; вода 100 мл	Травить в кипящем растворе. Перед травлением добавлять несколько капель перекиси водорода
Для выявления микроструктуры сплавов меди с оловом, цинком, алюминием. При этом альфа-фаза оранжевая, эта - фаза в алюминиевых бронзах черная, дельта -фаза коричневая	Насыщенный водный раствор хлорного железа 5 мл; 4 % - ный водный раствор соляной кислоты 30 мл; этиловый спирт 30 мл; амиловый спирт 30 мл	Травить на холоде обычным способом, далее промыть и просушить
Для выявления микроструктуры меди и ее сплавов В бронзах и двухфазных латунях бета -фаза окрашивается, альфа -фаза не травится	Хромовый ангидрид 10 г; соляная кислота 1мл; вода 100 мл	Травить окунанием 15 -60 с. Соляную кислоту добавлять перед употреблением. Травление можно чередовать с полировкой
Для выявления границ зерен и ликвации в меди и медных сплавах. В двухфазной латуни бета-фаза темнеет	Хлорная медь 8 г; 25 % - ный водный раствор аммиака 100 мл	Травление погружением или протиранием тампоном одну минуту и более
Для выявления макроструктуры, а также границ зерен и кислородных включений в меди, ликвацию в медных сплавах (по цвету и интенсивности травления)	Азотнокислое серебро 5 -10 г; вода до 100 мл	Травить с помощью тампона 20 -120 с. Можно кристаллическую соль нанести на поверхность шлифа и каплями добавлять воду. Через несколько секунд образовавшийся рыхлый осадок быстро смывать теплой водой
Для выявления структуры меди и медных сплавов	Серная кислота 5-10 мл; 1 % - ный водный раствор марганцовокислого калия 50 мл	Травить погружением или смачиванием 0,5 - 2 минут. Раствор марганцовокислого калия можно заменить равным количеством 3 % - ного раствора перекиси водорода для контраста. Раствор применять свежим и однократно

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры меди и ее сплавов с оловом, бериллием, железом, кремнием, марганцем, никелем, серебром и т.д. В оловянистых бронзах β - фаза темнеет	Двухромовоокислый калий 2 г; серная кислота 8 мл; насыщенный раствор хлористого натрия в воде 4 мл; вода 100 мл	Шлиф погрузить в свежеприготовленный раствор на несколько минут, затем перенести в раствор хлорного железа. Вместо раствора хлористого натрия можно добавить непосредственно перед употреблением одну каплю соляной кислоты на каждые 25 мл раствора. Двухромовоокислый калий можно заменить на равное количество бихромата натрия
Реактив предложен в качестве универсального травителя для выявления структуры всех медных сплавов	Ортофосфорная кислота 8 мл; хромовый ангидрид 0,5 мл; перекись водорода 0,5 мл; вода 200.мл	Травить на холоде от нескольких секунд до одного часа. Наиболее быстро травятся многофазные структуры. Перекись водорода добавлять непосредственно перед употреблением
Для качественного выявления структуры меди, однофазной латуни и фосфористой бронзы	А. Хромовый ангидрид 30 г; вода 150 мл; соляная кислота 10 мл Б. 25 % - ный водный раствор аммиака 60 мл; перекись водорода 20 мл	Непосредственно перед употреблением вливают раствор Б в раствор А. (смешивание сопровождается сильным выделением теплоты и дыма). Предварительно промытый метиловым спиртом шлиф смачивать тампоном 30-40 с, затем промывать водой, метиловым спиртом и высушить в струе теплого воздуха. Для холоднодеформированных образцов нужно добавить 30-50 мл воды и травить 10 с
Для выявления структуры медно-цинковых сплавов	Хромовый ангидрид 35-200 г; сернокислый натрий 8-15 г; вода 1000 мл	Травить погружением на 10 - 20 с и более при слабом помешивании, затем промыть в 20 % - ном водном растворе хромового ангидрида, удаляющего пятна с поверхности шлифа. При выявлении зернистой структуры медноцинковых сплавов количество сернокислого натрия уменьшают до 6-7 г
Для выявления структуры медных сплавов с золотом, серебром, палладием. В сплавах системы медь-гадолиний бета-фаза темная, альфа-фаза светлее, гамма-фаза не травится	5 -20 % - ный водный раствор персульфата аммония 50 мл; 5 -20 % - ный водный раствор цианистого калия 50 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном 20-40 с. Затем хорошо промыть и высушить в струе воздуха
Для выявления ликвации и границ зерен медных сплавов и меди	Хлорное железо 10 г; соляная кислота 100 мл; хлористое олово 0,1 г; хлорная медь 1 г	Травить обычным способом от одной -двух минут, затем промыть шлиф и высушить
Для выявления макроструктуры латуней	Серная кислота 10 мл; насыщенный водный раствор хромпика 50-100 мл	Реактив нагреть до 60°C, травить протирающим тампоном, промыть теплой водой и высушить
Для выявления макроструктуры медных сплавов	Азотная кислота 100 мл; соляная кислота 50 мл; вода 60 мл	Реактив применять в горячем (70°C) состоянии. Промывать сначала в горячей, затем в холодной воде и высушить
Для выявления макроструктуры латуней и бронз	10 % - ный раствор персульфата аммония в воде, мл	Травить в холодном или кипящем растворе до 15 мин. Значительно улучшается действие травителя при добавлении в него перед употреблением нескольких капель концентрированного раствора аммиака
Для выявления макроструктуры латуней	Насыщенный водный раствор хромпика 50 – 100 мл; серная кислота 10 мл	Травить при комнатной либо повышенной (до 60°C) температурах 30-60 с. Далее промыть теплой водой и высушить

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления макро- и микроструктуры меди и ее сплавов	Соляная кислота 40 мл; хлорная медь 5 г; вода 30 мл; этиловый спирт 25 мл	Травить натиранием тампоном при комнатной температуре. Затем шлиф промыть и высушить
Для выявления макроструктуры медных сплавов	25 % - ный водный раствор аммиака 100 мл; перекись водорода 100 мл; вода 100 мл	Травить погружением в свежеприготовленный раствор на одну минуту и более

Таблица 4.2.3 Реактивы для выявления структуры никеля и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры никелевых сплавов с кобальтом, хромом, марганцем, железом медью и также нержавеющей сталей, богатых никелем.	Азотная кислота 20 мл; уксусная кислота 30 мл	Раствор должен быть свежеприготовленным, травить погружением при комнатной температуре, Время травления 5 -60 с.Для ускорения действия реактив можно подогреть до 40 -50°C; для замедления, а также для сплавов с менее 25 % никеля рекомендуется добавить в реактив 20-50 мл ацетона
Для быстрого выявления структуры никелевых сплавов	Насыщенный раствор хлорного железа в соляной кислоте с небольшим количеством азотной кислоты	Реактив является очень энергичным травителем. Травить обычным способом при комнатной температуре
Для выявления микроструктуры никелевых сплавов	Азотная кислота 30 мл; соляная кислота 20 мл; ортофосфорная кислота 8 мл; уксусная кислота 40 мл	Травить погружением в нагретый до 30 -70°C раствор на время до трех минут. Фосфорную кислоту можно заменить равным объемом глицерина. Реактив оказывает полирующее действие, поэтому необязательно шлиф тщательно полировать
Для выявления макро - и микроструктуры никелевых сплавов	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 -30 мл; глицерин 20 -30 мл	Травить в свежеприготовленном растворе 10-40 сек и более. Можно также применять многократное травление с переполировкой. Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или использовать нагретый реактив
Для выявления тонкой структуры никеля и его сплавов	Азотная кислота 30 мл; соляная кислота 0,5 мл; уксусная кислота 70 мл	Шлиф погружают на 30 -40 с в раствор так, чтобы исследуемая поверхность была в вертикальном положении. Если реакция не идет, рекомендуется погрузить шлиф на несколько секунд в концентрированную азотную кислоту, потом, не промывая, перенести в данный реактив
Для выявления тонкой структуры никеля	Ортофосфорная кислота 2 -35 мл; вода 100 мл	Для выявления тонкой структуры никеля обычно применяют 35 % - ный раствор. Травить обычным способом, промыть водой, высушить воздухом
Для выявления микроструктуры сплавов никеля	Хромовый ангидрид 5 -20 мл; вода до 100 мл	Травить погружением при комнатной температуре
Для выявления структуры никелевых сплавов	Соляная кислота 100 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл	Травить погружением на 1 -2 мин с последующей промывкой водой (можно теплой) и спиртом. Можно применять многократное травление с промежуточной полировкой, Можно пользоваться нагретым до 50 -70°C реактивом
Для выявления макро - и микроструктуры никелевых сплавов	3 %- ный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 %- ный водный раствор едкого натра 10-20 мл	Реактив применяют только свежеприготовленным. Травить желательно в нагретом состоянии. Время травления – несколько секунд
Для выявления макро - и микроструктуры никелевых сплавов	Соляная кислота 3 -5 мл; пикриновая кислота 1 - 4 г; этиловый спирт 95 - 100 мл	Травить на холое обычным способом
Для выявления микроструктуры никеля и его сплавов	50 %- ный раствор йода в воде	Травить обычным способом
Для выявления тонкой структуры никеля	Хлорное железо 2,5 г; соляная кислота 7,5 мл; вода 100 мл	Травить обычным способом несколько с

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления микроструктуры никелевых сплавов	Хлорное железо 1 - 25 г; соляная кислота 1 - 50 мл; вода 100 - 120 мл	Варианты составов разнообразны для разных целей и составов сплавов. Травить обычным способом при комнатной температуре
Для выявления микроструктуры никеля и его сплавов	Насыщенный водный раствор хромпика 50-100 мл; серная кислота 10 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре до нескольких минут
Для выявления границ зерен с карбидами бора в сплавах никеля	Распыленный азотнокислый калий	Травить погружением при 380°C до одной минуты с последующей тщательной промывкой водой. Азотнокислый калий можно полностью или частично заменить азотнокислым натрием
Для выявления микроструктуры никеля и его сплавов	Персульфат аммония 1-15 г; вода до 100 мл	Травить в кипящем растворе несколько минут Раствор следует применять свежее приготовленным. Воду можно заменять спиртом
Для контрастного выявления структурных составляющих в сплавах на никелевой основе. Хорошо выявляет границы зерен, двойники и тонкие детали строения	Соляная кислота 10 мл; плавиковая кислота 10 мл; этиловый спирт 100 мл	Травить обычным способом. Продолжительность травления 6-10 мин
Применяют, когда не действуют другие реактивы для выявления макроструктуры, а также границ зерен и микроструктуры высоколегированных сплавов на основе никеля	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 30 мл	Реактив готовят за 24 ч до употребления. Шлиф травить погружением или лучше натиранием тампоном 5-60 с и больше
Для обнаружения богатой железом альфа - фазы в железоникелевых сплавах	А. 4 %- ный водный раствор желатины; Б. 3 %- ный водный раствор формалина; В. 3 %- ный спиртовой раствор азотной кислоты	На поверхность слегка нагретого шлифа нанести тонкий слой раствора А, нагретого до 60°C. После сушки желатины шлиф погрузить шлифованной поверхностью вверх в раствор Б, где выдержать от 30 с до 2 мин. Затем шлиф перенести в раствор В и после 0,5 – 2 мин травления осушить спиртом. Азотную кислоту можно заменять равным количеством соляной или пикриновой кислот. Для лучшего выявления альфа - фазы после травления шлиф погрузить на несколько секунд в раствор красной кровяной соли, в результате пленка на участках альфа - фазы приобретает голубой оттенок
Для выявления макро - и микроструктуры никеля и некоторых его сплавов	Концентрированный раствор соляной кислоты в воде	Травить обычным способом продолжительное время (время подбирать эмпирически)
Для контрастного выявления структуры никеля и его сплавов	Концентрированный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить обычным способом. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от природы и состояния металла
Для выявления макроструктуры никелевых сплавов	Соляная кислота 500 мл; серная кислота 25 мл; медный купорос 100 г; вода 200 мл	Перед травлением шлиф полировать, Травить погружением.

Таблица 4.2.4 Реактивы для выявления структуры олова и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры сплавов олова с кадмием	Двуххромовокислый калий до 5 г; уксусная кислота 0,5 мл; вода 100 мл	Травление погружением на холоде 10 -120°с. Двуххромовокислый калий можно заменить двуххромовокислым натрием
Для выявления структуры олова и его сплавов	Хлорное железо 1 - 25 г; соляная кислота 1 -50 мл; вода 100 - 200 мл	Варианты состава многообразны в зависимости от состава металла. Травить на холоде обычными способами
Для выявления структуры в сплавах олово -свинец. Свинец в эвтектике сплавов с большим количеством олова темнеет	А. Уксусная кислота 10 мл; перекись водорода 10 мл; Б. Азотная кислота 10 мл; уксусная кислота до 30 мл; глицерин до 80 мл	Раствор А составлять перед употреблением. Отшлифованный на бумаге шлиф поместить в раствор А на 30-50 с для удаления крупных неровностей и царапин и затем полировать вручную до появления зеркального блеска. После этого травить раствором Б 15-60 с и более. Для выявления границ зерен можно травить одним раствором Б
Для выявления структуры сплавов олова, таких, как олово-свинец, олово-цинк, олово-кадмий и др.	Раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Количество кислоты подбирают эмпирически. Травить обычным способом. Промывать желательнее в спирте, сушить в струе воздуха
Для выявления структуры олова и его сплавов	Молибденовый ангидрид 100 г; водный раствор аммиака 140 мл; азотная кислота 60 мл; вода 240 мл	Шлиф попеременно протирать тампоном, смоченным реактивом, и промывать проточной водой. Время травления 20-120°с. Азотную кислоту добавлять после фильтрования остальной части реактива
Для выявления границ зерен в сплавах олова, особенно в оловянистых бронзах	Соляная кислота 5 мл; оксид железа 2 г; этиловый спирт 60 мл; вода 30 мл	Травить окунаем на холоде
Для качественного выявления структуры оловянных сплавов	Азотная кислота 50 мл; хромовый ангидрид 20 г; вода 75 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном. Промывать спиртом, Рекомендуется также составить 4 -20% -ный раствор хромового ангидрида в азотной кислоте и непосредственно перед употреблением 5 -20 капель такого раствора разбавить в 100 мл воды. Травить также с последующей промывкой теплой водой и спиртом
Для выявления структуры оловянных сплавов. В сплавах олово-свинец хорошо выявляет эвтектический свинец	Азотнокислое серебро 5 -10 г; вода до 100 мл	Травить тампоном 20-120 с. Можно кристаллическую соль нанести на поверхность шлифа и каплями добавлять воду. Через несколько секунд образовавшийся рыхлый осадок быстро смыть теплой водой
Для выявления структуры сплавов олова	Двууглекислая сода 20 г; вода 100 мл	Травить холодным или нагретым до 70°С реактивом. Желательно в насыщенном содовом растворе
Для выявления структуры сплавов олова	Хлорное железо 1 -25 г; соляная кислота 1 -50 мл; вода 100-120 мл.	Варианты состава многообразны в зависимости от состава и состояния металла. Травить обычным способом в холодном реактиве
Для выявления структуры сплавов олова	Насыщенный раствор едкого натра в воде	Травить на холоде обычным способом, промывать в воде
Для выявления структуры сплавов олова	Пикриновая кислота 3 -5 г; этиловый спирт до100 мл	Травить на холоде любым способом. Время травления –несколько минут и зависит от природы и состояния сплава. Иногда допускается замена спирта водой

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для качественного выявления структуры большинства сплавов олова	Раствор соляной кислоты в воде	Травить погружением от одной до 10 минут, затем шлиф промыть и высушить
Для выявления структуры теллурида олова	Плавиковая кислота до 20 мл; перекись водорода 20 мл; вода 30 мл	Втирать свежий реактив тампоном до одной минуты

Таблица 4.2.5 Реактивы для выявления структуры свинца и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для изучения распределения свинца в свинцовых сплавах	Йодид калия 5 г; уксусная кислота 10 мл; сернокислый натрий до 1 г; вода – 100 мл	Поверхность шлифа обезжирить последовательно перекисью водорода и кислотой. Реактивную бумагу вымочить в указанном растворе и наложить на поверхность шлифа. По осадку йодида свинца можно судить о распределении и концентрации свинца в его сплавах, например, с медью и оловом
Для выявления зерен, субзерен и двойников свинца	Уксусная кислота 70 мл; перекись водорода 10 мл; этиловый спирт 10 мл; вода 20 мл	Травить при комнатной температуре 4 - 5 с. Лучшие результаты дает 3 – 4-кратное травление с промежуточными переполіровками. Исследовать рекомендуется в поляризованном свете
Для выявления структуры свинца и его сплавов	Азотная кислота 10 мл; уксусная кислота 10 мл; глицерин 40 мл	Травить в нагретом до 70 – 80°C реактиве 0,5 - 2 мин
Для выявления структуры и границ зерен сплавов свинца с оловом, сурьмой, мышьяком, кальцием, висмутом, серебром и т.д. Свинец в эвтектике сплавов с большим количеством олова темнеет	А. Уксусная кислота 10 мл; перекись водорода 10 мл; Б. Азотная кислота 10 мл; уксусная кислота, до 30 мл; глицерин до 80 мл	Раствор А составлять перед употреблением. Отшлифованный шлиф на бумаге помещать в раствор А на 30-50 с. Для удаления крупных неровностей и царапин, затем полировать до получения зеркального блеска. После этого травить раствором Б 15 -60 с и более. Для твердых сплавов полировку можно повторить. Шлифы мягких образцов следует хранить в очень слабом растворе уксусной кислоты в воде. Для оловосодержащих сплавов реактив рекомендуется слегка подогреть
Для выявления структуры сплавов свинца с оловом	Молибденовый ангидрид 10 г; водный раствор аммиака 14 мл; азотная кислота 6 мл; вода 24 мл	Азотную кислоту добавлять после фильтрации остальной части реактива. Шлиф попеременно протирать тампоном, смоченным реактивом, и промывать проточной водой
Для выявления структуры свинца и его сплавов	Уксусная кислота 5 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить в реактиве при комнатной температуре погружением или протиранием тампоном 20 -120 с
Для выявления макро- и микроструктуры сплавов свинца. В сплавах свинец - олово сначала травятся олово и эвтектический свинец	Азотнокислое серебро 5-10 г; вода до 100 мл	Травить при комнатной температуре тампоном 20 -120 с. Можно кристаллическую соль нанести на поверхность шлифа и каплями добавлять воду. Образовавшийся рыхлый осадок быстро смыть теплой водой
Для выявления микроструктуры сплавов свинца с висмутом	Молочная кислота 50 мл; азотная кислота 10 мл; перекись водорода 7 мл	Травить при комнатной температуре до одной минуты . затем шлиф промыть в проточной воде. Для выявления эпсилон -фазы можно в 3 раза уменьшить количество молочной кислоты

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры в сплавах свинца	Пикриновая кислота 3 -5 г; ацетон до 100 мл	Травить на холоде от одной до пяти минут
Для выявления структуры в сплавах свинец – сурьма, свинец – олово	Хлорное железо 1 -25 г; соляная кислота 1 -50 мл; вода 100 -120 мл	Варианты состава разнообразны, зависят от состава сплава и его применения. Травить обычным способом при комнатной температуре
Для выявления микроструктуры сплавов свинца с сурьмой, теллуrom, таллием	Лимонная кислота 15 г; молибдат аммония 9 г; вода 80 мл	Шлиф травить обычным способом, затем промыть водой и высушить теплым воздухом
Для выявления микроструктуры в т.ч. границ зерен сплавов свинца.	А. 15 % - ный раствор молибдата аммония в воде; Б. 5-10 % - ный раствор азотной кислоты в воде	Смесь равных объемов растворов А и Б отстаивается несколько дней, затем фильтруется. Для получения травящего реактива смешивают 0,5 – 2 мл этой смеси со 100 мл этилового спирта. Травить погружением на время от нескольких минут до 1,5 ч в зависимости от природы металла и концентрации раствора. Затем шлиф промыть водой и высушить теплым воздухом
Для выявления микроструктуры сплавов свинца	Насыщенный раствор двууглекислой соды в воде	Травить несколько минут в нагретом до 70-80 С реактиве обычным способом
Для выявления микроструктуры свинца и его сплавов	Азотная кислота 20 мл; уксусная кислота 30 мл	Для травления применять разбавленный водой (до 150 – 200 мл) раствор, а также чередовать легкую полировку с травлением 5 -10 с в нагретом до 40 – 50°С реактиве. Время травления в нагретом реактиве составляет 0,5 – 10 мин
Для качественного выявления структуры свинца и его сплавов с оловом	0,5 – 6 % -ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте.	Травить обычным способом
Для выявления структуры в сплавах свинца	10 – 25 % -ный раствор азотной кислоты в воде	Травить обычным способом
Для выявления структуры в сплавах свинца	Пикриновая кислота 3-5 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить на холоде обычным способом
Для выявления макро- и микроструктуры свинца и его сплавов	Раствор азотной кислоты в воде	Травить на холоде обычным способом, режим травления и концентрация реактива подбирается эмпирически в зависимости от состава сплава

Таблица 4.2.6 Реактивы для выявления структуры хрома и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры сплавов хрома с большим количеством ниобия	60 % - ный водный раствор плавиковой кислоты 10 мл; 20 % - ный водный раствор фтористого аммония 10 мл	Травить обычным способом в нагретом до 50°С растворе нескольких секунд
Для выявления структуры сплавов хрома с малым количеством ниобия	Серная кислота 10 мл; азотная кислота 20 мл; плавиковая кислота 10 мл; вода 10 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре. Продолжительность травления достигает несколько минут и уменьшается с увеличением количества ниобия в сплаве
Для выявления структуры хромистых сплавов	Насыщенный раствор хлорного железа в соляной кислоте с небольшим количеством азотной кислоты	Реактив является энергичным травителем для хромистых сплавов. Травить обычным способом при комнатной температуре
Для изучения интеркристаллической коррозии хромоникелевых сплавов	Гипосульфит 20 г; 30 % - ный водный раствор бисульфата натрия 2,5 мл; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре. Время подбирать эмпирически. Раствор бисульфата натрия можно заменить 100 - 120 мл 30 % - го раствора соляной кислоты

Для выявления структуры хрома и сплавов хрома с ниобием	Серная кислота 5-20 мл; вода до 100 мл	Травить в горячем растворе (60 - 70°C). Продолжительность травления до 2 ч, в холодном растворе дольше
Для выявления структуры хрома и большинства его сплавов	Соляная кислота 50 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить в горячем растворе (60 – 70°C) с промежуточными переполировками
Для выявления структуры хрома и хромовых покрытий	Насыщенный водный раствор хромпика 50 – 100 мл; серная кислота 10 мл	Травить при комнатной температуре нескольких минут
Для выявления макро- и микроструктуры литых хромистых и хромоникелевых сплавов в т.ч. дендритного строения, границ кристаллитов и карбидов	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 15 мл; вода 1 мл	Травить обычным способом реактивом в нагретом или кипящем состоянии. Разведенный водой реактив при 4 – 5 - часовом травлении может применяться для травления хромистых и хромоникелевых сплавов с сигма-фазой

Таблица 4.2.7 Реактивы для выявления структуры цинковых сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Выявляет границы зерен в цинковых сплавах	Серная кислота 10 мл; плавиковая кислота 10 мл; вода 80 мл	Травить при 25 -40°C (можно повысить до 65°C), время травления 10-20 с. Шлиф промывать горячей водой
Выявляет микроструктуру цинковых сплавов и структуру эвтектоида в богатых железом сплавах	Хлорное железо 10 г; сернокислое железо 2 г; железные квасцы 10 г; соляная кислота 10 мл; винная кислота 10 мл; этиловый спирт 50 мл; вода 100 мл	Перед употреблением к 10 мл реактива добавлять 50 мл этилового спирта. Травить погружением 10-20 с
Выявляет границы зерен в цинковых ферритах	Серная кислота 5-25 мл, вода до 100 мл	Травить при 90-95°C, время травления до 10 мин
Выявляет структуру сплавов, богатых цинком	Хромовый ангидрид 19 г; соляная кислота 1мл; вода 100 мл	Соляную кислоту добавляют перед употреблением реактива. Травление можно чередовать с полировкой
Выявляет структуру сплавов цинка с серебром	Йод кристаллический 1,25 г; йодистый калий 1,25 г; этиловый спирт 100 мл	Травить в холодном реактиве от 0,5 до 2 минут. Образующийся на поверхности шлифа налет удалять водным раствором NaHSO_2 .
Выявляет структуру цинка и цинковых сплавов	А. 4 % - ный раствор азотной кислоты в уксусном ангидриде 10 мл; Б. Амиловый спирт 10 мл; этиловый спирт 10 мл; метиловый спирт 10 мл	Травить в холодном реактиве. Реактив составляют непосредственно перед употреблением из трех частей раствора Б и одной части раствора А. Время травления от 20 секунд до нескольких минут
Выявляет структуру цинка и цинковых сплавов	Насыщенный раствор едкого натра в воде (в спирте)	Травить на холоде до 2 мин или в горячем растворе несколько секунд. Темный налет с поверхности шлифа удаляют погружением в азотную кислоту или насыщенный раствор хромовой кислоты. Воду можно заменять спиртом, в этом случае время травления увеличивают
Выявляет структуру цинка и цинковых сплавов	Азотная кислота 50 мл; хромовый ангидрид 20 г; вода 75 мл	Реактив употреблять свежеприготовленным. Непосредственно перед употреблением 5 -20 капель реактива разбавить в 100 мл воды. Травить погружением или смачиванием тампоном с последующей промывкой теплой водой и спиртом
Выявляет структуру цинка и цинковых сплавов	Соляная кислота 2 -50 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить на холоде от нескольких секунд до нескольких минут
Выявляет структуру цинка и цинковых сплавов	Раствор соляной кислоты в воде; концентрацию подбирают в зависимости от состава и состояния сплава	Травить погружением на время от одной до 10 минут, затем шлиф промыть в воде и высушить воздухом

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры сплавов цинка с серебром	Хромовый ангидрид 3 г; серная кислота 3 мл; вода 75 мл	Травить погружением при 30-40°C; время травления 20-30 с
Для выявления структуры сплавов системы цинк-индий	Двухромистый калий 2 г; серная кислота 8 г; насыщенный раствор хлористого натрия в воде 4 мл; вода 100 мл; 10 % - ный водный раствор хромистого ангидрида 100 мл	Травить погружением в свежеприготовленный раствор на время до одной минуты, затем шлиф перенести в раствор хлорного железа. Промыть водой
Для выявления структуры цинковых сплавов	Азотная кислота 50 мл; хромовый ангидрид 20 г; вода 75 мл. Рекомендуется также составить 4 - 20 % - ный раствор хромового ангидрида в азотной кислоте и непосредственно перед употреблением 5-20 капель разбавить в 100 мл воды	Травить погружением или смачиванием тампоном с последующей промывкой в теплой воде и спирте

4.3 Малые цветные металлы

Таблица 4.3.1 Реактивы для выявления структуры висмута и его сплавов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры сплавов висмута со свинцом	Молочная кислота 50 мл; азотная кислота 10 мл; перекись водорода 7 мл	Травить на холоде. Время травления до одной минуты, затем промывать в проточной воде.. Для выявления эpsilon - фазы можно в 3 раза уменьшить количество молочной кислоты
Для выявления структуры сплавов системы висмут – олово, висмут - кадмий	Хлорное железо 1 - 25 г; соляная кислота 1 - 50 мл; вода 100 - 120 мл	Варианты состава разнообразны. Травить на холоде. Время подбирать эмпирически
Для выявления структуры сплавов висмута	Раствор соляной кислоты в воде	Травить погружением от 1 до 10 минут, затем шлиф промыть и высушить
Для выявления структуры сплавов висмута	Раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить на холоде. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от природы металла и концентрации раствора
Для выявления структуры сплавов висмута	Соляная кислота 2 - 5 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить обычным способом
Для выявления структуры сплавов висмута	Пикриновая кислота 3-5 г; этиловый спирт до 100 мл	Травить на холоде обычным способом. Время травления зависит от природы и состояния сплава и достигает нескольких минут
Для выявления макро- и микроструктуры сплавов висмута	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 10 мл	Реактив применять в горячем (50 – 70°C) состоянии. Травить обычным способом
Для выявления структуры висмута и его сплавов	Азотнокислое серебро 5 -10 г; вода до 100 мл	Травить с помощью тампона при комнатной температуре. Можно кристаллическую соль нанести на поверхность шлифа и каплями добавлять воду. При образовании рыхлого осадка, его смывать теплой водой

Таблица 4.3.2 Реактивы для выявления структуры вольфрама и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры вольфрамовых сплавов. В вольфрамовых сплавах эвтектика темнеет, окрашиваются вольфрамы и сложные карбиды типа Fe_2W_2C . Карбиды типа WC не травятся. Карбид железа окрашивается позже остальных, что позволяет отличить его от карбидов вольфрама	Пикриновая кислота 2 -5 г; едкий натр 20 -25 г; вода 75 -100 мл	Пикриновую кислоту растворить в ранее приготовленном растворе едкого натра и половинном количестве воды. В полученный раствор, нагретый на водяной бане, добавить остальное количество воды до растворения всего осадка. Раствор не должен кипеть, чтобы не менялся состав. Приготовленный раствор хранить в темной герметической посуде. Шлиф травить погружением в нагретый не ниже 60°C раствор 5 -30 мин, иногда больше
Для выявления структуры сплавов вольфрама с кобальтом	А. 3 %-ная перекись водорода 10 мл; 10 %-ный водный раствор соляной кислоты 10 мл; Б. Перекись водорода 8 мл; ортофосфорная кислота до 100 мл	Травить погружением на 10 с в раствор А, затем в раствор Б на 15 -60 с. Растворы должны быть свежими
Для выявления структуры вольфрама	Перекись водорода 20 мл; соляная кислота 20 мл	Травить в кипящем реактиве обычным способом
Для цветного окрашивания структурных составляющих вольфрамовых сплавов	10 % - ный водный раствор марганцовокислого калия 10 мл; ангидрид уксусной кислоты 10 г	Травить погружением в свежеприготовленный реактив на 10 с и более
Для выявления границ зерен вольфрама и его сплавов	Сернокислая медь 10 г; водный раствор аммиака 20 мл; вода 40 мл	Травить погружением на 20-30 с до появления на поверхности шлифа ровной пленки. Разбавленный водой реактив можно применять при полировке
Для выявления структуры вольфрама и его сплавов	3 % - ный водный раствор перекиси водорода	Травить в кипящем растворе. Можно добавить раствор аммиака
Для выявления структуры вольфрама	25 % - ный водный раствор аммиака 100 мл; перекись водорода до 100 мл; вода 100 мл	Травить погружением в свежеприготовленный раствор на время до одной минуты и более. Рекомендуется также травить 5-60 с в нагретой смеси аммиака и перекиси водорода или в одной перекиси водорода
Для выявления структуры вольфрама и его сплавов	Двууглекислая сода 5 -20 г; вода 100 мл	Травить обычным способом в слабом содовом растворе с добавкой красной кровяной соли
Для опознавания ряда структурных составляющих в сплавах вольфрама. В сплавах типа карбиды - вольфрам выявляются избыточные и эвтектические карбиды, твердый раствор не травится. В заэвтектических сплавах вначале окрашиваются избыточные карбиды, затем эвтектические. В сплавах типа железо - карбид вольфрама реактив травит все карбиды, оставляя светлым фон твердого раствора	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 1 г; вода 100 мл	Травить горячим (можно кипящим) свежеприготовленным раствором от 1,5 до 10 минут
Для выявления структуры в сплавах вольфрама. В безуглеродистых вольфрамовых сплавах вольфрамы железа окрашиваются в темный цвет. В углеродистых железо - вольфрамовых сплавах выявляются карбиды вольфрама и сложные железвольфрамовые карбиды	3 % - ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натра 10-20 мл	Реактив применять только свежеприготовленным при травлении на холоде несколько (3 - 5) минут. Раствор можно применять нагретым (иногда до кипения). В этом случае травить обычным способом несколько секунд

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры вольфрама и некоторых его сплавов	Красная кровяная соль 1 - 4 г; вода до 100 мл	Травить обычным способом. Рекомендуется шлиф медленно полировать на сукне, смоченным данным реактивом. Рекомендуется непосредственно перед употреблением добавить несколько капель аммиака
Для выявления структуры вольфрама и его сплавов	Красная кровяная соль 1г; гидрат оксида аммония 4 мл; этиловый спирт 20 мл; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре 15-30 с, затем промыть сначала в амилаовом спирте, затем в бутиловом
Для выявления структуры вольфрама	Плавиновая кислота 20 мл; азотная кислота 10 мл; вода 40 мл	Травить погружением в кипящий раствор несколько секунд
Для выявления структуры вольфрама и его сплавов. В ферровольфраме окрашиваются вольфраматы железа.	Насыщенный раствор персульфата аммония в воде	Травить в кипящем растворе несколько минут

Таблица 4.3.3 Реактивы для выявления структуры кадмия и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры кадмиевых сплавов	Азотная кислота 50 мл; хромовый ангидрид 20 г; вода 75 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном. Промывать теплой водой и спиртом
Для выявления структуры сплавов кадмия с серебром	Хромовый ангидрид 3 г; серная кислота 25 мл; вода 75 мл	Травить обычным способом на холоде
Для выявления структуры сплавов кадмия. Контрастно травятся границы зерен и оксидные включения	Хромовый ангидрид 5-20 г; вода до 100 мл	Травить погружением на 10-30 с
Для выявления структуры сплавов кадмия	Йод кристаллический 10 г; йодистый калий 20 -30 г; вода 100 мл	Травить на холоде. Время травления- 5-10 с, продукты травления удалять легкой полировкой
Для выявления структуры сплавов систем кадмий - цинк, кадмий - висмут	Хлорное железо 1 -25 г; соляная кислота 1 -50 мл; вода до 100 мл	Варианты состава чрезвычайно многообразны, зависят от целей и состава металла
Для качественного выявления структуры кадмиевых сплавов	Азотная кислота 50 мл; хромовый ангидрид 20 г; вода 75 мл	Рекомендуется составить 4 - 20% -ный раствор хромового ангидрида в азотной кислоте и непосредственно перед употреблением 5 -20 капель такого раствора разбавлять в 100 мл воды. Травление производить погружением или смачиванием тампоном с последующей промывкой теплой водой и спиртом
Для выявления структуры сплавов системы кадмий - олово	Раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Состав реактива многообразен. Обычно выбирают 0,5 – 6 % -ные растворы. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких минут

Таблица 4.3.4 Реактивы для выявления структуры кобальта и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры кобальта, его оксидов и сульфидов. Оксиды и сульфиды не окрашиваются	Хлорная ртуть 1 г; соляная кислота 20 мл; вода до 100 мл	Травить на холоде обычным способом 30 с

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры кобальта и его сплавов	Соляная кислота 100 мл; сернокислая медь 20 г; вода 100 мл	Травить погружением на одну – две минуты с последующей промывкой теплой водой и спиртом. Можно применять многократное травление с промежуточной полировкой. Можно пользоваться нагретым до 50 -70°C реактивом, воду частично заменить спиртом
Для выявления структуры сплавов кобальта. При этом его оксиды и сульфиды не окрашиваются	35 – 80 %- ный раствор бисульфата натрия	Травить обычным способом на холоде две минуты
Для выявления структуры металлокерамических сплавов кобальта с карбидом тантала	Хлорная медь 8 г; 25 % -ный водный раствор аммиака 100 мл.	В результате травления 1-10 мин твердый раствор и эвтектика окрашиваются, карбиды не травятся
Для выявления структуры кобальта и сплавов кобальта с никелем, металлокерамических сплавов кобальта с карбидами вольфрама, молибдена, тантала	Азотная кислота 20 мл; уксусная кислота 30 мл	Травить обычным способом, Время травления 5 - 60 с. Для ускорения действия реактив можно подогреть до 40 – 50°C, для замедления, а также сплавов с менее 25 % никеля рекомендуется добавить 20 -50 мл ацетона
Для выявления границ зерен в сплавах кобальта с вольфрамом, молибденом, хромом и др.	Распыленный азотнокислый калий	Травить погружением при 380°C до одной минуты с последующей тщательной промывкой водой. Азотнокислый калий можно заменить полностью или частично азотнокислым натрием
Для выявления структуры твердых сплавов кобальта с вольфрамом	3 % - ный водный раствор перекиси водорода	Травить в кипящем растворе. Можно добавлять в раствор аммиака
Для выявления структуры кобальта и его сплавов	3 % - ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % -ный водный раствор едкого натра 10 – 20 мл	Реактив применять только свежеприготовленным и нагретым. Травить несколько минут. При травлении на холоде нескольких минут вольфраматы железа окрашиваются в темный цвет
Для опознавания некоторых структурных составляющих в сплавах кобальта	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить в холодном или горячем (60 – 80°C) свежеприготовленном реактиве 1,5 -10 мин. В результате травления в сплавах систем карбиды – вольфрама – кобальт выявляются избыточные и эвтектические карбиды. Твердый раствор не травится . В заэвтектических сплавах вначале окрашиваются избыточные карбиды ,затем эвтектические
Для выявления структуры кобальтовых сплавов	Красная кровяная соль 5 г; едкое кали 5 г, вода 100 мл	Травить в кипящем растворе обычным способом несколько минут, затем тщательно промыть в холодной воде
Для выявления структуры сплавов спекания кобальт – молибден и кобальт - углерод	10 – 30 % - ный раствор азотной кислоты в воде	Травить при 50 – 80°C несколько минут, окунанием или протираанием тампоном
Для выявления структуры большинства кобальтовых сплавов	Ортофосфорная кислота 60 мл; серная кислота 20 мл; хромовый ангидрид 0,5 г; глицерин 7 мл; серное железо 0,7 г; вода 12 мл	Травить обычным способом. Время подбирать эмпирически. Для замедления травления следует в 3 - 5 раз увеличить количество воды
Для выявления структуры сплавов кобальта с вольфрамом	А . Перекись водорода (3 % - ная); 10 % - ный водный раствор соляной кислоты 10 мл; Б. Перекись водорода 8 мл; ортофосфорная кислота до 100 мл	Травить погружением на 10 с в раствор А, затем в растворе Б 15-60 с. Растворы должны быть свежеприготовленными

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры металлокерамических сплавов типа кобальт – карбид (вольфрама, молибдена, тантала)	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 30 мл;	Очень энергичный травитель. Применяется для сплавов, на которые не действуют другие металлографические реактивы. Реактив готовят за 24 ч до употребления. Шлиф травить погружением или натиранием тампоном 5 - 60 с и более

Таблица 4.3.5 Реактивы для выявления структуры кремния и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления микроструктуры кремния и его сплавов	Соляная кислота 2 мл; 10 % - ный водный раствор марганцовокислого калия 3 мл	Травить в свежеприготовленном нагретом растворе от одного до трех часов
Для выявления дислокаций в монокристаллах кремния	Уксусный ангидрид 30 мл; плавиковая кислота 10 мл; азотная кислота 30 мл	Вначале следует по каплям добавлять уксусный ангидрид к плавиковой кислоте, затем в смесь вливать азотную кислоту. Травить 25-30 минут
Для выявления микроструктуры сплавов кремний – бериллий	Плавиковая кислота 2 мл; вода 98 мл;	Травить 10-20 с, затем промыть теплой водой. Образующийся на поверхности шлифа темный осадок можно удалить погружением на несколько секунд в азотную кислоту
Для выявления структуры сплавов кремний - титан кремний - цирконий	Плавиковая кислота 1-5 мл; азотная кислота 1-5 мл, вода 98 -90 мл	Реактив можно применять в холодном или нагретом до 60 – 70°С. Травить погружением несколько минут, затем промыть теплой водой
Для выявления структуры в сплавах кремний - алюминий	5-20 %- ный раствор едкого натра в воде	Травить на холоде до двух минут либо в горячем растворе несколько секунд. Темный налет с поверхности шлифа удалять погружением в азотную кислоту или в насыщенный раствор хромовой кислоты. Воду можно заменить спиртом.

Таблица 4.3.6 Реактивы для выявления структуры молибдена и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры молибдена и его сплавов	Перекись водорода 20 мл; соляная кислота 20 мл	Травить в кипящем растворе
Для выявления структуры молибдена и его сплавов	А. Перекись водорода (0,3 % - ная) 10 мл; 10 % - ный раствор соляной кислоты 10 мл; Б. Перекись водорода 8 мл; ортофосфорная кислота до 100 мл	Травить погружением на 10 с в раствор А , затем в растворе Б 15 - 60 с. Растворы должны быть свежими. Промыть водой, высушить воздухом
Для выявления границ зерен молибдена и его сплавов	Сернокислая медь 10 г; водный раствор аммиака 20 мл; вода 40 мл	Травить погружением на 20-30 с до появления на поверхности шлифа ровной пленки. Разбавленный водой реактив можно применять при полировке
Для выявления структуры молибдена и его сплавов	Серная кислота 5-10 мл; 1 % - ный водный раствор марганцовокислого калия 50 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном 0,5 - 2 мин. Раствор марганцовокислого калия можно заменить равным количеством 3 % - ного раствора перекиси водорода для увеличения контраста. Повышение количества серной кислоты нежелательно, так как шлиф окисляется и окрашивается. Раствор применяют свежим и однократно

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры молибдена и его сплавов	25 % - ный водный раствор аммиака 100 мл; перекись водорода до 100 мл; вода 100 мл	Травить 5 - 60 с в нагретой смеси аммиака и перекиси водорода или только в перекиси водорода. Соотношение перекиси водорода можно изменять в широких пределах
Для травления большинства молибденовых сплавов При этом твердый раствор не травится, а двойные интерметаллиды окрашиваются. В сплавах с медью интерметаллиды окрашиваются в коричневый цвет, в сплавах с молибденом - в черный, с цирконием – в лимонно-желтый, с бериллием – в коричневый цвет, дисилициды MoSi_2 и силициды Mo_5Si_3 по цвету отличаются. В системе молибден-алюминий интерметаллидная фаза не окрашивается	Азотная кислота 10-20 мл; плавиковая кислота 10-20 мл; глицерин 20-60 мл	Травить обычным способом на холоде 10-20 с, затем промыть и высушить. Время травления подбирать эмпирически
Для выявления структуры молибдена и его сплавов	Плавиковая кислота 20 мл; азотная кислота 10 мл; вода 40 мл	Травить погружением на несколько секунд в кипящий раствор
Для выявления структуры молибденовых сплавов. В сплавах молибдена с никелем дельта-фаза окрашивается в черный цвет, твердый раствор – в синие тона. В сплавах с алюминием фаза Al_2Mo не окрашивается, а твердый раствор окрашивается в синие, лиловые и коричневые тона. В сплавах с медью интерметаллид розовеет, твердый раствор окрашивается в сине-лиловые тона, В сплавах с цирконием фаза Mo_2Zr не окрашивается	Персульфат аммония 10 г; вода до 100 мл	Микрошлиф травить в холодном или слегка подогретом растворе 5 -10 с и более. При повышении температуры раствора (более 35°C) получается пятнистость на поверхности. Воду можно заменять равным количеством спирта. Раствор применять свежеприготовленным
Для выявления структуры молибдена и его сплавов	3%-ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натра 10-20 мл	Реактив применяют только свежеприготовленным. Травить несколько секунд в нагретом реактиве. Образующиеся при травлении пузырьки газа периодически удалять
Для выявления структуры молибденовых сплавов	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить окунанием в кипящем растворе. Реактив хранить недолго в темной посуде. Возможно травить в холодном растворе 40-50 с для литого и более – для спеченного состояния
Для окрашивания гамма -фазы в молибденовых сплавах	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 25 мл; вода 200 мл	Травить на холоде или в нагретом состоянии. Время подбирается эмпирически. Воду можно заменить этиловым или метиловым спиртом
Для выявления макроструктуры молибдена и его сплавов. Выявляются в литых сплавах макронеоднородности и дефекты	10-25 % - ный водный раствор азотной кислоты в воде	Травить на холоде протиранием тампоном или погружением 3 -30 мин с последующей тщательной промывкой в воде

Таблица 4.3.7 Реактивы для выявления структуры ниобия и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для качественного выявления структуры сплавов ниобия, а также сплавов хрома с ниобием (при содержании ниобия не менее 5%)	Серная кислота 10 мл; азотная кислота 20 мл; плавиковая кислота 10 мл; вода 10 мл	Травить при комнатной температур несколько минут. Время травления уменьшается с увеличением содержания ниобия в сплаве
Для выявления структуры в сплавах хрома с большим количеством ниобия	60 % - ный водный раствор плавиковой кислоты 10 мл; 20 % - ный водный раствор фтористого аммония 10 мл	Травить при комнатной температуре либо в нагретом до 50°C несколько секунд. Рекомендуется увеличивать количество воды
Для выявления структуры сплавов ниобий - цирконий	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 30 мл	Травить погружением или натиранием тампоном. Время подбирать эмпирически. Рекомендуется иногда в реактив добавлять глицерин
Для выявления структуры сплавов ниобия с цирконием и титаном	Плавиковая кислота 1 мл; азотная кислота 99 мл	Травить обычным способом. Промывать желательно сначала в спирте, затем в воде. Для сплавов ниобия с титаном азотную кислоту можно заменить глицерином

Таблица 4.3.8 Реактивы для выявления структуры сурьмы и ее сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры сурьмы	Азотнокислосое серебро 5-10 г; вода до 100 мл	Травить с помощью тампона при комнатной температуре. Можно кристаллическую соль нанести на поверхность шлифа и каплями добавлять воду. При образовании рыхлого осадка, его смывать теплой водой
Для выявления структуры сурьмы и ее сплавов	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 10 мл	Травить обычным способом
Для выявления структуры сурьмы и ее сплавов	Пикриновая кислота 3 -5г; этиловый спирт до 100 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре

Таблица 4.3.9 Реактивы для выявления структуры тантала и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для качественного выявления структуры тантала и его сплавов	60 % - ный водный раствор плавиковой кислоты 20 мл; 20 % - ный раствор фтористого аммония 80 мл	Травить несколько секунд в нагретом до 50°C растворе
Для выявления структуры твердых сплавов с танталом	3 % - ный водный раствор перекиси водорода	Травить в кипящем растворе. Можно добавлять раствор аммиака. В этом случае раствор слегка подогревают
Для выявления структуры сплавов тантал – ниобий	Плавиковая кислота 10 мл; азотная кислота 10 мл; вода 10 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре или в слегка подогретом растворе, затем промыть водой
Для выявления структуры танталовых сплавов	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить в кипящем свежеприготовленном реактиве. Время травления подбирать эмпирически

Таблица 4.3.10 Реактивы для выявления структуры циркония и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры сплавов циркония с ураном	Азотная кислота 30 мл; плавиковая кислота 2 мл; молочная кислота 30 мл	Травить обычным способом
Для выявления структуры сплавов циркония с торием	Азотная кислота 50 мл; кремнефтористоводородная кислота 0,5 мл; вода 50 мл	Травить обычным способом

Для выявления структуры циркония и его сплавов	Азотная кислота 30 мл; перекись водорода 60 мл; плавиковая кислота 0,5 мл; этиловый спирт 30 мл	Свежий раствор втирать несколько секунд с последующей тщательной промывкой сначала спиртом, затем водой
Для выявления структуры сплавов циркония с магнием, кремнием, никелем, танталом, хромом, алюминием, серебром	Глицерин 80 мл; плавиковая кислота 10 мл; азотная кислота 5 мл; вода до 40 мл	Травить обычным способом, время травления несколько секунд
Для цветного окрашивания карбидов в циркониевых сплавах	Плавиковая кислота 10 мл; азотная кислота 30 мл; азотнокислый свинец 30 мл; вода до 100 мл	Реактив должен содержать избыток металлического свинца. Травить обычным способом, время травления 3-5 с
Для выявления структуры чистого циркония. Можно и для его сплавов (выявляет теллурид олова)	Плавиковая кислота до 10 мл; перекись водорода 60 мл; вода 30 мл	Реактив применять свежеприготовленным. Травить, втирая тампоном, до одной минуты
Для выявления макро- и микроструктуры циркония и его сплавов с магнием, никелем, кремнием, бором, железом, ниобием, оловом, ураном, молибденом, медью, алюминием	А. Азотная кислота 10 мл ; плавиковая кислота 10 мл; глицерин 20 мл Б. Азотная кислота 20 мл; плавиковая кислота 20 мл; глицерин 60 мл	Рекомендуется травить последовательно реактивом А и реактивом Б. Травить на холоде от нескольких секунд до нескольких минут
Для выявления структуры сплавов циркония с алюминием, медью, железом, ураном, кислородом, водородом, кремнием, бериллием, никелем	Плавиковая кислота 1 -5 мл; азотная кислота 1 -5 мл, вода 98 - 90 мл	Травить при комнатной температуре, шлиф натирать тампоном несколько минут, затем промыть водой
Для выявления структуры циркония и его сплавов	Плавиковая кислота 20 мл; азотная кислота 1 мл; вода 80 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре одну – две секунды. При более продолжительном воздействии реактива вытравливаются карбиды
Для выявления структуры сплавов циркония с торием, оловом, ниобием	Плавиковая кислота 1 мл; азотная кислота 99 мл	Травить при комнатной температуре одну - две секунды.
Для выявления структуры сплавов циркония с алюминием и ураном	Плавиковая кислота несколько капель; азотная кислота 50 мл; вода 50 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре. Время травления подбирается эмпирически.

4.4 Благородные цветные металлы

Таблица 4.4.1 Реактивы для выявления структуры золота и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления границ и окрашивания зерен золота	Раствор брома в соляной кислоте	Травить обычным способом при комнатной температуре 1 - 30 минут
Для выявления структуры золота и его сплавов	5 -20 % - ный водный раствор персульфата аммония 50 мл; 5 – 20 % - ный водный раствор цианистого калия	Травить погружением или смачиванием тампоном от 0,5 до 3 минут. В некоторых случаях для усиления действия реактива можно добавить 1-2 мл 3 % - ного раствора йодистого калия в воде
Для выявления структуры сплавов золота с никелем	Сернистый натрий 10 г; вода 100 мл	Травить погружением на 2 -3 минуты. Можно также через воду с погруженным шлифом пропустить в течение 3 -5 минут сероводород
Для выявления структуры золота и его сплавов	Азотная кислота 5 мл; соляная кислота 20-30 мл; глицерин 20-30 мл	Раствор должен быть свежеприготовленным, Можно применить многократное травление с переполнкой. Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или пользоваться нагретым реактивом. Время травления может доходить до нескольких минут

Для выявления структуры золота и его сплавов	Йод кристаллический 10 г; йодистый калий 20-30 г; вода 100 мл	Травить в холодном реактиве от 0,5 до 2 минут. Образующийся на поверхности шлифа налет удалять водным раствором NaHSO_2
Для выявления границ зерен золота	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 30 мл	Травить на холоде несколько секунд. В реактив можно иногда добавлять глицерин

Таблица 4.4.2 Реактивы для выявления структуры палладия и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры палладия и его сплавов	5 -20 % - ный водный раствор персульфата аммония 50 мл; 5 -20 % - ный раствор цианистого калия 50 мл	Травить погружением или смачиванием тампоном от 0,5 до 3 минут. В некоторых случаях для усиления действия реактива можно добавить 1 – 2 мл 3 % - ного раствора йодистого калия в воде
Для выявления структуры сплавов палладий - серебро	25 % - ный водный раствор аммиака 10 мл; перекись водорода до 10 мл; вода 10 мл	Травить погружением в свежеприготовленный раствор одну минуту и более. Соотношение перекиси водорода можно менять в широких пределах, Иногда из состава можно исключить воду
Для выявления структуры сплавов палладия с медью	Насыщенный раствор брома в воде	Травить при комнатной температуре погружением на 10 - 60 с. Образующуюся на поверхности шлифа пленку удалять раствором аммиака
Для выявления структуры палладия и его сплавов	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 20 -30 мл; глицерин 20-30 мл	Травить в свежеприготовленном растворе 10 - 40 с и более. Можно применять многократное травление с переполировкой. Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или пользоваться нагретым реактивом

Таблица 4.4.3 Реактивы для выявления структуры платины и ее сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления границ и окрашивания зерен платины	Раствор брома в соляной кислоте	Травить обычным способом. Время травления от 1 до 30 минут
Для выявления структуры платины	Едкое кали 100 г; азотнокислый калий 10 г	Шлиф травить несколько минут в расплавленной смеси. Азотнокислый калий можно заменить равным количеством сернокислого калия
Для выявления структуры платины	Азотная кислота 5 мл; соляная кислота 20-30 мл; глицерин 20-30 мл	Травить в свежеприготовленном растворе 10-40 с и более. Можно также применять многократное травление с переполировкой. Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или пользоваться нагретым реактивом
Для выявления структуры платины и ее сплавов	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 50-100 мл; вода 2-60 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре или в нагретом состоянии. Иногда на поверхности шлифа появляется пленка , которую удаляют погружением шлифа в раствор аммиака
Для выявления структуры платинита	Соляная кислота 3-5 мл; пикриновая кислота 1-4 мл; этиловый спирт 95-100 мл	Травить на холоде обычным способом. Время подбирать эмпирически. Промывать спиртом

Таблица 4.4.4 Реактивы для выявления структуры серебра и его сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры серебра и его сплавов	А. Азотная кислота 50 мл; двуххромовокислый калий 2 г; вода 50 мл Б. Сернокислый натрий 1,5 г; хромовый ангидрид 20 г; вода 50 мл	Смесь раствора Б и 20 - кратного разбавленного водой раствора А в равных объемах наносить тампоном на шлиф до образования бурой пленки, которую затем удаляют водой. Если пленка пристает к поверхности шлифа очень плотно, следует добавить раствор А, при отсутствии пленки добавить раствор Б
Для выявления структуры сплавов серебра	Уксусная кислота 5 мл; этиловый спирт до 100 мл	Травить при комнатной температуре погружением или протиранием шлифа тампоном 20 - 120 с
Для выявления структуры серебра	5-20 % - ный водный раствор персульфата аммония 50 мл; 5-20 % - ный водный раствор цианистого калия 50 мл	Травить при комнатной температуре погружением или смачиванием тампоном от 0,5 до 3 минут. Иногда для усиления действия реактива можно добавить 1 - 2 мл 3 % - ного раствора йодистого калия в воде
Для выявления структуры серебра и его сплавов	Хлористоаммиачная медь 5 -10 г; вода 100 мл	Травить при комнатной температуре погружением на 10-30 с с последующей тщательной промывкой водным раствором аммиака до удаления осадка на шлифе
Для выявления структуры чистого серебра	25% -ный водный раствор аммиака, 10 мл ; перекись водорода до 10 мл; вода 10 мл	Травить погружением в свежеприготовленный раствор до одной минуты и более. Количество перекиси водорода можно изменять в широких пределах. Иногда из состава можно исключать воду
Для выявления структуры сплавов серебра с кадмием, цинком и некоторых других сплавов	Хромовый ангидрид 3 г; серная кислота 25 мл; вода 75 мл	Травить обычным способом. Для выявления фигур травления на серебре можно применять многократную реполировку с промежуточным травлением от 0,5 до 3 минут. При травлении серебра и его сплавов количество серной кислоты можно уменьшить в 5 -10 раз
Для выявления структуры серебра	Азотная кислота 5 мл; соляная кислота 20 -30 мл; глицерин 20 -30 мл	Травить в свежеприготовленном растворе обычным способом. Время травления – до нескольких минут. Образующуюся на поверхности шлифов темную пленку удалять раствором аммиака или цианистого калия
Для выявления структуры сплавов серебра с медью и серебряных припоев	2 % - ный раствор хлорного железа	Травить обычным способом 10-60 с. При травлении сплавов с медью рекомендуется добавить в раствор 20 - 30 мл перекиси водорода непосредственно перед употреблением
Для выявления структуры серебра и его сплавов	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 100 -50 мл; вода 2 - 60 мл	Травить обычно при комнатной температуре, можно в нагретом состоянии. Реактив иногда дает на поверхности шлифа пленку, которую можно удалить погружением в раствор аммиака
Для выявления структуры сплавов серебра с цинком, свинцом, мышьяком, кадмием и др.	2-6 % - ный раствор йода в этиловом спирте	Травить в холодном растворе 10 с и более. Рекомендуется в реактив добавлять соляную кислоту. Для замедления травления можно увеличить количество йода. Шлиф промыть только спиртом

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры сплавов серебра с цинком, кадмием, свинцом и другими металлами	Йод кристаллический 10 г; йодистый калий 20-30 г; вода 100 мл	Травить в холодном реактиве. Продолжительность травления от 0,5 до 2 минут. Образующийся на поверхности шлифа налет удалять водным раствором NaHSO_2 .

4.5 Редкие цветные металлы

Таблица 4.5.1 Реактивы для выявления структуры редкоземельных металлов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления границ зерен гадолиния	Молочная кислота 10 мл; фосфорная кислота 10 мл; азотная кислота 30 мл; уксусная кислота 20 мл	Травить обычным способом
Для выявления структуры мышьяка и его сплавов	2-5 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить обычным способом
Для выявления структуры церия и его сплавов	2-5 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить обычным способом. Продолжительность травления от нескольких секунд до нескольких минут. Для замедления травления рекомендуется добавлять спирт
Для выявления структуры церия и его сплавов	Азотная кислота 60 мл; глицерин 50 мл	Травить обычным способом. Увеличение количества азотной кислоты ведет к перетравливанию основы, уменьшение – к перетравливанию границы. Окисленный слой удалять раствором, состоящим из 42 мл ортофосфорной кислоты, 11 мл этоксиэтанола и 47 мл глицерина
Для выявления структуры гольмия и его сплавов	Молочная кислота 10 мл; фосфорная кислота 10 мл; азотная кислота 30 мл; уксусная кислота 20 мл	Травить обычным способом
Для выявления структуры диспрозия	Молочная кислота 10 мл; фосфорная кислота 10 мл; азотная кислота 30 мл; уксусная кислота 20 мл	Травить обычным способом
Для выявления структуры европия	Молочная кислота 10 мл; фосфорная кислота 10 мл; азотная кислота 30 мл; уксусная кислота 20 мл	Травить обычным способом
Для выявления структуры германия	Хромовый ангидрид 3 г; серная кислота 25 мл; вода 75 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре
Для выявления структуры сплавов мышьяк – гадолиний - цинк	25 % - ный водный раствор аммиака 10 мл; перекись водорода до 10 мл; вода 10 мл	Травить в свежеприготовленном растворе до одной минуты
Для выявления структуры индия и сплавов системы индий - кадмий и индий - цинк	Соляная кислота 3 - 5 мл; пикриновая кислота 1 - 4 г; этиловый спирт 95 - 100 мл	Травить обычным способом при комнатной температуре до одной минуты
Для выявления структуры иридия, осмия и их сплавов	5-20 % - ный водный раствор персульфата аммония 50 мл; 5-20 % - ный водный раствор цианистого калия 50 мл	Травление погружением или смачиванием тампоном на время от 0,5 до 3 минут. Иногда для усиления действия можно добавить 1 - 2 мл 3 % - ного раствора йодистого калия в воде
Для выявления структуры галлия и его сплавов (арсенида галлия)	3 % - ный водный раствор перекиси водорода 10 мл; 10 % - ный водный раствор едкого натрия 10-20 мл	Реактив применять нагретым, травить несколько секунд

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры сплавов селена	Азотная кислота 10 мл; соляная кислота 10 мл	Реактив применяется в горячем состоянии (до 70°C). Иногда рекомендуется реактив разбавлять водой
Для выявления структуры лантана	2-5%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте 0,5-6 % - ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте	Травить обычным способом при комнатной температуре. Время подбирать эмпирически Травить обычным способом

Таблица 4.5.2 Реактивы для выявления структуры теллура и его сплавов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры теллура и его сплавов	Азотная кислота 10 мл; Соляная кислота 10 мл	Реактив применять в горячем состоянии (до 70°C). Иногда рекомендуется реактив разбавлять водой
Для выявления структуры теллурида олова	Плавиковая кислота до 10 мл; перекись водорода 60 мл; вода 30 мл	Свежий реактив втирать тампоном, время травления до одной минуты
Для выявления структуры теллуридов свинца	Хромовый ангидрид 3 г; серная кислота 25 мл; вода 75 мл	Травить обычным способом

4.6 Радиоактивные металлы

Таблица 4.6.1 Реактив для выявления структуры тория и его сплавов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры сплавов систем торий - магний и торий – магний - цирконий	Уксусная кислота 20 мл; этилен-гликоль 60 мл; азотная кислота 1 мл; вода 20 мл	Травить обычным способом тампоном 5 -120 с с последующей промывкой в горячей воде

Таблица 4.6.2 Реактивы для выявления структуры урана и его сплавов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления структуры урана	Серная кислота 130 мл; перекись водорода 50 мл; кремнефтористый натрий 0,2 г; вода 60 мл	Шлиф погружать в реактив сразу после добавления серной кислоты. Образующуюся оксидную пленку удалять полированием. В результате реакции между кислотой и перекисью водорода раствор 2 -3 минуты кипит, после кипения структура выявляется хуже. При травлении мелкозернистых образцов количество воды уменьшают до 25 мл
Для выявления структуры урана	Уксусная кислота 20 мл; этилен -гликоль 60 мл; азотная кислота 1 мл; вода 20 мл	Травить тампоном 5-120 с с последующей промывкой в горячей воде. Рекомендуется еще добавлять воды
Для выявления структуры сплавов урана с железом и кобальтом	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить в холодном или нагретом до 60-80°C реактиве обычным способом. Время подбирать эмпирически

4.7 Сварные и паяные соединения цветных металлов

Таблица 4.7.1. Реактивы для выявления структуры сварных и паяных соединений цветных металлов

Область применения	Состав травителя	Применение
Для выявления макро- и	Щавелевая кислота 35 мл;	Травить обычным способом

микроструктуры сварных соединений титана и его сплавов (одно - и двухфазных).	плавиковая кислота 2 г; азотнокислое железо 5 г; метиловый спирт 200 мл	
Для выявления макроструктуры сварных швов титана и его сплавов	Соляная кислота 250 мл; серная кислота 35 мл; вода 100 мл	Травить погружением шлифа в нагретый до 70 – 90°C раствор 15 -20 с. Затем промыть шлиф горячей водой. Остатки кислоты нейтрализовать раствором соды
Для выявления макроструктуры при сварке алюминия и его сплавов	Хлорное железо 1 -25 г; Соляная кислота 1 -50 мл; вода 100 -120 мл	Травить на холоде 10 - 15 с обычным способом
Для выявления микроструктуры припоев: свинцовых, оловянносвинцовых, серебряных, а также при изучении промежуточных фаз паяных соединений меди и латуни 1 -25	10 % - ный раствор персульфата аммония в воде	Травить в холодном или кипящем реактиве до 15 мин
Для выявления структуры припоев сплавов систем свинец – сурьма, свинец – олово, висмут – олово, висмут – кадмий, кадмий – цинк и др	Хлорное железо 1 -25 г; соляная кислота 1 -50 мл; вода 100 -120 мл	Травить протираем поверхности шлифа тампоном 10-60 с. Для сокращения времени травления употреблять более концентрированные растворы
Для выявления структуры серебряных припоев	2 % - ный раствор хлорного железа в воде	Травить на холоде обычным способом. Иногда перед употреблением рекомендуется добавить в раствор 20-30 мл перекиси водорода
Для выявления структуры паяных соединений медных сплавов	А. Азотная кислота 1-20 мл; вода 100 мл Б. Азотнокислая ртуть 1 г; вода 100 мл	Травить в смеси равных объемов растворов А и Б, составленных перед употреблением. Время травления подбирают. Можно травить в растворах А и Б последовательно несколько секунд
Для выявления структуры медных и латунных припоев, применяемых при пайке углеродистых сталей	Насыщенный водный раствор аммиака	Травить погружением или смачиванием тампоном обычным способом
Для выявления структуры в сварных швах и зонах пайки меди и медных сплавах и оловянносвинцовистых припоев	Уксусная кислота 100 мл; перекись водорода 0,5 мл; вода 100 мл	Травить погружением 0,5 – 3 мин и более. Перекись водорода добавлять перед употреблением. Для выявления структуры оловянносвинцовистых припоев применять смесь уксусной кислоты и перекиси водорода в соотношении 4 : 1, 3 : 1, 2 : 1. Продолжительность травления 10 – 30 с. После травления промыть шлиф спиртом, просушить, поместить на несколько секунд в раствор азотной кислоты, перенести в воду, затем высушить окончательно
Для выявления серебряных припоев	Двухромовокислый калий 2 г; серная кислота 8 мл; насыщенный раствор хлористого натрия в воде 8 мл; вода 100 мл	Шлиф погрузить в свежеприготовленный раствор до нескольких минут, затем перенести в раствор хлорного железа, далее промыть и высушить

4.8 Твердые и спеченные сплавы

Таблица 4.8.1 Реактивы для выявления структуры твердых и спеченных сплавов

<i>Область применения</i>	<i>Состав травителя</i>	<i>Применение</i>
Для выявления структуры металлокерамических сплавов кобальта с карбидом	Хлорная медь 8 гр; 25-% водный раствор аммиака 100 мл;	Травить погружением или протираем 1 – 10 минут

тантала.		
Для выявления структуры твердых сплавов с кобальтом, титаном, танталом, карбидами и др.	3 % - водный раствор перекиси водорода	Травить в кипящем растворе. Можно добавлять в раствор аммиак, тогда реактив слегка подогревают
Для выявления структуры сплавов спекания систем кобальт – карбид молибдена (тантала)	Азотная кислота 10 мл; Соляная кислота 20 -30 мл; Глицерин 20 – 30 мл	Травить обычным способом. Продолжительность травления в свежеприготовленном растворе составляет 10 – 40 с и более. Можно применять многократное травление с переполнкой. Шлиф до травления рекомендуется подогреть в горячей воде или пользоваться подогретым реактивом
Для выявления структуры металлокерамических сплавов кобальта с карбидами вольфрама, молибдена, тантала	Азотная кислота 20 мл; уксусная кислота 30 мл	Травить только в свежеприготовленном растворе погружением при комнатной температуре. Время травления 5 – 60 с и более
Для выявления структуры сплавов спекания с MoC-Co	10 -30 % - ный водный раствор азотной кислоты	Травить при 50 -80°C несколько минут
Для интенсивного выявления структуры сплавов спекания систем углерод – кобальт, карбид молибдена – кобальт, карбид тантала – углерод, а также сплавов карбид кобальта – железо, карбид молибдена - железо	Плавиковая кислота 10 мл; Азотная кислота 10 мл	Шлиф погружать в нагретый до 50°C раствор до одной минуты и более
Для выявления структуры твердых сплавов и металлокерамических сплавов, особенно при необходимости распознавания карбидов. В сплавах типа карбиды – кобальт (вольфрама, хрома, молибдена) выявляются эвтектические карбиды, твердый раствор не травится. В сплавах типа железо – карбиды вольфрама и титана – кобальт и титановая фаза по границам зерен покрывается пленкой темно – желтого цвета. В сплавах типа железо карбид вольфрама (молибдена) травятся все карбиды, оставляя светлым фон твердого раствора	Красная кровяная соль 10 г; едкое кали 10 г; вода 100 мл	Травить в холодном или горячем (60 – 80°C) свежеприготовленном растворе 1,5 – 10 минут. Карбиды лучше распознавать не по окраске, а по времени выявления данным реактивом. Реактив хранить в темной посуде и использовать сразу после приготовления. Состав не постоянен. Для металлокерамических сплавов рекомендуется разбавить реактив равным количеством воды и травить от нескольких секунд до одной минуты

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

4.9 Цветные сплавы

Таблица 4.9.1 Режимы и реактивы для алюминия и его сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электроотравления			
		Е, В	Д _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Фтороборная кислота 1-2 %; вода 97 -98 %	5 - 8	10 - 25	15 - 20	12 – 18
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Фосфорная кислота (плотность 1,71) 100 %	12 -15	210	25 - 30	3 – 5
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Хлорная кислота 22 мл; ацетон 80 мл	30 - 40	4 - 8	менее 20	5 – 20
Сплавы алюминиевые (универсальный)	Плавиковая кислота 50 мл; глицерин 100 мл	6 - 12	1,5	15 - 20	5 – 20

Таблица 4.9.2 Режимы и реактивы для магния и его сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электроотравления			
		Е, В	Д _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы магниевые (универсальный)	Едкий натр 50 г; вода 50 мл	6 -10	4	0,5	24

Таблица 4.9.3 Режимы и реактивы для меди и ее сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электроотравления			
		Е, В	Д _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы медные (универсальный)	Уксуснокислый аммоний 10 %; вода 90 %	1 - 2	0,3	15 - 20	30
Сплавы медные (универсальный)	Хромовый ангидрид 10 %; вода 90 %	1 - 2	1 - 2	15 - 20	1 – 2
Латуни	Фосфорная кислота (плотность 1,3-1,4) 100 %	1,8	1,3 - 1,5	15 - 20	5 – 10
Латуни	Фосфорная кислота (плотность 1,5 – 1,7) 100 %	0,6	1 - 2	20 - 25	5 – 15
Бронзы	Хромовый ангидрид 1 %; вода 99 %	6	2 - 3	15 - 20	3 – 6
Бронзы алюминиевые	Уксусная кислота 10 %; щавелевая кислота 10 %; вода 80 %	4 - 6	2	15 -20	10 – 30
Сплавы медь – кобальт	Уксусная кислота (плотность 1,7) 100 %	2	2.5 - 3	20 - 25	5 – 20

Таблица 4.9.4 Режимы и реактивы для никеля и его сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электроотравления			
		Е, В	Д _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы никелевые (универсальный)	Соляная кислота 20 %; метиловый спирт 80 %	6 -10	2	15 - 20	110
Сплавы никелевые (универсальный)	Азотная кислота (плотность 1,4) 1 часть; метиловый спирт.2 части	12-15	90 - 150	10 - 15	10 -30
Сплавы никелевые (универсальный)	Едкий натр 10 %; вода 90 %	1 - 2	10 - 15	Менее 29	10 -20
Сплавы никель – кобальт	Серная кислота 50 % - ная 500 мл; сернокислый аммоний 25 г; лимонная кислота 25 г; метиловый спирт 100 мл; вода 350 мл	4 - 6	5 - 6	20 -25	60-120
Сплавы никель – хром – титан	Перекись натрия 5 %; вода 95 %	3 - 4	2 - 5	20 - 30	15 – 30

Таблица 4.9.5 Режимы и реактивы для свинца и его сплавов

Металл	Состав электролита	Режим			
		Е, В	D _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы свинцовооловянные	Хлорная кислота (плотность 1,48) 25 мл; уксусная кислота 75 мл	6	1	менее 20	1 – 2
Сплавы свинца с сурьмой	Хлорная кислота (плотность 1,6) 10-60 мл; вода 90-40 мл	2	9	менее 20	5 – 10

Таблица 4.9.6. Режимы и реактивы для титана и его сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электротравления			
		Е, В	D _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы титановые (универсальный)	Марганцовокислый калий 2 г; едкий натр 2 г; вода 1000 мл	12 - 15	100	20 -30	5 -10
Сплавы титановые (универсальный)	Хлорная кислота 5 %; уксусная кислота 95 %	30 - 40	1	30-40	5 -30
Сплавы титановые (универсальный)	Хромовый ангидрид 8 г; вода 10 мл	2 - 3	0,5	20-30	10 -60
Сплавы титана с алюминием	Плавиковая кислота 5 мл; глицерин 10 мл	3 - 4	1 - 2	20 -30	5 -10
Сплавы титана с ураном	Щавелевая кислота 10 % -ная 100 мл; 48 %- ная плавиковая кислота 2 г	3 - 4	1 - 2	20 -25	5 -10

Таблица 4.9.7 Режимы и реактивы для хрома и его сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электротравления			
		Е, В	D _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы хромистые (универсальный)	Гипосульфит 10 %; вода 90 %	6 - 10	1 - 2	20 -25	5 -20
Сплавы хромистые (универсальный)	Азотная кислота (плотность 1, 4) 1 часть; метиловый спирт 2 части	8 - 12	1	менее 15	1 -5
Сплавы хромистые (универсальный)	Хромовый ангидрид 10 %; вода 90 %	4 - 6	0,5	20 -25	5 -15
Сплавы хрома с кобальтом	Царская водка 6 мл; вода 100 мл	3,0 – 4,5	1 -2	20 -30	3
Сплавы хрома с кобальтом	Хромовый ангидрид 5-10 г; вода 100 мл	3	0,2 – 0,5	15 -25	3
Сплавы хрома с вольфрамом	Едкий натр 10 - 20 г; вода 100 мл	6 -10	2	20 -30	300
Сплавы хрома с вольфрамом	10 % - ная красная кровяная соль 1 часть; 1 - 5 % - ный раствор едкого натра 1 часть	4 - 8	2	20 -25	10 -100

Таблица 4.9.8 Режимы и реактивы для цинка и его сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электротравления			
		Е, В	D _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы цинковые (универсальные)	Фосфорная кислота 32,5 %; этиловый спирт 67,5 %	6 - 12	0,5 -0,6	20	10 - 25
Сплавы цинковые (универсальные)	Едкое кали 25 г; вода 100 мл	6	16	20 - 30	15
Сплавы цинково - медные	Хромовый ангидрид 20 г; вода 100 мл	6	2,5	15 - 30	5 - 20

Таблица 4.9.9 Режимы и реактивы для драгоценных и редких металлов и их сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электротравления			
		Е, В	D _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Сплавы платины (универсальный)	Соляная кислота 5 мл; этиловый спирт 95 мл	6 - 12	50	15 -20	5 - 8
Сплавы платины (универсальный)	Расплавленный хлористый натрий при 860°С 100 %	2,5	300	800 -900	5 - 6
Сплавы платины с иридием, родием, рутением	Расплавленный бисульфат калия (300°С) 100 %	2,5	300	300 -400	10 -50
Золото, серебро и их сплавы	Разбавленный раствор соляной кислоты или 5 % - ный раствор цианистого калия	6	2 -1 0	20 -30	10 - 30
Цирконий и его сплавы (универсальный)	10 % - ный раствор хлорной кислоты ч.; уксусная кислота(ледяная) ч.10	30 -70	2-50	20 -25	45
Иридий и его сплавы (универсальный) (границы зерен)	25 – 30 % - ная соляная кислота 100 мл	6 -12	2 -10	15 -20	3-20

Таблица 4.9.10 Режимы и реактивы для радиоактивных металлов и их сплавов

Металл	Состав электролита	Режим электротравления			
		Е, В	D _а , А/дм ²	Т, °С	τ, мин
Уран и его сплавы (универсальный)	Уксусная кислота 10 %; азотная кислота 10 %; вода 80 %	12 -15	5 -10	15 - 25	10
Уран и его сплавы (универсальный)	Концентрированный раствор аммиака 90 %; перекись водорода 10 %	12	2 - 5	15 - 20	1
Уран и его сплавы (универсальный)	Лимонная кислота 4,5 %; серная кислота (плотность 1,84) 0,5 %; вода 95 %	6 - 10	5	25 - 30	30 - 40
Тантал и его сплавы (универсальный)	Серная кислота (плотность 1,84) 90 мл; 48 % - ная соляная кислота 10 мл	4 - 6	2	35 - 45	10

ГЛАВА 5

СТАНДАРТНЫЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Для российских экспортно - ориентированных предприятий соответствие их продукции требованиям отечественных и международных стандартов становится средством конкурентной борьбы с другими производителями на внутреннем и внешнем рынках сбыта.

В главе приведены все имеющиеся в настоящее время стандартные методы металлографического контроля качества металлопродукции. Для каждого метода указаны его суть, область применения, чувствительность, погрешность, порядок проведения контроля.

Применение этих методов позволит повысить эффективность и надежность сравнительного контроля качества металлопродукции/

5.1 Метод определения микроструктуры стали

Метод устанавливает шкалы основных элементов структуры стали: перлита, мартенсита, нитридов и карбидов (в соответствии с ГОСТ 8233-56).

Суть метода: определяют тип микроструктуры и дисперсность структурных составляющих на образцах из исследуемых сталей путем сопоставления их структур с эталонными шкалами характерных микроструктур.

Для оценки микроструктуры вырезают образцы, количество, размеры и место вырезки которых должны быть оговорены в соответствующей нормативно-технической документации.

Образцы должны быть протравлены для выявления структуры в растворах, указанных в ГОСТ 8233-56.

Приведены таблицы шкал и баллов размеров указанных структур.

Количественные характеристики основных элементов микроструктуры приводят на основе сопоставления структуры исследуемого образца с эталонами структур соответствующих в том же ГОСТе. При этом оценку нитридов, карбидов и карбидной неоднородности проводят сравнениями наихудшего по включением поля зрения, встречающегося при просмотре площади шлифа, соответствующими шкалами ГОСТ 8233-56.

Для более точного количественного металлографического анализа структурных составляющих применяют линейный или планиметрический методы.

Перлит

В зависимости от степени дисперсности пластинчатый перлит подразделяют на 10 баллов согласно приведенной в ГОСТе 8233-56 табл. 4, в которой указаны характеристики перлита (сорбитообразный, -скрыто- тонко-, мелко-, средне-, крупно-, грубопластинчатые формы) и межпластинчатые расстояния для каждой формы, мкм.

В шкале 1 приведены характерные примеры микроструктуры пластинчатого перлита (при увеличении 1000 крат), подразделенные по 10-балльной системе.

В зависимости от степени дисперсности зерен цементита зернистый перлит подразделяют на 10 баллов согласно приведенной в ГОСТе таблице 5, в которой указаны для каждого балла: характеристики перлита (точечный, весьма мелко-, мелко-, средне-, крупно-, грубозернистые формы) и средний диаметр зерен цементита в мкм.

В шкале 2 приведены характерные примеры микроструктуры зернистого перлита (при увеличении 1000 крат), подразделенные по 10 - балльной системе.

Мартенсит

В зависимости от размеров (длины) игл мартенсит подразделяют на 10 баллов согласно приведенной в ГОСТе табл.6, в которой указаны для каждого балла характеристики мартенсита (скрыто-, весьма мелко-, мелко-, средне-, крупно-, грубоигльчатые формы) и наибольшая длина игл, мкм.

В шкале 3 приведены характерные примеры микроструктуры игольчатого мартенсита при увеличении 1000 крат, подразделенные по 10 - балльной системе.

Шкала 3 также применяется для оценки сорбита отпуска, если в нем сохранена ориентировка по мартенситу.

Нитриды

В зависимости от количества нитридов (количество штук на определенной площади микрошлифа) структуру стали подразделяют на 10 баллов согласно приведенной в ГОСТе табл. 7, в которой указаны для каждого балла длина игл, количество нитридов и их протяженность на единицу площади.

В шкале 4 приведены характерные примеры схемы микроструктуры нитридов (при увеличении 500 крат), подразделенные по 10 - балльной системе.

Карбиды

В зависимости от характера карбидной сетки структуру заэвтектоидной стали подразделяют на 6 баллов согласно приведенной в ГОСТе шкале 5, в которой указаны для каждого балла при увеличении 500 крат характерные микроструктуры.

В зависимости от характера карбидной неоднородности структуру стали подразделяют на 6 баллов согласно приведенной в ГОСТе шкале 6, в которой указаны для каждого балла при увеличении 100 крат характерные микроструктуры:

а – заэвтектоидные стали; **б** – стали ледебуритного класса.

В приложении к ГОСТу приведены рекомендуемые шкалы соотношения феррита и перлита, зернистого и пластинчатого перлита, мартенсита и троостита.

В шкале 7 приведены примеры характерных микроструктур при увеличении 100 крат ферритно-перлитной стали, подразделенных по 10- балльной системе. Указано соотношение феррита и перлита.

В шкале 8 приведены примеры характерных микроструктур стали при увеличении 500 крат, подразделенных по 10 -балльной системе. Показано соотношение мартенсита и троостита.

В шкале 9 приведены примеры характерных микроструктур перлитной стали при увеличении 500 крат, подразделенных по 10 - балльной системе. Показано соотношение зернистого и пластинчатого перлита.

5.2 Методы определения неметаллических включений в стали.

Металлографические методы определения неметаллических включений в сталях всех марок и способов выплавки устанавливают правила испытаний литого и деформированного металла на загрязнение неметаллическими включениями (в соответствии с ГОСТ 1778-70), в котором. приведены характеристики видов неметаллических включений (оксиды, силикаты, сульфиды, нитриды).

Оксиды представляют собой:

Включения отдельных мелких зерен, чаще корунда и шпинелей, расположенные в виде строчек;

Точечные включения преимущественно простых и сложных кристаллов, оксидов в виде отдельных частиц или разрозненных групп, рассредоточенных по всей плоскости шлифа.

К силикатам относятся следующие:

разрушенные в результате деформации вытянутые в сплошные строчки хрупкие силикаты или силикатные стекла, иногда вместе с включениями оксидов;

пластично деформированные включения силикатов или силикатных стекол, вытянутые по направлению волокна;

включения, отличающиеся от сульфидов более темным цветом и прозрачностью в темном поле зрения;

недеформирующиеся (глобулярные) единичные или групповые округлые или неправильной

формы включения силикатов и силикатных стекол, крупные частицы сложных соединений, содержащих оксидные включения.

К сульфидам относятся:

пластинчатые, непрозрачные в темном поле зрения, вытянутые по направлению волокна отдельные включения или группы включений, двойного сульфида железа и марганца.

К нитридам относятся:

строчки и рассредоточенные по всему полю зрения желто-розовые кристаллы нитридов и карбонитридов титана, преимущественно правильной формы; строчки и рассредоточенные по всему полю зрения бледно-розовые кристаллы нитридов и карбонитридов неправильной и округлой формы; темные кристаллы нитридов алюминия, в основном правильной формы, анизотропные.

Неметаллические включения определяют:

Методом Ш – сравнением с эталонными шкалами, используется для исследования деформированного металла;

Методом К – подсчетом количества включений, применяется для исследования деформированного и литого металла;

Методом П – подсчетом количества и объемного процента включений; применяется для исследования деформированного и литого металла;

Методом Л – линейным подсчетом включений; применяется для исследования литого металла.

Количество образцов для определения загрязненности металла неметаллическими включениями указывается в стандартах на продукцию и в технической документации, утвержденной в установленном порядке, и зависит от требуемой точности определения. Указан порядок и правила отбора образцов от деформированного металла (прутков, бунтов, труб, листов, полос) и литого металла (слитков, проб отливок), заготовок для разрывных образцов.

В ГОСТе показаны схемы характерных мест вырезки образцов для изготовления шлифов из различных полуфабрикатов:

из круглого и квадратного профилей различного размера;

из труб различного диаметра;

из листов и полос различной толщины;

из слитка;

из отливки сложной формы (трефы).

В ГОСТе приведены различные методы испытаний.

Метод Ш

Суть метода: оценку неметаллических включений в деформированном металле диаметром или толщиной не менее 6 мм производят под микроскопом сравнением с эталонными шкалами нетравленных шлифов с продольным направлением волокон.

В методе Ш приведена пятибалльная шкала, классифицирующая различные виды неметаллических включений. В ГОСТе даны критерии оценки загрязненности шлифов и плавки неметаллическими включениями.

Метод К

Суть метода: подсчитывают количество включений в литых и деформированных сталях под микроскопом на нетравленных шлифах.

Для деформированного металла применяют шлифы с продольным направлением волокна. Площадь шлифа просматривают при строго определенном увеличении и цене деления окулярной шкалы. Отдельно определяют количество кислородных сульфидных и нитридных включений по размерным группам, установленным в методе К.

Приведены правила и формулы оценки размеров вытянутых включений и таблица, в которой даны критерии оценки загрязненности неметаллическими включениями данного шлифа и плавки.

Метод П

Суть метода: площадь включений литых и деформированных сталей определенных размеров подсчитывают под микроскопом на нетравленных шлифах. Для оценки деформированного металла применяют шлифы с поперечным направлением волокон. Допускается применение шлифов с продольным направлением волокон.

В методе П приведены 13 - балльная шкала, классифицирующая размер включений по площади, и таблица, в которой даны критерии оценки загрязненности неметаллическими включениями шлифа и плавки.

Приведены формулы подсчета средней площади включений, содержания включений в объемных процентах.

Метод Л

Суть метода: загрязненность литой стали неметаллическими включениями определяют под микроскопом на нетравленных шлифах; оценивают максимальные размеры включений, которые измеряют и фиксируют в соответствии с 8 группами, указанными в таблице, приведенной в ГОСТе.

Загрязненность шлифов оценивают отдельно по кислородным, сульфидным и нитридным включениям или совокупно по всем видам включений. Приведены формулы для вычисления загрязненности неметаллическими включениями плавки методом Л.

В приложении 1 к ГОСТу даны варианты методов определения загрязненности неметаллическими включениями металла различных способов производства и групп стали.

5.3 Методы определения величины зерна в сталях и сплавах

Металлографические методы выявления и определения характеристики зерна в сталях и сплавах (в соответствии с ГОСТом 5639-82) позволяют установить:

- величину действительного зерна (после горячей деформации или любой термической обработки);
- склонность зерна к росту – определением величины зерна аустенита после нагрева при определенных температуре и времени выдержки, установленных нормативно-технической документацией на стали и сплавы;
- кинетику роста зерен – определением величины зерна после нагрева в интервале температур и времени выдержки, установленных нормативно-технической документацией на стали и сплавы.

В ГОСТе 5639-82 указаны правила отбора образцов, их размеры и количество для различных видов испытаний.

Методы выявления границ зерен

Для выявления границ зерен используют методы травления, цементации, окисления, сетки феррита или цементита, сетки перлита (троостита), вакуумного термического травления. Метод выбирают в зависимости от химического состава стали и цели испытания.

Метод травления

Применяют для выявления границ действительного зерна, а также границ зерен аустенита в углеродистых и легированных сталях, закаливающихся на мартенсит или бейнит, и сталях, в которых затруднено получение ферритной или цементитной сетки.

В ГОСТе приведены реактивы, режимы и способы травления шлифов для выявления границ зерен.

Метод цементации

Применяют для выявления зерна аустенита в сталях, для цементации, и для углеродистых нецементируемых сталей с массовой долей углерода до 0,25%.

Границы зерен выявляются в цементированном слое в виде сетки вторичного цементита.

В ГОСТе приведены правила, температурные и временные режимы цементации, реактивы, которыми после цементации выявляют цементитную сетку.

Метод окисления

Применяют для конструкционных и инструментальных (углеродистых и легированных) сталей.

Границы зерен аустенита выявляют по сетке оксидов.

В ГОСТе приведены режимы и среды нагрева, реактивы, которыми выявляют границы зерен после нагрева.

Метод сетки феррита или цементита

Применяют для выявления границ зерен в доэвтектоидных (с массовой долей углерода до 0,6 %) и заэвтектоидных сталях.

Границы зерен выявляются после нагрева до определенной температуры и времени выдержки. Описаны режимы термической обработки образцов для образования ферритной или цементитной сетки.

В ГОСТе приведены реактивы и режимы последующего травления микрошлифов для выявления ферритной или цементитной сетки.

Метод сетки перлита (троостита)

Применяют для углеродистых и низколегированных сталей, близких по составу к эвтектоидным.

Границы зерен выявляются темно-травящейся сеткой перлита.

Приведены режимы нагрева при определенных температуре и времени и особенности охлаждения образца для образования сетки перлита, реактивы и режимы травления микрошлифов после термической обработки.

Метод вакуумного термического травления

Применяют для определения кинетики роста аустенитного зерна. Метод основан на избирательном испарении металла по границам зерен при высоких температурах.

Для выявления зерна этим методом используют высокотемпературные микроскопы.

Описана технология проведения этого метода

Методы определения величины зерна

Величину зерна определяют методами:

- визуального сравнения видимых под микроскопом зерен с эталонами, приведенными в Приложении 2 ГОСТ 5639-82 с определением номера зерна;
- подсчета количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа с определением среднего диаметра и средней площади зерен;
- подсчета пересечения границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра (при равноосных зернах) или количества зерен на площади в 1 мм² (при неравноосных зернах);
- измерения длин хорд под микроскопом или на микрофотографиях с определением относительной доли зерен определенного размера;
- ультразвуковым, основанным на зависимости затухания ультразвуковых колебаний в поликристаллическом материале от размера зерна

Для всех методов описан порядок проведения измерений, приведены шкалы, таблицы и формулы расчетов величины зерен.

В Приложении к ГОСТу 5639-82 приведены примеры:

- подсчета количества зерен на единицу поверхности шлифа и расчета среднего диаметра

зерна;

- подсчета пересечения зерен при равноосных и неравноосных зернах;
- оценки величины зерен в разнотелной структуре методом измерения длин хорд;
- определения величины зерна ультразвуковым методом.

5.4 Метод оценки микроструктуры листов и лент из стали

Метод устанавливает правила металлографических способов оценки структурно -свободного цементита, перлита, полосчатости и видманштеттовой структуры в листах и лентах из малоуглеродистой и углеродистой стали (в соответствии с ГОСТом 5640-68).

Описаны правила вырезки образцов для изготовления микрошлифов, направление вырезки и количество образцов, необходимое для различных измерений, правила удаления наклепанного от механической обработки слоя.

Приведены травители и режимы травления для правильного и полного выявления исследуемых структурных составляющих. Описаны необходимые увеличения при наблюдении под микроскопом для оценки каждого вида структурных составляющих.

Приведены шестиступенчатые шкалы для оценки каждого вида структурных составляющих:

- шкала 1 – структурно-свободный цементит (табл.1 ГОСТа 5640 - 68);
- шкала 2 – перлит в малоуглеродистой деформированной стали (табл.2 ГОСТа 5640 -68);
- шкала 3 – полосчатость ферритно-перлитной структуры (табл. 3 ГОСТа 5640 -68);
- шкала 4 – видманштеттова структура (табл.4 ГОСТа 5640 - 68).

В каждой таблице дано описание и приведены рисунки микроструктуры в зависимости от номера балла.

5.5 Методы определения структуры отливок из чугуна

Методы устанавливают правила определения и оценки структуры серого чугуна с пластинчатым графитом, высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом и ковкого чугуна с компактным графитом (в соответствии с ГОСТом 3443-87 с учетом ИСО 945-75).

Распространяется на структуры нелегированного и низколегированного чугуна в литом состоянии, подвергнутого отжигу для снятия внутренних напряжений, высокотемпературному отжигу, нормализации и другим видам термической обработки, кроме высокопрочных чугунов.

Структуру чугуна определяют по графиту и металлической основе.

При определении графита устанавливают форму, распределение, размеры, количество включений графита.

При определении металлической основы устанавливают вид структуры, форму перлита, содержание перлита (или феррита, его дисперсность, строение, распределение, размеры ячеек сетки и площадь включений фосфидной эвтектики, количество и размеры включений цементита (или цементита ледебурита).

В табл.1 ГОСТа указаны условные обозначения компонентов структуры чугуна и их характерные особенности.

В ГОСТе указаны правила и места вырезки образцов из отливок, специально отлитых проб и литых заготовок. Описаны порядок изготовления шлифов и реактивы для их травления с целью выявления определенного вида структуры (Приложение 2 ГОСТа).

В зависимости от вида чугуна графит в его структуре определяют по шкалам 1 -4 (Приложение 3 ГОСТа):

- для чугуна с пластинчатым графитом – по шкале 1;
- для чугуна с вермикулярным графитом – по шкале 2;
- для чугуна с шаровидным графитом – по шкале 3;
- для чугуна с компактным графитом – по шкале 4.

Формы включений графита оценивают:

- для чугуна с пластинчатым графитом – по шкале 1А;
- для чугуна с вермикулярным графитом – по шкале 2А;
- для чугуна с шаровидным графитом – по шкале 3А;
- для чугуна с компактным графитом – по шкале 4А.

Размеры включений графита оценивают по табл.2 ГОСТа и по шкалам:

- для чугуна с пластинчатым графитом – по шкале 1Б;
- для чугуна с вермикулярным графитом – по шкале 2Б;
- для чугуна с шаровидным графитом – по шкале 3Б;
- для чугуна с компактным графитом – по шкале 4Б.

В зависимости от включений графита структуру чугуна оценивают по табл.3 и 4 ГОСТа

Определение структуры металлической основы чугуна

Для разных типов основы структуру чугуна определяют по табл.5 – 10 ГОСТа 3443-87, где описаны характерные типы структур, их условные обозначения в зависимости от количества и степени дисперсности.

В шкале 1 Приложения 3 ГОСТа приведены примеры формы включений графита, их размеры и распределение (см. также рис 2.11 в гл. 2).

В шкале 2 приведены виды вермикулярного графита в структуре чугуна. Показаны их характерная форма, распределение, количество включений в процентах.

В шкале 3 показаны типичные виды шаровидного графита в структуре чугуна: их форма, размеры, распределение, количество.

В шкале 4 показаны типичные виды компактного графита в структуре ковкого чугуна: форма включений, их размеры, распределение.

В шкале 5 показан вид структуры металлической основы чугуна.

В шкале 6 показан вид структуры чугуна с различным содержанием и формой феррита и перлита.

В шкале 7 показаны виды краевой зоны ковкого чугуна.

В шкале 8 представлены различные виды дисперсности перлита в структуре чугуна.

В шкале 9 показаны виды фосфидной эвтектики в структуре чугуна.

В шкале 10 показаны виды цементита в структуре чугуна.

5.6 Методы определения ферритной фазы в прутках из аустенитной стали

Методы устанавливают правила определения ферритной фазы в прутках из аустенитной стали металлографическим и магнитным способами (в соответствии с ГОСТом 11878-66).

Распространяются на аустенитные нержавеющие стали большинства марок, указанных в ГОСТе. Контролю на содержание ферритной фазы (СФФ) подвергают кованые и катаные прутки диаметром или толщиной от 80 до 270 мм.

В ГОСТе 11878-66 указан порядок отбора образцов и вырезки шлифов для определения СФФ.

Определение СФФ металлографическим методом

Суть метода: микрошлиф подвергают электролитическому или химическому травлению в указанных в ГОСТе реактивах, шлиф просматривают под микроскопом и визуально оценивают в баллах или в процентах путем сравнения с фотоэталоном прилагаемой шкалы.

Определение СФФ магнитным методом

Суть метода: основным магнитным методом высшей точности является метод магнитного насыщения на приборе ферритометре (ГОСТ 26364-90). Определение СФФ проводят на шлифованной поверхности микрошлифов, изготовленных на анализируемых образцах.

5.7 Методы оценки макроструктуры проката из сталей

Методы устанавливают правила оценки и эталонные шкалы для контроля макроструктуры и изломов прутков и заготовок диаметром или толщиной от 40 мм (наименьшая сторона) до 250 мм (наибольшая сторона) поперечного сечения (в соответствии с ГОСТом 10243-75).

Распространяется на кованные и катаные углеродистые легированные и высоколегированные стали. Допускается по согласованию с потребителем использовать для контроля макроструктуры заготовок, поковок и изделий других сечений и размеров.

Необходимость проведения контроля макроструктуры, количества проб и мест их отбора по длине раската слитка, размеров проб после перековки, а также нормы по допустимым дефектам и перечень недопустимых дефектов определяется стандартами или техническими условиями на конкретные виды продукции.

Суть методов: методы основаны на различии в травимости макротемплетов бездефектного металла и участков с наличием пор, ликвации, неоднородности структуры и других дефектов и на различии вида разрушения металла с пористостью, флокенами, перегревом, скосами и без них.

В ГОСТе 10243-75 изложены правила контроля качества металла по макроструктуре и излому, способы выявления макроструктуры (оборудование, реактивы, режимы травления), подготовка изломов к их изучению и выявление дефектов металла. Даны необходимые увеличения при изучении макроструктуры и изломов.

Отбор проб и изготовление образцов.

В ГОСТе 10243-75 описаны правила вырезки заготовок и образцов из слитков и прутков.

Даны следующие рекомендации по контролю проб и заготовок:

- при разливке металла сверху сифоном;
- для металла вакуумно-индукционной выплавки;
- для металла вакуумно-дугового, электронно-лучевого, плазменно-дугового, электрошлакового и других переплавов;
- проб для контроля на флокены.

Приведены схемы вырезки образцов, описаны схемы очистки поверхности изломов, порядок оценки протравленных темплетов и изломов.

Определение вида и оценку степени развития дефектов макроструктуры проводят сравнением вида свежепротравленных образцов с эталонами шкал, приведенными в ГОСТе 10243-75 или с фотоснимками и их описаниями.

Каждая шкала подразделяется на пять баллов по степени возрастания размеров или количества дефектов. В Приложении к ГОСТу приведены шкалы микроструктур, иллюстрирующие следующие виды дефектов:

- шкала 1 – центральная пористость;
- шкала 2 – точечная неоднородность;
- шкала 3 – общая пятнистая ликвация;
- шкала 4 – краевая пятнистая ликвация;
- шкала 5 – ликвационный квадрат;
- шкала 6 – подсадочная ликвация;
- шкала 7 – подкорковые пузыри;
- шкала 8 – межкристаллитные трещины;
- шкала 9 – послойная кристаллизация;
- шкала 10 – светлая полоска (контур).

В Приложении к ГОСТу приведены методы контроля химической неоднородности стали с помощью отпечатков.

Метод серного отпечатка (по Бауману)

Для получения отпечатка, позволяющего судить о распределении серы в металле, темплеты шлифуют до удаления рисок, полируют (по ГОСТу 6456-82), обезжиривают и протирают 5% - ным раствором серной кислоты. Фотобумагу, предварительно замоченную в этом же растворе

кислоты, накладывают эмульсионной стороной на поверхность темплета. Отпечатки снимают при комнатной температуре в течение 3-15 мин в зависимости от легирования стали и содержания в ней серы и фосфора. В местах скопления сернистых включений потемнение фотобумаги будет максимальным в соответствии с количеством образующегося здесь сернистого серебра.

Готовый отпечаток обрабатывают в фиксаже и просушивают.

Метод выявления скоплений свинца (по Брэггу)

Плоскость темплета шлифуют, обезжиривают и опускают в 10 % - ный раствор надсернистой кислоты, выдерживая его до получения серой окраски, затем вынимают и высушивают. Бромсеребряную бумагу (ГОСТ 10752-79) замачивают на определенное время в тиосульфате натрия, высушивают и снова замачивают в 5 % - ном водном растворе едкого натра, слегка подсушивают и накладывают на темплет эмульсионной стороной.

Готовый отпечаток погружают в 5 % - ный раствор сульфида натрия, промывают водой и высушивают.

При наличии в стали свинца отпечаток получается светло-коричневого цвета с темными пятнами в местах ликвации.

Оценку отпечатков, полученных указанными методами, проводят сравнением их с внутризаводскими эталонами или описанием характера распределения серы или свинца. Например, равномерное или неравномерное распределение, в форме сплошного квадрата или контура, в осевой или краевой зоне и др.

5.8 Методы оценки макроструктуры жаропрочных сплавов

Методы устанавливают правила оценки и контроля макроструктуры и изломов жаропрочных сплавов (в соответствии с ГОСТ 22838-77).

Распространяются на прокат из жаропрочных сплавов на никелевой и железоникелевой основе в виде прутков и заготовок толщиной или диаметром от 20 до 220 мм, полученных методом горячего деформирования.

Допускается применять эти методы контроля для оценки проката других сплавов и размеров.

Суть методов: на шлифах и изломах выявляют макроструктуру и дефекты и оценивают их путем сопоставления с соответствующими шкалами.

Оцениваются следующие виды макроструктур и дефектов:

- центральная пористость;
- ликвационный квадрат;
- подсадочная ликвация;
- подкорковые пузыри;
- межкристаллитные трещины;

- светлые полосы (контур);
- точечно-пятнистая неоднородность;
- полосчатая неоднородность;
- структура слоистого излома;
- расслоение в изломе;
- разнозернистая макроструктура;
- остатки лигатуры;
- частицы короны;
- поджог;
- слоисто-волокнистый излом;
- величина макрозерна.

Дано описание макроструктур и некоторых дефектов. Предлагается при одновременном присутствии нескольких дефектов оценку и классификацию каждого дефекта проводить отдельно.

Изложены методы отбора проб для оценки макроструктуры и вида излома при различных способах выплавки, разливки и переплава, указаны места вырезки и количества образцов из проб и заготовок различного диаметра.

Указаны реактивы и режимы травления для выявления макроструктуры, описаны порядок подготовки макрообразцов для исследования, методики оценки макроструктуры и изломов.

5.9 Методы определения глубины обезуглероженного слоя в сталях

Методы устанавливают правила определения глубины обезуглероженного слоя в сталях (в соответствии с ГОСТ 1763-92 с учетом ИСО 3887-2003).

Распространяются на деформируемые стали: конструкционные, инструментальные, рессорно-пружинные, подшипниковые, поставляемые в виде горячекатаных и кованых прутков и заготовок диаметром или стороной квадрата до 150 мм, горячекатаных полос, труб, листов, лент, катанки, холоднокатаных листов и лент, а также холодноотянутых прутков, проволоки, труб.

Глубину обезуглероженного слоя определяют следующими методами:

металлографическими методами – М, М1, М2;

методом измерения термоэлектродвижущей силой (т.э.д.с.);

методом измерения твердости – Т;

химическим методом – Х.

Приведена информация для выбора метода оценки обезуглероживания.

При определении глубины обезуглероженного слоя различают две зоны обезуглероживания: зону полного обезуглероживания и зону частичного обезуглероживания.

Зона полного обезуглероживания характеризуется структурой чистого феррита, зона частичного обезуглероживания – структурой отличной от структуры основного металла.

Общая глубина обезуглероживания включает обе зоны и измеряется от края шлифа до основной структуры металла.

Глубину обезуглероженного слоя определяют как максимальную глубину для заданного образца или как среднюю величину из пяти измерений в местах наиболее значительного обезуглероживания с указанием максимальной глубины.

Метод М

Суть метода: глубину обезуглероженного слоя определяют по структуре под микроскопом на поперечных травленых шлифах.

Применяется для конструкционных – углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода не менее 0,3%, для инструментальных, рессорно-пружинных и подшипниковых сталей.

Образцы для различных изделий и полуфабрикатов вырезают по правилам ГОСТ 1763-92.

Глубину обезуглероженного слоя определяют в миллиметрах (мм) при увеличении 100 крат. Допускается увеличение 200 -500 крат.

Зона полного обезуглероживания характеризуется чистого феррита. Зона частичного обезуглероживания характеризуется: для доэвтектоидной стали – ферритно-перлитной структурой, содержание феррита в которой больше, чем в основной структуре, и для заэвтектоидной стали – ферритно-перлитной структурой, зоной пластинчатого перлита, обедненной карбидами.

Метод М1 (карбидная метка)

Суть метода: глубину обезуглероженного слоя определяют по структуре под микроскопом на поперечных травленных шлифах, изготовленных на образцах, подвергнутых специальной термической обработке и окрашивающему травлению.

Применяется для заэвтектоидных сталей.

Образцы вырезают по правилам ГОСТ 1769-65. Образцы нагревают до температуры 950 С в условиях, исключающие обезуглероживание (например, в расплаве поваренной соли с добавкой активированного слоя угля 0,5 – 2 %). Составы ванн и режимы термической обработки приведены в ГОСТе 1763-92. После этого шлифы травят в течение 5 – 30 мин в одном из кипящих реактивов, окрашивающих карбидную сетку, также приведенных в указанном ГОСТе.

Зона полного обезуглероживания характеризуется структурой, описанной в методе М, зона частичного обезуглероживания – ферритно-перлитной структурой без окрашенной в темный цвет карбидной сетки.

Глубину зоны обезуглероживания измеряют также, как в методе М.

Метод М2 (метод Садовского)

Суть метода: глубину обезуглероженного слоя определяют по структуре под микроскопом на поперечных травленных шлифах, изготовленных на образцах, подвергнутых специальной термической обработке.

Применяется для быстрорежущей стали.

Образцы нагревают в хорошо раскисленной хлоробариевой ванне при температуре заковки. Охлаждение производят в масляной или соляной ванне (первая ванна),

затем переносят во вторую ванну и выдерживают при температуре отпуска определенное время и охлаждают на воздухе.

Зона полного обезуглероживания характеризуется структурой, указанной в методе М1, зона частичного обезуглероживания – темнотравящейся трооститной или игольчатой трооститомартенситной структурой.

Метод измерения термо - э.д.с.

Суть метода: измерение термо - э.д.с. на обезуглероженной и необезуглероженной поверхностях образца.

Применяется для инструментальных углеродистых и легированных, быстрорежущих, подшипниковых сталей.

Отбор образцов и подготовку поверхности проводят по ГОСТ 1763-92. Аппаратура собирается по схеме, указанной в этом же ГОСТе. Методика проведения измерений описана там же.

Образец считают необезуглероженным, если разница в показаниях прибора на лыске и на поверхности образца не превышает установленной по эталонам величины.

Метод измерения твердости Т

Суть метода: глубину обезуглероживания определяют путем измерения твердости на поперечном сечении образцов, подвергнутых термической обработке.

Применяется для углеродистых и легированных конструкционных сталей, инструментальных, быстрорежущих подшипниковых сталей.

Отбор образцов и подготовку их к измерениям проводят по ГОСТ 1763-92.

термическую обработку проводят по режимам, предусмотренным соответствующими стандартами или техническими условиями для сталей данной марки, в условиях, исключающих возможность дополнительного обезуглероживания (например, нагрев в соляной ванне).

Твердость измеряют по ГОСТ 9013-59. Образец считается необезуглероженным, если его твердость соответствует нормам твердости для стали данной марки, установленным в соответствующих стандартах или в технических условиях.

Метод измерения микротвердости МТ

Суть метода: глубину обезуглероженного слоя определяют измерением микротвердости по поперечному сечению закаленного образца от поверхности к центру.

Применяется для сталей с содержанием углерода не менее 0,7 %.

Отбор образцов, их вырезка и приготовление шлифов проводится, как указано в методе Т. Микротвердость измеряют на поперечных нетравленных образцах с нагрузкой не более 2 Н (200 гс) по ГОСТу 9450-76. Расстояние между отпечатками должно превышать диагональ отпечатка не менее чем в 2,5 раза. Измерения выполняют до получения стабильных результатов микротвердости, соответствующих твердости основного металла.

Химический метод

Суть метода: определяют содержание углерода в стружке с образца, снятой послойно толщиной не более 0,1 мм.

Применяется для сталей всех марок (для профилей, обеспечивающих возможность равномерного послойного снятия стружки).

Содержание углерода определяют по ГОСТам 22536.1-88, 12344-2003, 28473-90. Глубину обезуглероженного слоя оценивают по глубине расположения того слоя стружки, содержание углерода в котором соответствует марочному составу.

5.10 Метод определения коррозионных поражений металлических материалов

Метод устанавливает правила металлографического определения коррозионных поражений металлических материалов (в соответствии с ГОСТ 9.908-85).

Суть метода: метод основан на определении типа коррозии, формы коррозионных поражений, распределения коррозионных поражений в металлах, сплавах и защитных металлических покрытиях (далее – материалах) путем сравнения с соответствующими типовыми формами, а также измерения глубины коррозионного поражения на металлографическом шлифе.

Место отбора образцов из испытываемого материала выбирают на основе результатов визуального (невооруженным глазом или с помощью лупы) осмотра поверхности или неразрушающей дефектоскопии.

Образцы вырезают из следующих мест материала:

- если коррозией поражена только часть поверхности материала, образцы отбирают в трех местах: из части, пораженной коррозией; из части, не пораженной коррозией, и на участке между ними;
- если имеются участки поверхности материала с различными видами коррозии или с различной глубиной коррозионного поражения, образцы отбирают из всех участков, пораженных коррозией;
- если на поверхности материала имеется один тип коррозионного поражения, образцы отбирают не менее чем из трех характерных участков исследуемого материала.

При необходимости отбирают не менее одного образца из не менее пяти функционально необходимых участков испытываемого материала. Размер образца определяют исходя из размеров зоны коррозионного поражения.

Образцы вырезают таким образом, чтобы плоскость шлифа была перпендикулярна исследуемой поверхности. Способ изготовления не должен влиять на структуру материала и разрушать поверхностный слой и кромки образца. Для материалов с защитными покрытиями не допускаются повреждение покрытия и отрыв его от основного материала.

Маркировка образца проводится по ГОСТу 9.905-82.

При изготовлении металлографического шлифа с поверхности образца удаляют все следы вырезки, например, заусенцы.

При операциях шлифования и полирования шлифа необходимо следить за тем, чтобы не изменялись характер и размер коррозионного поражения. Кромки шлифа в месте коррозионного поражения не должны иметь закруглений. Допускаются закругления, не влияющие на точность определения коррозионного поражения. Для этого рекомендуется заливать образец в заливную массу так, чтобы исследуемая кромка находилась на расстоянии не менее 10 мм от края шлифа. Полировку проводят кратковременно алмазными пастами. Оценивают шлиф до и после травления. Травление позволяет установить различие между коррозионным поражением и структурой материала. При травлении не должны быть изменены характер и размеры коррозионного поражения.

При определении и оценке типа коррозии, формы коррозионного поражения и его распределения в материале необходимо учитывать химический состав испытываемого материала, способ его обработки, а также все коррозионные факторы.

Испытания проводят на металлографическом шлифе под микроскопом при увеличениях 50, 100, 500 и 1000 крат.

На одном образце допускается определять несколько типов коррозии. Глубину коррозионного поражения оценивают на шлифе с помощью окулярной шкалы и микрометрического винта микроскопа по разности толщин металла прокорродировавшего участка поверхности шлифа и участка поверхности без коррозии или измерением глубины поражения от поверхности, неразрушенной или незначительно разрушенной коррозией.

При испытании материала с защитным покрытием глубину коррозионного поражения покрытия и основного металла измеряют отдельно.

В ГОСТе 9.908-85 приведены шкалы, где указаны типы коррозии, характеристика форм коррозионных поражений, схемы типичного вида коррозионных поражений.

Для разных видов коррозии отличительными чертами являются:

- для сплошной равномерной коррозии – равномерная глубина слоя коррозионного поражения и постоянная скорость протекания коррозии (рис. 5.1а);
- для коррозии пятнами – мелкие коррозионные поражения неправильной формы, глубина которых невелика (рис. 5.1б);
- для коррозионной язвы – отдельные коррозионные поражения, глубина которых приблизительно равна их ширине (рис 5.1в);
- для питтинговой коррозии – коррозионное поражение, глубина которого значительно превышает его диаметр (рис 5.1г);
- для межкристаллитной коррозии – проникновение коррозионного поражения вглубь металла вдоль границ зерен (рис 5.1 д);
- для транскристаллитной коррозии – возникновение большого количества транскристаллитных трещин (рис 5.1 е).

5.11 Метод определения газовой пористости в литейных алюминиевых сплавах

Метод устанавливает правила определения газовой пористости в алюминиевых литейных сплавах металлографическим способом (в соответствии с ГОСТом 1583-73).

Распространяется на все марки алюминиевых литейных сплавов.

Суть метода: микрошлиф, изготовленный из чушек, протравливают и сравнивают со шкалой пористости, приведенной в этом ГОСТе.

Степень газовой пористости шлифов в баллах устанавливают путем сравнения их со шкалой, состоящей из пяти эталонов. В ГОСТе приведена шкала пористости литейных алюминиевых сплавов.

Приведены таблицы, где указаны порядок приготовления шлифов, реактивы и режимы травления, а также их применение для различных составов сплавов.

Показана таблица допускаемого количества пор на 1 см² поверхности шлифа и их диаметр в зависимости от номера эталона.

5.12 Метод определения эрозии паяемого материала

Метод устанавливает правила определения эрозии при пайке и лужении по глубине металлографическим способом (в соответствии с ГОСТом 21549-76).

Контроль глубины эрозии проводят при выборе припоя и материала изделия, разработке технологического процесса пайки и лужения и измерении их параметров.

Суть методов: глубину химической эрозии определяют на шлифах, поверхность которых подвергают травлению для выявления структуры и исследуют под микроскопом при увеличениях 50 – 500 крат.

Шлифы для определения эрозии при пайке и лужении изготавливают из паянных внахлестку или луженых образцов. Приведены формы и размеры образцов, описаны подготовка и порядок проведения испытаний.

5.13 Метод выявления и определения толщины прослойки химических соединений в паяных соединениях

Метод устанавливает правила, выявляет и определяет толщину прослойки химического соединения на границе паяемый металл – паяемый шов или паяемый металл – луженый слой металлографическими способами (в соответствии с ГОСТ 21548-76).

Суть метода: изготавливают шлифы, плоскость которых перпендикулярна к паянным или луженым поверхностям образца и химическим, электрохимическим или другими способами выявляют структуру паяного соединения. Толщину прослойки измеряют под микроскопом.

Шлифы для выявления и определения толщины химического соединения изготавливают из паянных внахлестку или луженых образцов. Форма и размеры образцов, паяемых внахлестку, должны соответствовать указанным в ГОСТе 21548-76 (рис. 5.2).

Для воспроизведения условий лужения или пайки погружением используют образцы, форма и размеры которых должны соответствовать указанным в ГОСТе 21548-76 (рис. 5.3)

В ГОСТе описана подготовка к испытанию образцов внахлестку и образцов из полосы, трубы и проволоки. Приведены рекомендации по пайке и лужению образцов.

Описаны правила проведения испытаний: из образцов изготавливают шлифы, на которых химическим, электрохимическим или другим методом выявляют структуру паяного соединения. Толщину прослойки измеряют под микроскопом при увеличениях 300 – 1000 крат.

ГЛАВА 6

ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из объективных и информативных способов оценки качества металла является фрактография, т.е. фиксация и изучение поверхности разрушения (излома). Исследование изломов позволяет не только выявлять локальные внутренние дефекты в металле, но и оценивать дефектность всего объема металла и отбраковывать некондиционный металл, выявляя отклонения его качества от нормы на различных этапах технологических процессов или при преждевременном разрушении деталей в процессе эксплуатации (примеры технологических задач, решаемых методами фрактографии, с применением дополнительных современных методов исследований приведены в Приложении 2). Поэтому метод оценки качества металла по излому с учетом новейшего аппаратно-технического оснащения в настоящее время широко применяют в производственных условиях.

Процесс разрушения определяет поведение конструкционных материалов при достаточных по величине напряжениях и времени их действия. Полное разрушение деталей или конструкций это хрупкое или пластическое разрушение при кратковременном, длительном статическом или усталостном нагружении.

Описание изломов проводится по различным признакам (см. схему рис. 6.1)

В строении изломов отражаются все стадии процесса разрушения, поэтому анализ строения изломов единственный метод, с помощью которого можно получить сведения о протекании процесса разрушения и факторов, в том числе, структурных, ускоряющих или замедляющих этот процесс.

6.1. Методы исследования изломов

6.1.1 Очистка поверхности изломов и их консервация

Поверхность изломов требует обязательной очистки перед проведением исследований в следующих случаях:

- при наличии масла, пыли, а также защитных покрытий, нанесенных для защиты изломов от повреждений;
- при наличии продуктов коррозии, образовавшихся при длительном хранении;
- при окислении изломов (например, после испытаний при низких температурах);
- при подготовке к электронно-микроскопическим исследованиям.

Консервация изломов необходима, если изломы подлежат длительному хранению или подвергаются транспортировке. Рекомендуемые способы очистки и консервации приведены в табл.6.1 .

Таблица 6.1 Рекомендуемые способы очистки и консервации изломов.

Способ консервации или очистки	Назначение	Порядок проведения операций
Очистка		
Осушка	Удаление постороннего материала, а также влаги с поверхности изломов	Обдувка струей сжатого воздуха
Промывка	Удаление масла, загрязнений, консервирующих покрытий	Многократное погружение в растворитель* ¹ с протирающим волосяной щеткой. Последующая промывка в бензине и спирте (этиловом)

Способ консервации или очистки	Назначение	Порядок проведения операций
Сухая очистка	Удаление с поверхности изломов неплотно сцепленных с ними материалов	Производится мягкой кистью. Не допускается применение щеток во избежание повреждения поверхности изломов
Очистка с помощью ультразвука	При затруднениях с удалением загрязнений	Очистка производится в растворах* ² в моечных ультразвуковых ваннах. Продолжительность очистки подбирают экспериментально в зависимости от степени загрязнения излома.
Промывка в растворителях (для анализа макростроения излома)	Удаление окисленного слоя	Поочередное погружение излома в растворитель и ингибитор* ³
		Промежуточный контроль состояния рельефа производится визуально или в оптическом микроскопе с увеличением до 120 крат
	Удаление ржавчины	Многочасовое погружение в раствор аммониевых солей лимонной и щавелевой кислот
	Удаление пластиковых консервирующих покрытий (реплик)	Погружение на 1 - 15 мин в 20 % - ный раствор соляной кислоты в воде Погружение излома в метилацетат, ацетон или смесь диметилкетона, толуола и трихлорэтилена* ⁴
Консервация		
Герметизация	Длительное хранение изломов (в основном, образцов малых размеров).	Излом помещают в контейнер с осушителем (силикагелем)
Помещение в защитную среду	Предотвращение отпотевания образцов (в основном, малых размеров) после испытаний при пониженных температурах	Немедленное погружение в спирт (C ₂ H ₅ OH) после испытаний до достижения образцами комнатной температуры с последующей тщательной сушкой
Нанесение жидких покрытий	Консервация изломов больших размеров	Нанесение тавота на поверхность излома
	То же, малых размеров	Погружение излома в вакуумное масло или обезвоженное трансформаторное масло
Нанесение твердых покрытий	Консервация изломов больших размеров	Нанесение на поверхность лака на основе нитрата целлюлозы, акриловых лаков* ⁵
	То же, малых размеров	1. Нанесение на поверхность излома пластиковых реплик из ацетата целлюлозы 2. Напыление металла или погружение излома в жидкий металл, используемый для покрытия
*¹ Способ применяется также для очистки. *² Растворители: 1. Бутилацетат 30 %; ацетон 30 %; ортоксилон 40 %. 2. Бутилацетат 12 %; ацетон 26 %; толуол 62 %. *³ 0,2 % - ный водный раствор четыреххлористого углерода CCl₄ или гексаметиленetetрамина с 20 % - ной HCL. *⁴ Растворители: 1. 20 % - ный раствор HCl в этиловом спирте. 2. Раствор 150 г AgNO₃ и 3 г Na₂CO₃ в 1 л дистиллированной воды. 3. 20 % - ный раствор серной кислоты в воде. Ингибитор ЧМ (ТУ МНП 521-54) может применяться с любым реактивом. *⁵ Ограничение: трудность полного удаления, что мешает при проведении электронно-микроскопических исследований.		

6.1.2 Фотографирование изломов.

Фотографирование изломов производят в следующих случаях:

- если излом при дальнейших исследованиях разрезают на части;
- если существует вероятность повреждения излома при исследовании, длительном хранении и т.д.
- если затруднена транспортировка крупногабаритных изломов, подлежащих дальнейшему исследованию;
- если имеется необходимость изображений изломов в заключениях, отчетах и других материалах.

При фотографировании изломов предварительно определяют вид изображения (плоское, объемное), требуемое увеличение и размеры фотоизображения.

Плоское изображение

Фотоснимок должен быть максимально четким, хорошо передавать объем, форму и детали рельефа объекта. Объект фотосъемки должен быть хорошо подготовлен, должно быть правильно установлено освещение, обеспечена необходимая глубина резкости и точность экспозиции.

Для создания необходимого фона фотографируемого объекта применяют белую или черную бумагу, картон или ткань, которые помещают за объектом. Для выявления таких дефектов в изломе, как кристалличность, светлые пятна и т. д., лучше применять черный фон. Общий вид излома, особенно волокнистое состояние, лучше фотографировать на белом фоне, чтобы избежать повышенной контрастности изображения.

Наиболее достоверную передачу формы поверхности разрушения обеспечивает естественное рассеянное дневное освещение излома. Поверхность разрушения при этом освещается одинаково равномерно, на ней отсутствуют тени и блики. Фотовспышку при съемке изломов не применяют, так как это приводит к значительной контрастности фотоизображений, что затрудняет их расшифровку. В качестве искусственных источников света при съемке изломов рекомендуется использовать матовые фотолампы мощностью 220, 300 и 500 Вт в софитах типа ОФ-1 и ФО-1, выпускаемых серийно отечественной промышленностью.

В цеховых условиях для фотосъемки используют переносные источники света. Интенсивность источников обеспечивает фотосъемку при достаточно коротком времени экспозиции (выдержки) во избежание искажений фотоизображений из-за промышленных вибраций. В лабораторных условиях используют стационарные освещения. Важное значение имеет ориентация поверхности разрушения к источнику света. Освещение излома при съемке без увеличения должно производиться из верхней полусферы, так как в противном случае изображение будет ошибочным и выступы на поверхности разрушения будут восприниматься как впадины и наоборот.

Для устранения резких теней, которые часто возникают при съемке изломов с сильно развитой шероховатой поверхностью, рекомендуется применять два источника света, которые располагают следующим образом: первый, дающий освещение под углом порядка 45° к вертикали, с одной стороны фотоаппарата, второй, дающий освещение под углом 90° к вертикали, - с другой стороны на уровне объектива. Пучок света должен падать на поверхность излома под углом 80 - 85° во избежание образования глубоких теней. Учитывая, что освещенность излома значительно влияет на получаемое фотоизображение, необходимо съемку однотипных изломов, подлежащих сравнению, производить в строго определенных условиях освещения.

Время экспозиции при фотосъемке устанавливается с помощью экспонометра. При этом экспонируется поверхность разрушения, но не фон, так как в противном случае может наблюдаться недодержка и уменьшение контрастности фотоснимка. При фотографировании на плоскую форматную фотопленку или фотопластинку выдержку удобно подбирать методом

экспозиционных проб с помощью мультипликатора или кассеты, на крышке которой нанесена специальная градуировочная шкала. Наиболее целесообразна выдержка от 2 до 6 с.

Для макросъемки применяют объективы анастигматы средней светосилы с небольшим фокусным расстоянием, позволяющие получать резкое изображение по всему полю при небольших выдержках.

Для фотосъемки с увеличением до 20 крат используются стационарные установки марок ФМН-2, ФМН-4, а до 40 крат - бинокулярные лупы типа МБС-200 с фотонасадками. В лабораторных условиях изломы обычно снимают в так называемых софитных столах (специальные ящики с вмонтированными в боковые стенки лампами, дающими равномерное освещение). Там объект освещают несколькими источниками света с различным направлением светового потока.

Общий заполняющий свет обеспечивает проработку деталей объекта в теневых участках. Основной направленный свет дает разницу освещенностей объекта и помогает выявить объем, форму и строение поверхности объекта. Выравнивающий свет подсвечивает теневую сторону объекта. Эффектный (моделирующий) свет создает блики и тени. Контрольный свет помогает выделять контур объекта и отделять его от фона.

Съемку отдельных участков излома с увеличением до 100 крат проводят на металлографических микроскопах, имеющих гониометрические столики. Для лучшей фокусировки объекта на матовом стекле любой фотоаппаратуры желательно использовать лупу. В общем случае рекомендуется фокусировать аппарат на 1/2 глубины рельефа излома. При необходимости производят фокусировку на деталях излома, наиболее интересующих исследователя.

При изучении изломов с большим увеличением рекомендуется проводить последовательное фотографирование панорамы поверхности разрушения, получая нужное число резких (качественных) фотоснимков (так называемый метод выравнивания поверхности). Полученные фотоснимки затем монтируют и получают изображение всей поверхности разрушения. Если сохранность излома не обязательна, то можно применять фотосъемку методом выравнивания поверхности, осуществляя постадийное стачивание выступающих частей.

Негативные фотоматериалы

Технологические изломы лучше всего снимать на форматную техническую фотопленку или фотопластинки в натуральный размер для последующей контактной печати, так как увеличение при фотопечати снижает качество (четкость) изображения. При фотографировании общего вида изломов используемая черно - белая пленка должна быть умеренно светочувствительной, мелкозернистой с высокой разрешающей способностью и обеспечивать широкий диапазон экспозиций.

Стереофотографическое изображение

Стереофотографическое изображение поверхности разрушения позволяет представить излом трехмерным, объемным. Суть этого способа заключается в том, что получают два изображения изучаемого объекта под углом одно к другому 10 - 14°, который затем рассматривают одновременно.

Стереоизображения можно получать обычным фотоаппаратом с одним объективом, если он снабжен опорой, шарнирно поворачивающейся по отношению к объекту съемки вокруг вертикальной оси. Удобнее пользоваться фотоаппаратами с двумя объективами, обеспечивающими необходимую фиксированную разницу в углах обзора.

Стереоизображения участков поверхностей разрушения можно получать с помощью светового микроскопа, но в практике этот метод используется редко из-за ограниченной глубины резкости.

Цифровая видеозапись

Основным отличием цифровой фотографии от обычной является то, что запись изображения происходит не на фото - пленку или фотопластинку, а через сенсорную матрицу. Это позволяет

получать готовое изображение сразу на экране без этапов промежуточных фотопроцессов (проявка, печать) и оценивать качество полученного изображения.

Кроме того изображение сразу (без сканирования) может быть выведено на компьютер для последующего металловедческого анализа и хранения без потери качества изображения во времени.

Объемное (голографическое) изображение.

Плоская фотография, фиксирующая выбранную проекцию объекта, дает неполную информацию и недостаточно объективна, что особенно важно при экспертной оценке качества металла по виду изломов. Из-за недостатка информации требуется длительное хранение натуральных изломов в службах ОТК заводов, для чего приходится выделять специальные производственные помещения и изымать из производства значительное количество металла. Кроме того, при длительном хранении поверхность металла окисляется, изменяется ее достоверность, поэтому при длительном хранении необходимы консервация и реконсервация изломов. Преимущества объемной (голографической) съемки изломов в сравнении с плоским их изображением иллюстрируются на рис. 6.2, 6.3. Видно, что плоское изображение передает только один из ракурсов, существенно отличающийся от других. Голографическое изображение рассматривает реальное изображение во всем его многообразии.

Голографическим методом возможно записывать на плоском регистраторе, а затем восстанавливать объемное (трехмерное) изображение, обладающее всеми визуальными свойствами реального объекта. При этом между различными предметами сохраняется реальное пространственное удаление, а наблюдаемые ракурсы меняются в зависимости от угла зрения наблюдателя, т.е. объект можно «оглядывать».

В связи с этим в последнее время получают развитие голографическая и линзо -растровая съемки.

Их преимущества перед плоской фотографией следующие:

- запись объемного изображения объектов в реальных условиях с сохранением пространственного масштаба изображения;
- высокая объективность и информативность;
- возможность бессрочного хранения большого количества объемной информации крупногабаритных объектов в компактном виде;
- возможность исследования голографического изображения поверхности разрушения при увеличениях, ограничиваемых разрешающей способностью применяемых фоторегистрирующих материалов (до 5 -10 раз);
- возможность замены трудоемких количественных стереоскопических методов исследования рельефа поверхности изломов методами голографической топографии, которая является простым высокочувствительным методом измерения шероховатости поверхности разрушения;
 - получение трехмерных изображений, восстанавливающихся в белом(полихроматическом) свете.

Наиболее быстрым, простым и максимально удобным является метод голографической съемки «во встречных пучках». При этом методе для получения голограмм используют монохроматический когерентный свет, а рассматривают записанное на голограмму изображение при освещении ее источником белого (полихроматического) света.

При съемке этим методом форма объекта может быть произвольной, но масштаб записи и восстановления изображения равен 1:1, поэтому размеры образцов ограничиваются размерами фотопластины или фотопленки. Продолжительность экспозиции при съемке - от нескольких секунд до нескольких минут. Технология химико-фотографической обработки голографических пластин практически не отличается от принятой для обычных фотоматериалов.

Основным условием получения качественных голограмм является неподвижность объекта съемки (амплитуда вибраций не должна превышать 0,05 мкм). Для обеспечения этого условия съемку необходимо производить на виброзащитном стенде с большой массой (несколько тонн) и имеющем устройство гашения колебаний на основе пневмоподвески.

Источником монохроматического когерентного света служит серийно выпускаемый гелий-неоновый лазер типа ЛГ-38 непрерывного действия; длина волны 0,6328 мкм, мощность 50 мВт. Из зарубежных лазеров для рассматриваемых целей можно рекомендовать лазеры фирмы «Spectra Physics». Для съемки голограмм необходимы также: набор расширителей пучка лазера, зеркала в подвижных рамках и кадрирующая рамка для крепления фотопластины. В качестве расширителя пучка может быть применен любой микрообъектив увеличением 10, 20, 40 и 60 крат.

С точки зрения виброзащиты наиболее целесообразно горизонтальное расположение кадрирующей рамки с фотопластиной на стенде. При этом объект (излом, деталь) может находиться снизу или сверху фотопластины. В первом случае его устанавливают на поверхность стенда, а над ним укрепляют кадрирующую рамку с фотопластиной, во втором случае помещают непосредственно на фотопластину, закрепленную в кадрирующую рамку. При съемке предварительно расширенный микрообъективом и направленный с помощью зеркал пучок света лазера должен полностью и равномерно освещать записываемый на голограмму объект.

В качестве регистрирующего материала используют высокоразрешающие (не менее 3000 лин/мм) фотопластины с прозрачной эмульсией.

Записанные на голограмму изображения воспроизводятся при освещении любым источником направленного белого полихроматического света.

Линзо - растровая съемка

Метод линзо - растровой съемки позволяет получать объемное трехмерное изображение объекта при освещении его обычным полихроматическим светом. При этом можно фиксировать трехмерное изображение объектов любых размеров.

Методика получения линзо - растровых фотографий незначительно отличается от методики получения обычной позитивной фотографии; последующая запись трехмерных изображений на голограммы также практически не отличается от записи по схеме «во встречных пучках». Преимуществом линзо - растровой съемки является простота и быстрота процесса фотографирования, а также возможность фотографирования объекта любого размера в любых производственных условиях без специальных требований к помещению. Особенно удобен этот метод для фиксации фрагментов крупногабаритных объектов при натурной съемке с естественным освещением.

Фотоматериалами служат фотопластины, имеющие высокую (не менее 800 лин/мм) разрешающую способность.

Химико - фотографическую обработку фотослоя (фотопластины) после экспозиции проводят обычно в реактивах, рекомендуемых для данного типа фотопластин. В основном это стандартные реактивы для позитивного фото процесса.

После экспозиции и химико - фотографической обработки линзо - растровый снимок (позитив) просматривают в проходящем белом свете с помощью того же раstra, который был использован при съемке, причем фотослой устанавливают в схему на то же самое место, что и при съемке.

В настоящее время камеры для линзо - растровой съемки серийно не выпускаются. Камера отличается простотой конструкции и может быть изготовлена на неспециализированных предприятиях.

Растрово - голографический метод получения объемных изображений

Комбинированный метод объемной съемки сочетает следующие преимущества голографической и линзо - растровой съемки:

- возможность устранения дискретной растровой структуры (получение слитного объемного изображения);
- возможность тиражирования снимков;
- возможность рассматривания снимков без наличия растров в белом (некогерентном) свете.

Метод состоит из трех операций:

- получения линзо - растрового позитивного объемного изображения, снятого в естественном свете;
- получения растрово - голографических изображений;
- наблюдения изображений с линзо - растрового снимка, записанных на голограммы.

6.1.3 Оптические методы исследования строения изломов

Исследование макроскопического строения изломов.

Цель исследования макростроения изломов – установление характера излома, определение влияния на него металлургических и технологических факторов, выявление макродефектов.

При макроскопическом исследовании изломов устанавливают также участки поверхности разрушения, которые необходимо исследовать методами микроанализа. Такое исследование проводят невооруженным глазом или с помощью лупы и бинокулярных микроскопов при небольших увеличениях (в практике до 40 крат).

При качественном анализе макростроения изломов устанавливают:

- вид и характер разрушения металлов по признакам, характеризующим качество металла;
- структурные элементы поверхности разрушения, отличающиеся от оптимального строения излома обусловленные отклонениями от оптимальной технологии изготовления металла (литья, деформации, термической обработки);
- дефекты структуры, приводящие к снижению свойств (неметаллические включения и др.);
- макронесплошности, находящиеся в металле (флокены, поры, расслоения и др.);
- макронесплошности, образующиеся при поломке на поверхности разрушения (шиферность, расслой и др.);
- величину дендритов, ликвационных неоднородностей.

С помощью количественного анализа устанавливают количество, размеры и распределение элементов строения поверхности разрушения, отличающиеся от оптимальных и определяют степень их отрицательного влияния на свойства металла.

Метод визуальной оценки качества металла по изломам

Исследуемый излом или его изображение визуально сравнивают с эталонными шкалами, специальными атласами – классификаторами, картами или схемами дефектов, представляющими набор характерных изображений изломов, подобранных по заданной в НТД градации.

В табл. 6.2 В качестве примера приведены шкалы оценки качества конструкционных среднеуглеродистых сталей по изломам технологических проб.

Таблица 6.2 Шкалы оценки качества металла в прокате

Оценка в баллах	Характеристика вида излома
Волокнистый излом	
1	Полностью волокнистый или волокнистый по всей площади с кристаллической сыпью
2	Волокнистый с резко очерченными участками кристаллического строения (общей площадью до 30 %)
3	Волокнистый с резко очерченными участками кристаллического строения (общей площадью более 30 %)
Шиферность в изломе	
1	Плотный излом без признаков шиферности

Оценка в баллах	Характеристика вида излома
2	Нераскрывшаяся шиферность на площади менее 50 % площади излома
3	Нераскрывшаяся шиферность на всей площади излома или раскрывшаяся шиферность на площади до 50 % площади излома
4	Раскрывшаяся шиферность на площади более 50 % площади излома

6.1.4 Изучение микроскопического строения изломов

Исследование методами световой микроскопии

Цели исследования - определение тех элементов строения поверхности разрушения, которые не разрешаются при небольших увеличениях, а также определение участков поверхности разрушения, которые необходимо исследовать при значительно больших увеличениях.

Важную роль играет микроскопическое исследование изломов для идентификации хрупкого и квазихрупкого разрушения, так как при практически одинаковом характере макроразрушения, квазихрупкое разрушение характеризуется наличием микропластической деформации поверхности разрушения.

При исследовании предварительно просматривают изломы при минимально возможном увеличении и выявляют элементы микрорельефа, требующие изучения при больших увеличениях: фасетки, выделения по границам зерен, различные включения и микронесплошности.

Для исследования поверхности изломов используются металлографические микроскопы, позволяющие получать увеличение от 40 - 50 до 900 - 1000 крат. Для удобства изучения изломов применяют гониометр, находящийся в металломикроскопах.

Микроскопическое строение отдельных участков излома изучают с использованием прямого, косого и темнопольного освещения. При исследовании изломов в прямом свете рекомендуется так выбирать положение поверхности элементов рельефа, чтобы чередование света и тени создавало объемную картину. Применение косого освещения позволяет увеличить контрастность изображения в связи с образованием теней от рельефа поверхности излома. При темнопольном освещении возможно высвечивать отдельные плоские участки изломов (фасетки), что важно при определении их размеров. Однако необходимо учитывать, что освещенность отдельных участков поверхности разрушения в этом случае будет неравномерной.

Металлографические микроскопы не позволяют получать резкое изображение излома по всему полю зрения, и чем больше увеличение, тем меньше область резкого изображения. Поскольку большинство изломов имеют сложную шероховатую поверхность, применяют метод выравнивания поверхности: вначале исследуют выступающие части, затем их стачивают и так проводят послойное исследование всего излома.

Существенный недостаток этого метода - разрушение излома, поэтому для более детального изучения строения излома применяются методы электронной микроскопии. Наиболее широко для исследования изломов применяют растровую электронную микроскопию (РЭМ). С помощью РЭМ исследуют как непосредственно изломы, так и толстые двухслойные пластиковые реплики с них.

Изучение изломов с помощью просвечивающей (ПЭМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ)

При фрактографических исследованиях широко применяют метод одноступенчатых прямых угольных реплик и метод двухступенчатых пластиково - угольных реплик.

Преимущество прямых одноступенчатых угольных реплик - высокая точность воспроизведения исследуемого излома, недостаток - повреждение поверхности излома при приготовлении реплик (повторное исследование излома невозможно вследствие растравливания поверхности разрушения).

Преимущество двухступенчатых пластиково - угольных реплик - возможность многократного исследования одного и того же участка излома, а также отдельных участков крупногабаритных изломов без их разрезки и повреждения. Недостаток метода - возможные искажения истинной картины строения излома, обусловленные техникой изготовления реплик.

Существует два способа изучения поверхности разрушения с помощью одноступенчатых реплик:

косвенный - с помощью реплик, копирующих рельеф поверхности разрушения;

полупрямой - с помощью так называемых экстракционных реплик, с извлеченными с поверхности разрушения частицами.

С помощью одноступенчатых реплик обычно изучают тонкое строение микрорельефа поверхности разрушения, а также проводят идентификацию таких дисперсных фаз, как карбиды, неметаллические включения и т. д., определяя их размеры, форму и распределение по поверхности (косвенный или экстракционный способ). Последний способ особенно эффективен при малой объемной доле этих фаз.

Наиболее широко для исследования изломов применяются методы растровой электронной микроскопии (РЭМ). С помощью РЭМ исследуют непосредственно изломы и толстые двухслойные пластиковые реплики с изломов. Для изготовления толстых пластиковых реплик вместо угля напыляют сплошное электропроводящее покрытие из платины или смеси угля с платиной толщиной около 10 нм.

Методические особенности интерпретации фрактограмм, полученных с помощью ПЭМ и РЭМ.

При исследовании характера разрушения на ПЭМ в большинстве случаев требуется исследование нескольких реплик, так как изучаются реплики, полученные с ограниченных участков поверхности разрушения. На РЭМ же можно четко установить, какой участок поверхности разрушения исследован.

Разрушение металла при однократном нагружении путем изгиба с перерезывающей силой оказывает влияние на направление максимальных касательных напряжений, а также на траекторию распространения трещины и, следовательно, на процессы пластической деформации в зоне разрушения и геометрию элементов микрорельефа излома, поэтому ямки приобретают удлиненную форму, что необходимо учитывать при оценке их размеров (ямочного рельефа); при других схемах приложения нагрузки ямки могут иметь круглую или овальную форму.

При исследовании на ПЭМ и РЭМ изломов, поверхность которых имеет развитый микрорельеф, на участках гребней возможен разрыв угольной реплики. Такое же явление может наблюдаться и на острых участках ступенек, глубоких впадинах и др. Относительную высоту или глубину деталей микрорельефа можно оценить по величине тени, возникающей при оттенении реплик. Для установления взаимодействия трещин, образующих излом, с элементами структуры, рекомендуется напылять реплики в направлении от зоны зарождения трещины к зоне долома.

При исследовании на ПЭМ и РЭМ характера разрушения металлов, особенно при больших увеличениях, необходимо проводить идентификацию механизма разрушения по числу полей зрения, представительному для оценки данной поверхности разрушения, так как элементы микрорельефа поверхности разрушения на соседних участках могут существенно различаться.

Важное значение может иметь сопоставление фрактограмм РЭМ и ПЭМ, полученных с участков поверхности разрушения, имеющих близкое строение. ПЭМ, обладающий большей разрешающей способностью, чем РЭМ, позволяет выявить более мелкие детали микрорельефа, а РЭМ - исследовать большую площадь поверхности разрушения и при этом рассматривать отдельные участки последовательно от малых до больших увеличений. Это особенно необходимо при наличии на поверхности разрушения дисперсных выделений.

6.1.5 Специальные оптические методы исследования строения изломов

Стереоскопические методы

Стереоскопические методы исследования изломов (СМИ) позволяют изучать трехмерный рельеф поверхности разрушения по его фотографическим изображениям. Для этого изготавливают два фотографических изображения изучаемых участков поверхности разрушения, причем второе из фотоизображений делают под углом съемки, немного отличающимся от угла съемки первого изображения. Полученные фотоизображения помещают в стереоскоп, с помощью которого можно наблюдать мнимое объемное изображение объекта. Наиболее высококачественное изображение получается при углах съемки между двумя изображениями 10 - 12° и увеличении до 500 крат и 5 - 7° при увеличении более 500 крат.

Применение СМИ для изучения изломов позволяет определить истинное взаимное расположение элементов излома, уменьшает вероятность случайной и уровень систематической ошибки в оценке деталей рельефа поверхности образца.

Возможности применения в практике стереоскопического метода исследования оптических фотографий поверхностей разрушения ограничиваются малой глубиной резкости оптических приборов и обычно используются при увеличениях, не превышающих 150-200 крат.

Стереоскопическое исследование поверхности разрушения с помощью оптических приборов часто является предварительным. Окончательное исследование проводят с помощью электронных микроскопов, которые обладают большой глубиной резкости. Стереомикроскопия наиболее эффективна при изучении таких элементов строения изломов, как поры в вязких изломах и фасетки скола в хрупких. При стереоисследовании изломов с помощью методов электронной микроскопии изучают фотографии, снятые с объекта исследования (реплики в ПЭМ и изломы в РЭМ), устанавливаемого с наклоном в обе стороны $\sim 5^\circ$ по отношению к оси, перпендикулярной электронному пучку. Фотоснимки помещают в стереоскоп и исследуют трехмерную картину излома. Съемка образцов с наклоном усиливает теневые эффекты и позволяет полнее реализовать преимущества большой глубины резкости, присущие методам электронной микроскопии. Наблюдаемая картина в первую очередь зависит от угла напыления реплики и толщины напыленного слоя, при этом результаты измерения топографии излома могут отличаться на 200 %.

Этот метод позволяет определять кристаллографические индексы отдельных элементов структуры излома, например, фасеток хрупкого разрушения по углу наклона поверхности.

РЭМ, обеспечивая большую глубину резкости, фиксирует объемные изображения изломов. С помощью СМИ можно увеличить эффект объемности этих изображений. Стереопары фотоизображений позволяют измерять высоту и глубину элементов излома, повышают точность измерения площади, занятой определенными структурными элементами.

Указанные выше параметры могут быть получены и путем фотограмметрической обработки электронномикроскопических снимков, которая позволяет устранять искажения, вносимые проективной стереографией и обусловленные непараллельностью электронного пучка микроскопов. Дополнение растровой электронной стереомикроскопии фотограмметрической обработкой изображений позволяет с высокой степенью надежности и однозначности интерпретировать результаты исследований. Трудоемкость этого способа значительно уменьшается при использовании ЭВМ.

Стереологический метод

Стереологический метод используется для изучения пространственной структуры и реконструкции этой структуры с помощью измерений, проводимых на плоскости наблюдения. Стереологическими исследованиями определяют такие важнейшие фрактографические характеристики, как реальная доля вида разрушения (внутризеренного или межзеренного) в случае изучения изломов смешанного вида, распределение размеров и средний поперечный размер частиц включений на поверхности разрушения, удельная поверхность элементов строения излома (например, для фасеток хрупкого разрушения и др.).

В качестве объекта исследования используют непосредственно излом или обычные и экстракционные реплики с него.

Исследованиям должны соответствовать следующие требования:

- 1) образцы должны хорошо воспроизводить характерные особенности структуры излома изучаемого материала;
- 2) искажение изображения объекта при измерении его параметров с помощью оптической и электронной микроскопии должно быть минимальным;
- 3) число измерений элементов структуры должно быть достаточным для получения достоверного результата.

Элементы геометрической структуры изломов - это видимые на поверхности разрушения границы зерен или плоскости их скола, ребра границ зерен, частицы включений, поры и микронесплошности и т. д.

Различают непосредственную стереологическую реконструкцию и статистическую реконструкцию. Непосредственную реконструкцию можно осуществлять двумя способами:

- последовательных сечений с минимальным шагом, получаемых с помощью механического стачивания поверхности излома;
- измерением стереопар изображений изломов, полученных при оптических и электронно - микроскопических увеличениях.

При способе последовательных сечений в каждом сечении определяют характеристики профилей следов излома: индексы шероховатости, угловые и высотные распределения элементов поверхности. Недостаток этого способа - необходимость получения строго параллельных срезов поверхности излома, иначе в стереологическую реконструкцию могут быть внесены большие искажения.

При измерении стереопар изображений одного и того же участка структуры при различных углах наклона объекта по отношению к оптической оси измеряют разность координат идентичных точек на двух изображениях и на ее основе рассчитывают соответствующие высоты.

Способ последовательных сечений менее трудоемок при анализе изломов, чем расчет стереопар.

Статистическая реконструкция - преобразование первичных измерений в характеристики геометрической структуры с помощью оператора геометрической вероятности.

Метод оптико - структурного машинного анализа (ОСМА)

Применение метода оптико - структурного машинного анализа ОСМА в металлографии и фрактографии целесообразно в тех случаях, когда на прямом изображении трудно указать и очертить для измерений подсчитываемые элементы строения. Если снимок содержит много однородных, даже нечетких элементов, то его двумерный спектр позволяет определить обобщенные характеристики преобладающего элемента, которые зависят от его характерных особенностей, а также степень анизотропии излома и направление магистральной трещины.

Суть способа заключается в том, что при дифракции когерентного пучка света на плоском изображении в фокальной плоскости дифрактометра образуется дифракционная картина - его двумерный спектр. Каждой конфигурации повторяющихся структурных элементов излома соответствует определенная дифракционная картина. В основу метода ОСМА положен анализ сигнала, полученного на выходе датчика оптической плотности при сканировании исследуемого объекта считывающим зондом. Полученный сигнал рассматривается как характеристика стационарного случайного процесса, который можно выразить посредством числовых характеристик. При этом информация об объекте (или изображении) в результате машинной обработки цифровой матрицы может быть представлена некоторыми отличительными признаками, в частности, гистограммой амплитуд оптической плотности почернения (для негативов изображения), первыми четырьмя центральными моментами (математическое ожидание m_x , дисперсия σ_x^2 , асимметрия s_x и эксцесс E_x), а также авто- или взаимно-корреляционной функцией и т. д. Кроме того, методика обработки цифровой матрицы в управляющей числовой машине (УВМ) предусматривает выделение контурных линий

изображения (или объектов), а также определение статистических характеристик изображения и геометрических параметров его элементов, рассчитанных на координаты контурных линий элементов.

Метод ОСМА для исследования изломов можно применять в двух вариантах: сканирующем и дифракционном. Для практической реализации этого метода разработана специализированная аппаратура типа «Протва» (ее разновидности: «Протва-С», позволяющая получать информацию для световой сканирующей микроскопии, «Протва-Ф» - автоматический микрофотометр, «Протва-К» - многоцелевой статистический анализатор; «Протва-Л» - лазерный дифрактометр и т. д.).

Имеется принципиальная возможность получать информацию о топографии поверхности разрушения в растровом электронном микроскопе не по фотографиям, а непосредственно по электронному сигналу, вызванному эмитированными с поверхности объекта вторичными электронами. При этом следует применять не метод «среднего тока», используемый для формирования изображений, а метод счета импульсов вышедших электронов. Контраст изображения в РЭМ или величина сигнала от объекта зависит от угла наклона исследуемой поверхности к первичному пучку электронов (α). В режиме вторичных электронов угол α находится в линейной зависимости от коэффициента вторичной эмиссии электронов.

В случае известного распределения коэффициента вторичной эмиссии по исследуемому образцу можно найти распределение углов наклона микроповерхностей образца, а также определять общую длину микроповерхности вдоль строчки электронного раstra на исследуемом объекте и, следовательно, определять коэффициент шероховатости излома.

Наряду с преимуществами, а именно: получением прямой информации с излома, минуя формирование изображения и фотопроектс, связанный с его обработкой, а также получением сведений о поведении «координаты z » рельефа излома, указанный способ имеет свои недостатки. Существенным из них следует считать отсутствие градуировочных данных о переводе угла α (или коэффициента вторичной эмиссии электронов) непосредственно в глубину (z , мкм) рельефа.

Глава 7

МЕТОД ТЕМПЕРАТУРНОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ

7.1 Возможности и преимущества метода

Практика применения высокопрочных материалов и сплавов на их основе для сложнагруженных деталей и конструкций показала, что большинство разрушений, не связанных с изменением геометрических размеров деталей, происходит при нагрузках значительно ниже расчетных.

Для предотвращения преждевременного разрушения и обеспечения высокого уровня сопротивления зарождению и развитию трещин в многофазных конструкционных материалах, особенно в материалах, работающих в условиях растягивающих или циклических напряжений, необходимо знать природу разрушения.

Конструкционные материалы имеют сложный состав и гетерогенную структуру. Если в материалах есть структурные элементы с разной сопротивляемостью разрушению, то могут возникать условия, способствующие преждевременному разрушению и развитию трещин.

Зарождение разрушения связано с пластической деформацией, которая может быть обусловлена различными механизмами в зависимости от условий деформации (температуры, скорости деформации, напряжений и т.д.), но механизм разрушения металлических материалов одинаков независимо от механизмов деформации и состоит в зарождении, а также в развитии трещин. Наиболее важную информацию о природе разрушения получают именно на стадии зарождения разрушения.

Для определения слабых звеньев в строении металлических материалов необходимо установить связь особенностей структуры металла с процессами разрушения. Поэтому большой интерес представляет метод температурной микроскопии, который совмещает достоинства микроскопических и фрактографических методов, а также методов испытания механических свойств металлических материалов.

Метод температурной микроскопии позволяет определять величину истинной микропластической деформации отдельных структурных элементов (слабых звеньев) в структуре металла в зависимости от напряжений, вызывающих разрушение. Этим он выгодно отличается от других методов изучения изменения механических свойств металлов, дающих усредненные характеристики, отнесенные к наиболее ослабленному сечению в макрообъеме рабочей зоны испытываемых образцов. Методом температурной металлографии получают следующие сведения:

- о закономерностях протекания пластической деформации и разрушения при температурах, при которых невозможно наблюдать зарождение разрушения традиционными методами;
- о вкладе микропластической деформации в изменение структурных составляющих и зарождение трещин в металле;
- о влиянии фазовых превращений в сплавах на особенности процесса разрушения;
- о кинетике процессов старения, разупрочнения и фазовых превращений и об их влиянии на механические свойства при термосиловом воздействии;
- об изменении параметров структуры в период термосилового воздействия.

В дополнение к стандартным механическим свойствам этот метод позволяет:

определять прочностные и пластические характеристики, получаемые при проведении экспериментов по заданной программе в процессе термосилового воздействия в интересующий исследователя момент испытания;

с привлечением методов электронной микроскопии, фазового анализа и других физических методов изучать взаимосвязь деформационного и фазового микрорельефов с тонкой структурой.

В настоящее время наибольший практический интерес представляют исследования поведения конструкционных материалов, и прежде всего средне- и высоколегированных сталей

и алюминиевых сплавов с сложной гетерогенной структурой и, как следствие, повышенной склонностью к трещинообразованию.

Преимущества метода температурной микроскопии наглядно проявляются при изучении термостатического воздействия на металлы, претерпевающие фазовые превращения при термическом воздействии. Обычный метод – закалка не устанавливает, например, для сталей, особенности кинетики формирования и роста зерен аустенита, определять продукты его распада при различных режимах термомеханического воздействия и др., в то время как метод температурной микроскопии дает возможность:

- фиксировать процесс (например, для стали) превращения ферритно - цементитных структур в аустенит во время нагрева;
- фиксировать кинетику изменения зерен аустенита (форму и размеры) – многократную смену границ во время нагрева и выдержки при заданной температуре;
- конкретизировать температурно-временные параметры проявления разных механизмов роста зерна аустенита;
- фиксировать кинетику процессов распада аустенита во время охлаждения;
- выявлять неоднородность фазовых превращений в металле, сохранившем после неполной гомогенизации ликвационную неоднородность;
- исследовать деформационные микрорельефы на различных этапах пластической деформации и сопоставлять их со структурой металла;
- выявлять структурные очаги преждевременного зарождения трещин, кинетику их развития и т.д.

При применении данного метода основное внимание уделяют двум аспектам:

- оценке неоднородности протекания пластической деформации в отдельных структурных составляющих и связанному с этим зарождению очагов повреждаемости.
- оценке состава и характера структурных составляющих, в которых зарождаются трещины на начальных стадиях пластической деформации и которые могут способствовать преждевременному разрушению материалов, а также выявлению характера структурных составляющих, тормозящих распространение трещин, т.е. повышающих надежность работы сплавов.

Основными критериями количественной оценки склонности материалов к разрушению приняты следующие величины: локальная деформация отдельных структурных составляющих в момент зарождения в них трещин; напряжения, при которых появляются первые микротрещины; время от момента зарождения микротрещин до полного разрушения образца; работа разрушения образца.

Материалы справочника наглядно иллюстрируют методические и экспериментальные возможности метода температурной металлографии. Метод несомненно, целесообразно применять для решения широкого круга задач практического металловедения. Этот метод полезен при проведении исследований, связанных с выбором химического состава и конструированием заданной структуры металлических материалов, в том числе сварных соединений, а также при прогнозировании поведения реальных металлических конструкций в условиях термостатического воздействия, в определенной степени моделирующих реальные технологические процессы и условия эксплуатации изделий.

7.2. Методики проведения исследований металлических материалов при термомеханическом воздействии

7.2.1. Аппаратура

Для решения различных научных и технологических задач с помощью этого метода созданы специализированные установки, разработаны специальные методики исследований.

Установки для реализации метода температурной микроскопии представляют комплексы, в состав которых входит следующее оборудование:

- устройства для механического нагружения образцов по заданной программе (растяжение, сжатие, знакопеременный изгиб);
- оптическая система для наблюдения и фиксации микроструктуры поверхности исследуемых образцов;
- системы для нагрева и охлаждения образцов;
- система для создания вакуума или защитной атмосферы;
- система для измерения микротвердости при различных температурах;
- системы для измерения электрического сопротивления, термофизических и других характеристик.

Наиболее известны зарубежные модели: НМ-3, НМ-4, НМ-100 фирмы «Юнион Оптикал» (Япония), «Хайтиш» фирмы «Лейтц» (Германия), «Вакутерм» фирмы «Рейхерт» (Австрия). Эти установки оснащены качественными высокотемпературными микроскопами и системами для испытаний образцов по схемам растяжения, сжатия, изгиба в вакууме или в защитной среде с приспособлениями для измерения микротвердости, электросопротивления и др.

Основные технические характеристики таких моделей следующие:

- температурный интервал испытаний – от минус 180 до 3000°C;
- нагрев индукционный, радиационный, электронно-лучевой и пропусканием тока через образец;
- контроль за температурой – с помощью термопар (до 1600°C) и пирометров (до 3000°C);
- активное растяжение со скоростью от $8 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^3$ м/с, растяжение под действием постоянной нагрузки до 3000 Н, сжатие под действием постоянной нагрузки до 2000 Н;
- измерение микротвердости при температурах от минус 180 до 1600 °C;
- максимальное полезное увеличение микроскопа до 800 крат.

Отечественной промышленностью выпущены установки следующих моделей;

ИМАШ-9 – для измерения микротвердости при повышенных температурах;

ИМАШ-10 – для испытаний на малоцикловой поперечный изгиб;

ИМАШ-20 – для испытаний на активное растяжение или растяжение с постоянной нагрузкой.

Технические характеристики этих установок следующие:

- температурный интервал испытаний - от минус 70 до 1500°C;
- нагрев – радиационный или пропусканием тока через образец;
- контроль температуры с помощью термопар;
- скорость перемещения активного захвата – от $8 \cdot 10^{-8}$ до $1,2 \cdot 10^{-2}$ м/с;
- максимальное нагружающее усилие – до 10000 Н;
- максимальное полезное увеличение – 420 - кратное (при наблюдении), 100 - кратное при киносъемке;
- измерение микротвердости при повышенных температурах до 1100°C при одновременном действии постоянных или переменных нагрузок;
- знакопеременный изгиб с частотой нагружения от 3 до 3000 циклов в минуту.

В установках предусмотрена возможность проведения испытаний в вакууме или газовых средах.

Однако, используя эти установки, исследователи не всегда могут полностью решить поставленные задачи, поэтому для решения конкретных задач они часто существенно модернизируют серийные установки, или на их базе создают аппаратуру собственной конструкции.

Можно выделить следующие основные направления дополнительных аппаратурно-методических разработок:

- автоматизация процесса управления экспериментом (создание систем программного нагрева и нагружения);
- автоматизация регистрации и обработки результатов экспериментов применением компьютерной техники;
- разработка новых конструктивных решений высокотемпературных микроскопов;
- создание систем по расширению диапазона температур испытаний, скоростей нагрева и охлаждения образцов;
- расширение конструктивно - методических возможностей установок температурной микроскопии путем совмещения их с другими установками (например, с моделями ААИ, РЭМ, МАР и др.).

Из перспективных разработок, ведущихся в этом направлении. Можно отметить следующие.

Применение лазерного высокотемпературного микроскопа, позволяющего проводить прецизионные высокотемпературные исследования при температурах до 3000°C и 400-кратном увеличении. Луч лазера нагревает строго ограниченную поверхность и создает на ней нужную конфигурацию температурного поля. В зоне нагрева отсутствуют массивные элементы нагревателя, поэтому возможно применение высокоразрешающей оптики.

Перспективно совмещение методов экзoeлектронной эмиссии и фотоэмиссии. Экзoeлектронное топографирование поверхности образцов позволяет наблюдать и регистрировать развитие деформационных процессов по изменению деформационного рельефа.

Нередко структуру материалов нового поколения необходимо изучать на субмикроскопическом уровне, что возможно только с помощью методов электронной микроскопии. Наиболее эффективен в этом случае растровый электронный микроскоп, совмещенный с установками типа ИМАШ и позволяющий исследовать массивные объекты. Преимущество совмещенного РЭМ в наибольшей мере проявляется при исследовании развитых деформационных рельефов, благодаря резкости изображения можно достаточно четко видеть строение зерен и внутриверхнюю структуру при значительных степенях деформации; объемность изображения дает возможность наблюдать ход деформационных процессов в материале, а также определять влияние включений и других мелкодисперсных фаз на особенности деформации и разрушения.

Значительные методические возможности открываются при совмещении этих установок с растровым электронным микроскопом. Для определения взаимосвязи между возникновением оптически разрешаемых микротрещин и микронеоднородностью химического состава эффективно использование температурной микроскопии в сочетании с методами рентгеноспектрального анализа (РСМА, ЛСМА, ЭСХА, Оже-электронная спектроскопии (ОЭС)) и другими методами

7.2.2 Образцы для исследования

Для изучения процессов деформации, разрушения и структурных изменений в металлах (литых и деформированных) рекомендуется использовать плоские образцы четырех типов, форма и размеры которых приведены на рис. 7.1.

Образец типа I целесообразно применять для исследования металлов с крупнозернистой структурой и металлов с неравномерным распределением структурных составляющих. При использовании такого образца можно наблюдать за сравнительно большой площадью поверхности металла. Недостатками данного типа являются необходимость нанесения реперных отпечатков, служащих базой для измерения микропластической деформации по всей рабочей длине образца (так как заранее неизвестно место локализации деформации в рабочей зоне), и невозможность проведения испытаний до разрушения высокопрочных материалов (из-за недостаточной мощности серийно выпускаемых установок).

Образцы типа II целесообразно применять для испытаний на растяжение металлов с мелкозернистой структурой. Достоинство этого образца – уменьшенная по сравнению с образцом типа I площадь сечения, что позволяет испытывать высокопрочные материалы.

Недостаток, как и у образцов типа I, – необходимость нанесения реперных отпечатков по всей рабочей длине.

Образцы типа III целесообразно использовать при ускоренных испытаниях металлов. Достоинство данного типа – локализация пластической деформации в рабочей части образца на базе 6 мм, а следовательно, значительное снижение трудоемкости эксперимента благодаря уменьшению длины реперных линий на рабочей базе. Недостаток – малая площадь исследуемой поверхности.

Образцы типа IV предназначены для испытаний при знакопеременном изгибе. Толщина образца может меняться от 1,5 до 3 мм. Выбор толщины ограничен прочностью материала при исследуемой температуре и мощностью установки.

Для исследования покрытий и упрочняющих слоев может быть использован образец любого типа. При этом изучаемое покрытие наносят на рабочую часть образца. Предварительно все четыре грани рабочей части образца обрабатывают механическим способом, причем обработка аналогична требуемой под наносимые покрытия. Затем с одной рабочей грани образца покрытие удаляют до основного металла и таким образом производят наблюдение за поведением покрытия с обеих сторон металла- основы. Для избежания отколов покрытия при изготовлении микрошлифов, образец помещают в струбцину, заливают сплавом Вуда и предварительно механически отторцовывают, затем полируют. Для хрупких покрытий рекомендуется к боковым граням образца прижимать стальные пластинки толщиной 0,01 мм. Образец, извлеченный из струбцины, электролитически полируют и в случае необходимости протравливают для выявления микроструктуры.

Биметаллические материалы исследуют по двум схемам. В соответствии с первой схемой граница раздела между металлами проходит поперек рабочей части образца. В соответствии со второй – граница раздела между металлами проходит вдоль рабочей части образца. В первом случае применяют образцы всех четырех типов. А во втором рекомендуется использовать образец, отличающийся от образцов типов I и II тем, что его головки повернуты на 90°.

Существует несколько схем исследований сварных соединений. Для соединений, применяющихся без усиления сварного шва, образец вырезают поперек этого шва. В таком случае пригодны образцы всех типов.

Для сварных листовых соединений используют образцы I и II типов с головками, повернутыми на 90°. Такие образцы пригодны только для листовых соединений толщиной до 3 мм.

Если необходимо исследовать зону термического влияния сварного шва, то рекомендуется проводить имитацию термического нагрева металла при сварочном процессе. Для этого из исследуемого материала делают образцы типа I или II, затем поперек сечения образца неплавящимся электродом быстро нагревают металл до температуры солидуса и охлаждают со скоростями, имитирующими различные режимы сварки. В результате на образце формируется полная картина структур металла, имитирующая зону термического влияния.

На образцах, подвергнутых специальному термическому воздействию, предварительно проводят металлографический анализ, выявляют микроструктуру и измеряют микротвердость вдоль образца. Такая методика позволяет определять, по каким структурным составляющим, при каких напряжениях и деформациях происходит зарождение трещин в условиях испытаний на установках температурной микроскопии по заданной программе, в определенной степени имитирующей условия эксплуатации.

Большинство образцов испытывают после полирования без выявления микроструктуры травлением, чтобы не усложнять наблюдение за структурными изменениями и микрорельефом, возникающими в условиях термического, деформационного или термодеформационного воздействия. В отдельных случаях для выявления элементов структуры перед деформированием можно применять травление химическими реактивами, однако возникающие при этом структурные концентраторы напряжений на поверхности образца могут искажать следы деформации металла.

Шлифование и полирование образцов больших размеров вызывает определенные затруднения. Для ускорения выполнения указанных операций рекомендуется применять

автоматизированные полировальные установки, а также различные приспособления, принципиальное устройство одного из них показано на рис. 7.2.

7.2.3 Методы измерения локальной деформации

Существуют различные методы измерения микронеоднородности пластической деформации. Наиболее применяемые следующие:

- метод искусственных баз, заключающийся в определении пластической микродеформации в данной точке по изменению линейных размеров отпечатка алмазной пирамиды, нанесенного на поверхность образца до деформации;
- метод статистической обработки результатов измерения профилограмм искажения плоских сечений образцов в процессе деформирования сжатием;
- метод нанесения реперных отметок в виде отпечатков алмазного индентора и определения величины пластической деформации по изменению расстояния между ними;
- методы делительных сеток (накатка, травление по трафаретам, напыление, фотопечать, царапание поверхности образца);

При экспериментах измеряют общую деформацию рабочей зоны образца и локальную деформацию (микродеформацию) выбранных участков или отдельных элементов структуры. Эти характеристики определяют как относительное удлинение вдоль оси растяжения: общую деформацию – на рабочей базе образца (6–30 мм), локальную – на микроучастках, сопоставимых с величиной отдельных элементов структуры (10–50 мкм). На рабочую поверхность образца (на расчетную длину l_0) наносят реперные отпечатки индентором (например, алмазной пирамидкой) с заданным шагом разметки, который выбирают в зависимости от размеров элементов структуры. Обычно на плоскость образца наносят 3–5 реперных линий, каждая из которых содержит от 30 до 130 отпечатков.

Для выполнения трудоемкой операции по нанесению реперных отпечатков и измерению расстояний между ними разработано специальное приспособление к прибору типа ПМТ, которое позволяет зафиксировать и быстро найти наблюдаемый участок после эксперимента (рис 7.3). Приспособление устанавливают двумя штифтами на предметном столике прибора. Двумя другими штифтами (один из них неподвижен) образец закрепляют в исходном либо в растянутом состоянии. Образец строго фиксируют относительно микрометрических винтов, что позволяет наносить отпечатки параллельно или перпендикулярно его оси.

Локальную деформацию в объемах зерен (ε_z) и в приграничных участках (ε_r) определяют путем измерения длины фиксированных микроучастков внутри зерен и по границам, при этом граница зерна должна быть внутри измеряемого микроучастка. По результатам изменений длины фиксированных микроучастков в процессе растяжения при разных значениях относительного удлинения образца можно определить среднюю локальную деформацию объемов зерен и зернограничных микрообъемов при конкретной средней величине относительного удлинения рабочей зоны образца.

В свою очередь локальную деформацию микрообъемов можно разделить на локальную деформацию за счет раскрытия микротрещин (ε_r) и за счет пластического деформирования (ε_d) микрообъемов. Для этого измеряют длину фиксированного микроучастка до и после деформации на заданную величину (l_0 и l_k соответственно) и ширину микротрещин (b) вдоль направления разметки после деформации.

Локальную деформацию микроучастка (ε_i , %) определяют по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{l_{ki} - l_{0i}}{l_{0i}} \cdot 100,$$

а локальную деформацию за счет раскрытия микротрещин (ε_r , %) – по формуле

$$\varepsilon_r = (b/l_0) \cdot 100.$$

Локальную деформацию за счет пластического течения находят как разность

$$\varepsilon_d = \varepsilon_i - \varepsilon_r.$$

Кроме того, количественно оценивают долю удлинения всего образца за счет раскрытия микротрещин. Для этого определяют сумму ширин всех микротрещин (Σb_i) вдоль разметки на поверхности образца и вычисляют долю удлинения (δ_t , %) образца за счет раскрытия микротрещин по формуле

$$\delta_t = (\Sigma b_i / \Sigma b_{0i}) \cdot 100,$$

где b_{0i} - исходная ширина всей разметки.

7.2.4. Способы нагрева образцов

При исследовании структуры и свойств металлов в широком диапазоне температур в вакууме или в защитных газовых средах нагрев и охлаждение образцов до заданных температур в установках осуществляют радиационными (вследствие излучения тепловой энергии нагревателей) и контактными (в результате действия пропускаемого электрического тока через образец) методами.

Контактный способ с помощью термопар целесообразен при решении задач, требующих высоких скоростей нагрева и охлаждения, что невозможно в условиях радиационного нагрева, однако при контактном способе из-за образования в образце при деформировании макро- и микродефектов повышается вероятность локальных перегревов, ускоряющих разрушение.

Скорости нагрева и охлаждения в установках температурной микроскопии можно регулировать, меняя напряжение электрического тока, пропускаемого через образец. Но эти скорости ограничены возможностью вакуумной системы поддерживать заданную степень разрежения в условиях интенсивного испарения металла с поверхности образца при высоких температурах испытания. Скорость охлаждения лимитируется термической инерционностью системы. Для ее увеличения предусмотрен обдув поверхности образца инертными газами.

Наиболее надежным способом крепления спая термопар к образцу является точечная электросварка. Термопару приваривают либо к боковой стороне образца, либо к стороне, противоположной полированной поверхности. При этом объем металла, подвергающийся интенсивному нагреву в процессе приварки, не превышает 1-2 мм³, и исходная структура всего образца практически не меняется.

Можно крепить термопару к образцу с помощью зачеканки. Для этого в центре боковой поверхности высверливают две симметричные лунки глубиной 1 мм и в них зачеканивают головки термопар. Недостаток такого способа заключается в том, что лунки являются концентраторами напряжений, по которым может происходить разрушение образца, искажая истинную картину разрушения; кроме того не всегда гарантировано хорошее качество контакта термопары с образцом, так как при деформации высверленная лунка тоже деформируется, и контакт может ухудшиться. Возможна зачеканка термопары в галтель головки образца. В этом случае контакт между термопарой и образцом в процессе эксперимента не ухудшается, так как деформация в основном проходит в рабочей части образца.

Градиент температур между центром образца и галтелью учитывают экспериментально определяемыми поправками. Однако способ зачеканки термопар в образец является трудоемким, поэтому он не всегда приемлем (особенно для малопластичных металлов). Поэтому рекомендуется простое в изготовлении стационарное приспособление в камерах установок для измерения температуры образцов, которое дает точность замеров, аналогичную точности, получаемой при зачеканке или приварке. При использовании такого приспособления значительно сокращается время подготовки образца к опыту. Оно состоит из двух пластинчатых пружин, на концах которых прикреплены держатели с керамическими втулками (рис.7.4).

С помощью этих втулок производится контакт термопары с образцом. Между пружинами установлен палец, на конце которого укреплено вращающееся колесо, препятствующее прогибанию образца при испытании. Выводы от одной термопары подключают к регулируемому потенциометру, а от второй – к контрольному нерегулируемому потенциометру, которые контролируют температуру с точностью не менее 0,5 %.

Метод контактного электронагрева дает неравномерное распределение температур по длине образца, связанное с охлаждением их головок захватами деформирующих устройств. Протяженность зоны образца с равномерным (колебания температуры не более 0,5 %) прогревом при температурах до 500°C не превышает 30 мм. Это обуславливает выбор рабочей базы образца длиной 30 мм при измерении общей деформации в процессе испытания. Экспериментально установлено, что в условиях сравнительно равномерной деформации, например образца из алюминиевых сплавов, градиент температуры по его длине практически не меняется вплоть до образования шейки или разрушения, а при деформации образцов из жаропрочных металлов при нагреве до 1500°C он изменяется, но остается постоянным на длине образца, равной 6 мм. Для измерения высоких температур в установках возможно применение тепловизоров и пирометров.

При повышенных температурах в вакууме видимое окисление поверхности образцов сталей отсутствует при разрежении 1×10^{-4} мм рт.ст., а алюминиевых сплавов – при 1×10^{-2} мм рт.ст. Характерная особенность, проявляющаяся при нагреве образцов в вакууме, - избирательное испарение с их поверхности. Так, несмотря на малую упругость паров диссоциации алюминия и его сплавов, при проведении исследований при температурах, близких к температуре солидуса. Наблюдается избирательное испарение отдельных структурных составляющих, что влечет изменение исследуемой структуры. Это необходимо учитывать при оценке структурных изменений. Для устранения структурных изменений при высоких температурах, вызванных избирательным испарением, рекомендуется проводить эксперименты в атмосфере инертных газов (наиболее удобен химически чистый аргон). Конструкции всех установок температурной микроскопии это позволяют.

7.3 Методические особенности исследования процессов деформирования и разрушения образцов

7.3.1. Процессы деформирования и разрушения с различными скоростями растяжения в условиях нагрева и охлаждения на установках температурной микроскопии

Схема проведения эксперимента при термическом воздействии

1. Подготавливают образец для эксперимента в виде микрошлифа (см. раздел 7.1).
2. Выявляют до начала эксперимента исходную структуру материала (зеренную, дендритную, полосчатость и др.), подвергая образец химическому или электролитическому травлению, выбирают и фиксируют его характерные участки реперными отметками.
3. Помещают образец в рабочую камеру установки и по заданной программе проводят термическую обработку. При этом в зависимости от решаемой задачи варьируют параметры: температуру и скорость нагрева, продолжительность выдержки при заданной температуре, скорость охлаждения, режим термоциклирования.
4. Одновременно наблюдают под микроскопом и фиксируют с помощью фото- и киносъемки формирование микрорельефа на поверхности образца. При этом идентифицируют элементы микрорельефа, При записывают относительное изменение электрического сопротивления образца.
5. В ходе эксперимента по заданной схеме определяют и исследуют следующее: температурно - временные параметры структурных изменений на поверхности образца; кинетику формирования зерен высокотемпературной фазы (многократную смену границ в процессе нагрева и выдержки при заданной температуре); механизмы роста высокотемпературной фазы; размер зерна на разных этапах термического воздействия; кинетику формирования структур игольчатого типа с идентификацией последних (например, бейнит или мартенсит); термокинетическую диаграмму распада высокотемпературной фазы; кинетику коагуляции структурных составляющих.

Схема проведения эксперимента при деформационном и термдеформационном воздействии

1. Подготавливают образец в виде микрошлифа (см. п.7.1).
2. Определяют площадь поперечного сечения рабочей части образца.
3. Образец помещают в рабочую камеру установки, нагревают и деформируют по заданной программе, варьируя в зависимости от решаемой задачи параметры: температуру и скорость нагрева, продолжительность выдержки при заданной температуре, режим термоциклирования, скорости охлаждения и деформирования, величину и продолжительность действия нагрузки при деформировании постоянной и переменной нагрузкой, степень деформации и др.
4. Изучают под микроскопом и фиксируют с помощью фото- и киносъемки в процессе деформации формирование микрорельефа на поверхности образца.
5. Оценивают прочностные и пластические характеристики исследуемого металла в соответствии с данными табл. 7.1 .

Таблица 7.1 Характеристики, измеряемые при металлографическом исследовании процессов деформирования и разрушения образца в условиях одноосного растяжения

Номер п / п	Измеряемая величина	Обозначение	Метод измерения	Связь характеристик, определяемых прямыми и косвенными методами	Погрешность измерения
1	Начальная расчетная длина образца, мм	l_0	Прямой	-	0,1 мм
2	Начальная толщина в рабочей части образца, мм	a_0	Прямой	-	0,05 мм
3	Начальная ширина в рабочей части образца, мм	b_0	Прямой	-	0,05 мм
4	Начальная площадь поперечного сечения в рабочей части образца, мм ²	F_0	Косвенный	$F_0 = a_0 b_0$	-
5	Конечная расчетная длина образца, мм	l_k	Прямой	-	0,1 мм
6	Относительное удлинение после разрыва, %	δ	Косвенный	$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100$	-
7	Осевая растягивающая нагрузка, действующая на образец в данный момент испытания, МПа	P	Прямой	-	1 %
8	Условное нормальное напряжение, МПа	σ	Косвенный	$\sigma = \frac{P}{a_0 b_0}$	-
9	Начальная расчетная локальная длина: измеренное при комнатной температуре расстояние между реперными точками, нанесенными на образец, мкм	l_{0i}	Прямой	-	1 мм
10	Конечная расчетная локальная длина: измеренное после снятия нагрузки расстояние между реперными точками, нанесенными на образец, мкм	l_{ki}	Прямой	-	1 мкм
11	Относительное локальное удлинение: отношение приращения расчетной локальной длины образца после снятия нагрузки к ее первоначальной величине, %	ε_i	Косвенный	$\varepsilon_i = \frac{l_{ki} - l_{0i}}{l_{0i}} \cdot 100$	-
12	Длительность деформирования, с	τ	Прямой	-	0,2 с
13	Скорость деформирования, м/с	ν	Косвенный	-	-

Номер п / п	Измеряемая величина	Обозначение	Метод измерения	Связь характеристик, определяемых прямыми и косвенными методами	Погрешность измерения
14	Расчетная локальная длина до приложения нагрузки: расстояние между реперными точками, измеренное при температуре испытания до приложения нагрузки, мкм	$l_{t,0,i}$	Прямой	-	1 мкм
15	Расчетная локальная длина в данный момент испытания: расстояние между реперными точками, измеренное при температуре испытания в данный момент деформирования, мкм	$l_{t,\tau,i}$	Прямой	-	1 мкм
16	Относительная локальная деформация: отношение приращения расчетной локальной длины в данный момент испытания (t ,) к ее величине до приложения нагрузки, %	$\varepsilon_{t,\tau,i}$	Косвенный	$\varepsilon_{t\tau i} = \frac{l_{t\tau i} - l_{t0i}}{l_{t0i}} \cdot 100$	-
17	Условное напряжение разрушения условное нормальное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, отнесенной к начальной площади поперечного сечения в рабочей части образца, МПа	σ_p	Косвенный	$\sigma_p = \frac{P_{\max}}{a_0 b_0}$	-
18	Площадь под кривой растяжения $P = f()$ при масштабе по оси P , равном M_P , по оси , равном M , мм ²	S_p	Прямой	-	3 %
19	Работа разрушения механическая работа деформирования образца до разрушения при скорости деформирования v (м/с), Дж	A_p	Косвенный	$A_p = M_p M_\tau S_p v$	-
20	Работа зарождения трещин – механическая работа деформирования образца до момента зарождения трещин	$A_{зар}$	Косвенный	$A_{зар} = M_p M_\tau v S_{зар}$	-
21	Работа развития трещин – механическая работа деформирования образца от момента зарождения трещин до его разрушения.	$A_{разв}$	Косвенный	$A_{разв} = M_p M_\tau v S_{разв}$	-
Примечание. Характеристики по номерам 1- 9 приведены по ГОСТу 1497-73 «Методы испытания на растяжение», и с 10 - 21 по данным авторов (введены для расширения возможностей метода).					

Порядок подготовки и выполнения измерений состоит в следующем. Измеряют начальные величины: толщину (a_0). Ширину (b_0) и сечение (F_0) рабочей части образца. Отмечают рисками начальную расчетную длину образца l_0 . которая для образцов типа I или II составляет 30 мм при растяжении при комнатной температуре и 6 мм при растяжении в условиях нагрева и охлаждения. Начальная расчетная длина для образца типа III составляет 6 мм независимо от условий испытания.

На рабочую поверхность образца алмазной пирамидкой наносят реперные отпечатки на расчетной длине образца с заданным шагом разметки, который выбирают в каждом конкретном случае в зависимости от размеров элементов структуры изучаемых металлов. Величину нагрузки, при которой наносят реперные отпечатки, выбирают в зависимости от твердости исследуемых металлов. Нагрузка должна обеспечивать минимально видимый под микроскопом размер отпечатка, не искажающего структуру металла.

В ходе эксперимента возможно определять: механизмы пластической деформации исследуемого металла; морфологию, размеры и плотность элементов деформационного

микрорельефа; поведение структурных составляющих на разных этапах деформирования вплоть до разрушения; взаимосвязь деформационного микрорельефа с элементами структуры исследуемого металла; источники зародышевых микротрещин и характер их развития на различных этапах деформирования; источники пор и изменения пористости на границах и в объеме зерен на разных этапах деформирования; изменение формы зерен.

Результаты измерений обрабатывают, определяя следующие величины, указанные в табл.7.1: относительное удлинение после разрыва (δ); осевую растягивающую нагрузку (P); напряжение начала пластической деформации (σ_t); напряжение зарождения трещин ($\sigma_{тр}$) и разрушения ($\delta_{разр}$); относительные локальные удлинения после снятия нагрузки (ϵ_i); относительные локальные деформации в процессе эксперимента ($\epsilon_{t,i}$); среднее локальное удлинение ($\epsilon_{ср\ к}$); работу зарождения трещины ($A_{зар}$); работу развития трещины ($A_{разв}$); работу разрушения образца (A_p).

Измерение работы можно проводить любым современным методом.

Следует отметить, что возможно измерение внутренних напряжений, возникающих в образцах при изменении температуры и фазовых превращениях. Уровень внутренних напряжений определяют на образце, один конец которого жестко закреплен в захватах установки, а второй присоединен к измерителю статических деформаций, встроенному в установку. При этом измеряют начальную площадь поперечного сечения образца F_0 . Определяют осевую растягивающую нагрузку P , действующую на образец в данный момент времени, внутренние напряжения (σ в МПа), возникающие в образце из-за разности удельных объемов фаз при фазовых превращениях и неоднородности протекания фазовых превращений, а также вследствие изменения коэффициента линейного расширения в связи с изменением температуры $\sigma = P/F_0$.

7. 3.2 Процессы деформирования и разрушения в условиях знакопеременного изгиба при комнатной и повышенных температурах

Характеристики, определяемые при металлографическом исследовании процессов деформирования и разрушения плоских образцов при знакопеременном изгибе, а также сведения о методах измерений и их погрешностях приведены в табл. 7.2 .

Измерения проводят в следующей последовательности. Измеряют толщину рабочей части образца типа IV, отмечают рисками расчетную длину образца, эмпирически подбирают напряжение, обеспечивающее разрушение образца в многоцикловой области при требуемой длительности испытаний. Устанавливают эксцентрик системы нагружения в одно из возможных положений, при котором амплитуда вертикального перемещения свободного конца образца наиболее близка к заданной.

С помощью индикатора на установке замеряют величины максимального и минимального перемещений свободного конца образца f_{max} и f_{min} соответственно. По формулам, приведенным в табл. 7.2, подсчитывают максимальную и минимальную деформацию цикла, амплитуду деформации цикла, коэффициент асимметрии цикла. Производят нагрев образца до заданной температуры и подвергают его знакопеременному изгибу вплоть до разрушения.

Таблица 7.2 Характеристики, измеряемые при металлографическом исследовании процессов деформирования и разрушения образцов в условиях циклического нагружения

<i>Измеряемая величина</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Метод измерения</i>	<i>Связь характеристик, определяемых прямым и косвенным методами</i>	<i>Относительная погрешность, %</i>
Толщина образца в рабочей части, мм	h	Прямой	-	1,0
Минимальное перемещение образца:	$f_{\min}$	Прямой	-	1,0
минимальное перемещение свободного конца образца, мм				
Максимальное перемещение образца:	$f_{\max}$	Прямой	-	1,0
максимальное перемещение свободного конца образца, мм				
Амплитуда перемещения образца:	f_a	Косвенный	$f_a = (f_{\max} - f_{\min})/2$	-
амплитуда вертикального перемещения свободного конца образца, мм				
Минимальная деформация цикла, %	$\epsilon_{\min}$	косвенный	$\epsilon_{\min} = 412 \cdot 10^{-4} h \cdot f_{\min}$	-
Максимальная деформация цикла, %	$\epsilon_{\max}$	косвенный	$\epsilon_{\max} = 412 \cdot 10^{-4} h \cdot f_{\max}$	-
Амплитуда деформации цикла, %	ϵ_a	косвенный	$\epsilon_a = 412 \cdot 10^{-4} h \cdot (f_{\max} - f_{\min})/2$	-
Коэффициент асимметрии цикла:	R_ϵ	косвенный	$R_\epsilon = \epsilon_{\min}/\epsilon_{\max}$	-
характеристика степени асимметрии цикла (ГОСТ 286085)				
Частота циклов: число циклов напряжений в единицу времени, Гц	ω	Косвенный	$\Omega = 1/\tau$	-
Период цикла: продолжительность одного цикла, мин	τ	Прямой	-	0,008
Длительность циклирования, мин	T	Прямой	-	0,008
Количество циклов: число циклов, пройденных образцом перед разрушением при заданном напряжении	N	Прямой	-	-

В процессе испытания наблюдают визуально за микроструктурными изменениями в процессе деформирования, проводят фото- или киносъемку структурных изменений на аппаратуре, встроенной в установку, и фиксируют момент зарождения трещин.

7. 3. 3 Измерения микротвердости при нагреве и одновременном действии растягивающих напряжений на плоских образцах в условиях нормальных и высоких температур

Применение установок для измерения «горячей микротвердости» открывает принципиально новые возможности для изучения влияния таких факторов, как температура, время и скорость приложения нагрузки на процессы упрочнения и разупрочнения металлов и сплавов с разной структурой, формирующейся после заданных режимов термической или термомеханических обработок. Измерение микротвердости – один из наиболее чувствительных методов изучения механизмов деформации. Этим методом возможно оценить прочностные характеристики поверхностных покрытий и упрочняющих слоев металла при высоких температурах.

Порядок измерения микротвердости следующий. Устанавливают выбранную нагрузку на шток индентора. Нагревают образец до заданной температуры и при необходимости прикладывают к нему растягивающее напряжение заданной величины. С помощью высокотемпературного микроскопа выбирают исследуемые участки или зоны. Индентор, встроенный в установку, нагревают до той же температуры, что и образец, наносят отпечаток на выбранную зону и измеряют его размеры.

При изучении микротвердости образцов с покрытиями их шлифуют и полируют так, чтобы покрытие имелось на боковых гранях. Так же изготавливают образцы с упрочненными (азотированными, алитированными и др.) слоями. Это позволяет проводить исследования микротвердости по глубине покрытий или слоев.

Измерение диагонали отпечатка проводят с помощью окулярного микрометра, установленного на тубусе микроскопа, или по фотографиям, снятым с поверхности образца в процессе эксперимента. Возможно измерение отпечатков на микротвердомере после того, как образец вынут из установки.

Количество измерений, необходимых для того, чтобы среднее значение попало в доверительный интервал с заданной вероятностью при малых объемах выборки, находят методами математической статистики.

7.3.4 Особенности фиксации процессов пластической деформации и зарождения трещин киносъемкой

Проведение исследований по описанным методикам заключается в выборе характерной микроструктуры исследуемого материала и последующем изучении изменения ее микрорельефа в процессе термомеханического воздействия. При этом возникновение полос скольжения фиксируют как визуально, так и с помощью фотографирования или киносъемки. Определяют те структурные составляющие, в которых в первую очередь зарождаются, разрешаемые оптическим методом. Фиксируют изменения прочностных (микротвердость) и пластических свойств этих структурных составляющих, а также изучают характер дальнейшего развития обнаруженных микротрещин под действием прикладываемого напряжения; величины, характеризующие изучаемый процесс, оценивают по формулам, приведенным в табл. 7.1 и 7.2.

Перспективным является фиксирование кинетики микроструктурных изменений с помощью кинокамеры, встроенной в установку. На рис. 7.5 показана кинетика формирования термического микрорельефа катаной стали Cr-Ni-Mo (один и тот же участок), зафиксированный киносъемкой при нагреве и охлаждении. На рис. 7.6 показана кинетика зарождения трещин в интерметаллиде Al_3 -Mo при растяжении при 300°C (x500).

Скорость киносъемки подбирают в зависимости от скорости изменения структур при испытаниях. Продолжительность отснятого фильма можно менять, регулируя соотношение шестерен покадрового двигателя. Длительность демонстрации фильма рассчитывают по формуле

$$T = V_1 t / V_2$$

где T – длительность демонстрации фильма, V_1 – скорость съемки при опыте, кадр/мин; V_2 – скорость показа фильма, кадр/с; t – продолжительность эксперимента, с.

7.3.5 Исследование макроструктуры в условиях термомеханических испытаний

В настоящее время макроструктуру металлов контролируют двумя способами: первый – изучение макроструктуры полированной и протравленной плоскости разреза, второй – изучение излома в металле, образовавшегося вследствие разрушения образца. Недостаток способа изучения изломов заключается в том, что изломы исследуемых металлов образуются при различных степенях деформации, разных напряжениях и температурах, что иногда не позволяет получать сравнимые результаты.

Более информативный способ состоит в исследовании макроструктуры металлов с помощью установок температурной металлографии, которые изучают деформационный макрорельеф, образующийся на полированной поверхности образца при нагреве и растяжении. Способ позволяет сравнивать поведение металлов при одинаковых рабочих температурах и одинаковых степенях деформации или под воздействием одинаковых напряжений.

Этот способ состоит в том, что на полированной поверхности образца создают деформационный макрорельеф, подвергая образец растяжению, и затем его. При этом оценивают неоднородность пластической деформации, изменение формы и величины зерен в процессе деформации.

Преимущество данного способа перед другими – наглядность результатов исследования, а также возможность оценки характера (однородности или неоднородности) пластической деформации и изменений макроструктуры, связанных с фрагментацией зерен, степени

рекристаллизации при повышенных температурах и т.д. Изменение макрорельефа можно фиксировать как в процессе испытаний в установках, так и после снятия нагрузки (при этом необходимо учитывать возможность структурных или фазовых превращений при охлаждении образцов). Способ особенно эффективен при изучении крупнозернистых материалов.

7.4. Особенности пластической деформации и разрушения сварных соединений

Метод температурной микроскопии позволяет на одном образце одновременно исследовать поведение металла в трех зонах (зоны сварного шва, сплавления, термического влияния) при термосиловом воздействии и выявлять слабое звено, ответственное за разрушение. Этот метод позволяет осуществить быстрый нагрев и охлаждение образцов, поэтому можно имитировать термосиловое воздействие на металл в реальном процессе сварки. В методике исследования поведения сварных соединений методом температурной микроскопии выделяют два направления: исследование образцов, вырезанных из сварных соединений, и исследование образцов, подвергнутых термическому воздействию, имитирующему различные зоны сварного соединения.

Для создания структуры, имитирующей сварной шов конкретного изделия, необходимо выбрать параметры моделирования термических или термдеформационных циклов сварки, затем разработать для установки температурной микроскопии программу моделирования этих циклов с фиксацией прочностных и пластических характеристик, а также структурных изменений во взаимосвязи с заданными параметрами термосилового воздействия.

В установках температурной микроскопии есть нагревательное и нагружающее устройства, что позволяет моделировать различные реальные схемы технологических процессов. Практически все технологические процессы можно представить как ряд последовательных нагревов и охлаждений и одновременно температурно - силовых воздействий. С помощью высокотемпературного микроскопа можно одновременно непосредственно наблюдать за структурными изменениями, происходящими при моделировании, и фиксировать количественные параметры термдеформационного воздействия на изменение структуры и зарождение разрушения.

Особенности теплового режима сварки, а именно: высокая температура нагрева и высокие скорости нагрева и охлаждения определяют своеобразие перечисленных процессов в сварных соединениях.

Например, при сварке высокопрочных сталей с мартенситной и бейнитной структурами в процессе нагрева и охлаждения происходят следующие процессы:

- образование аустенита, формирование его зеренной структуры, изменение состояния границ и внутризеренной однородности по углероду и легирующим элементам;
- превращение аустенита при последующем охлаждении;
- формирование химической и структурной неоднородности в зоне сплавления.

Выбор параметров моделирования термдеформационных циклов сварки на установках температурной микроскопии

Известно, что процессы, происходящие в околошовной зоне, зависят от скорости нагрева, максимальной температуры нагрева и скорости охлаждения.

Для большинства способов сварки характерна почти линейная зависимость температуры нагрева от времени на восходящем участке кривой, поэтому данный процесс можно охарактеризовать одной величиной – скоростью нагрева. Максимальная температура нагрева – важная величина, которая определяет структурные изменения в металле. Максимальная температура нагрева имеет место в расплавленном металле шва. В зоне термического влияния она понижается, начиная от линии сплавления. Однако в опытах по моделированию термических циклов сварки принята несколько более низкая максимальная температура (конструктивные возможности установки).

Температурная кривая охлаждения имеет вид экспоненты. Моделировать такую зависимость трудно, поэтому стремятся выбрать один характерный интервал температур. Например, рассмотрим процесс охлаждения сталей. У большинства конструкционных свариваемых сталей фазовые превращения происходят в интервале 800 - 500°C, что предопределяет выбор данного интервала. У высоколегированных сталей фазовые превращения происходят при пониженной температуре 500°C - 300°C, поэтому в этом случае правомерно исследовать интервал охлаждения 800°C - 150°C в качестве критерия, который полностью характеризует процесс их охлаждения).

В околошовной зоне при охлаждении для сталей предлагается несколько температурных интервалов для контроля структурных превращений (например, в околошовной зоне бейнитных и мартенситных сталей при многопроходной сварке аустенитными материалами:

в интервале $T_{\max} - 800^{\circ}\text{C}$ – возможны подрастания аустенитного зерна и гомогенизация;

в интервале 800–500°C – при многопроходной сварке возможен процесс перераспределения углерода;

интервал бейнитного превращения 500–300°C;

интервал мартенситного превращения 300 - 100°C.

Деформационный цикл сварки возникает вследствие термического воздействия. Под влиянием теплового расширения в зоне сварного соединения появляются переменные напряжения, величина и характер которых зависят от жесткости закрепления свариваемого узла. При сварке плавлением упругопластические деформации возникают на начальных этапах охлаждения и по мере охлаждения непрерывно меняются как по величине, так и по знаку. Развитие упругопластических деформаций заканчивается формированием поля остаточных напряжений после полного охлаждения сварного соединения. Условия нагружения в установках предусматривают или поэтапное приложение нагрузки, или непосредственное нагружение от точки аустенитного превращения A_{c3} до комнатной температуры.

Целесообразно наложение термического цикла сварки на жестко закрепленный образец с возможностью мгновенного снятия жесткого закрепления и активного растяжения образца в любой заданный момент термического цикла.

Методика автоматического моделирования термдеформационных циклов сварки на установках температурной микроскопии в условиях растягивающих напряжений

Автоматическое моделирование термдеформационных циклов сварки проводят с использованием установки температурной микроскопии, оснащенной блоком автоматического управления параметрами термдеформационных циклов и системой дозированного спрейерного охлаждения образца защитным газом. При автоматическом моделировании можно воспроизводить термдеформационное воздействие сварки на металл образца-имитатора с одновременным наблюдением, фото- и киносъемкой микроструктурных изменений в металле. Анализ термического и деформационного воздействий на структуру и свойства металла образца-имитатора основан на интерпретации зависимостей $T = f(\tau)$ и $\sigma = f(\tau)$.

Образцы - имитаторы типа II, на одной стороне которых изготавливают микрошлиф, подвергают термдеформационному воздействию и затем детально исследуют.

Моделирование термдеформационных циклов сварки, например, для стали, проводят по следующим параметрам:

для нагрева образцов-имитаторов

максимальная температура нагрева $T_{\max} = 1400^{\circ}\text{C}$;

скорость нагрева $W_n = 50 - 150^{\circ}\text{C}$;

среда нагрева – защитный газ (аргон);

для охлаждения образцов-имитаторов

Интервал температур, °C	Скорость охлаждения, °C/с
$1400 \geq T \geq 800$	50 - 100
$800 \geq T \geq 500$	3 - 30
$500 \geq T \geq 300$	1 - 15
$300 \geq T \geq 100$	0,5 - 2

где охлаждающая среда – защитный газ.

Необходимую скорость охлаждения получают, варьируя условия охлаждения. (см. таб.7.3)

Таблица 7.3 Зависимость скорости охлаждения от условий охлаждения

Скорость охлаждения (°C/с) в интервале 450 - 550°C	Условия охлаждения
7	Без дополнительного охлаждения
20	Охлаждение жидким азотом через хладопровод
50	Охлаждение жидким азотом с принудительным напором

Деформирование образцов-имитаторов осуществляют по следующим режимам:

интервал температур деформирования 20°C - 1200°C;

скорость деформирования $v_{\text{деф}}$ 0,02 мм/ч - 0,05 мм/с;

максимальное напряжение разрушения σ_{max} при приложении постоянной нагрузки 100 - 300 МПа.

Для определения фактических параметров моделируемых термодформационных циклов сварки проводят обработку записей измерения температуры образца в процессе термодформационного цикла (рис.7.7).

Определяют длительность нагрева (τ_n) и охлаждения ($\tau_{\text{охл}}$) образца по формулам

$$\tau_n = \Delta l_n / v_d; \tau_{\text{охл}} = \Delta l_0 / v_d,$$

где l_n – отрезок между точками 0 и A, мм; Δl отрезок между точками B₁ и C₁, мм; v_d – скорость движения диаграммной ленты, мм/с.

Скорости нагрева и охлаждения находят по формулам

$$W_n = \Delta T_n / \tau_n; W = \Delta T_0 / \tau_0$$

(в настоящее время такую обработку записей целесообразно проводить с помощью компьютерных программ), где ΔT_n – разность температур между конечной и начальной температурами нагрева, °C; τ_n – длительность нагрева, с; $\tau_{\text{охл}}$ – длительность охлаждения, с.

Обработку диаграммы нагрузок и деформаций проводят в такой (рис.7.8) последовательности: для определения скорости деформирования $v_{\text{деф}}$ из точки A, соответствующей $P=P_{\text{max}}$, опускают перпендикуляр AB на ось абсолютных деформаций, измеряют расстояние l_{τ_n} между точками 0 и B и находят значение абсолютной деформации Δl_{τ_n} в момент деформирования по формуле

$$\Delta l_{\tau_n} = Ml / l_{\tau_n},$$

где Ml масштаб оси абсолютных деформаций, мм/мм; l_{τ_n} – расстояние между точками 0 и B, мм.

Затем определяют скорость деформирования

$$v_{\text{деф}} = \Delta l_{\tau_n} / \tau_n,$$

где τ_n длительность деформирования, с.

Находят значение осевой растягивающей нагрузки в момент i по формуле

$$P_i = M_p / P_{\tau_i},$$

где M_p – масштаб оси нагрузок; P_{τ_i} – отрезок по оси нагрузок между точками 0 и P_{τ_i} , мм.

Определяют напряжение $\sigma_{\tau i}$ в момент i по формуле

$$\sigma_{\tau i} = P_{\tau i} / F_0,$$

где $P_{\tau i}$ – осевая растягивающая нагрузка в момент деформирования i ; F_0 – начальная площадь образца, мм².

Далее строят совмещенные графики $\sigma = f(\tau)$ и $T = f(\tau)$ с общей осью τ .

7.5 Сочетание метода температурной металлографии с другими методами исследования структуры металлов

Для более полной информации о строении металлов целесообразно метод температурной микроскопии совмещать с другими методами. Этот метод может быть использован для количественного металлографического анализа с применением автоматических анализаторов изображений. При этом можно резко повысить результативность исследований, устанавливая количественные корреляции между структурой металла и механизмами его деформации и разрушения.

При количественном анализе оценивают накопление деформационных повреждений (например, подсчитывая общее число линий скольжения и их число на единице площади), изучают процессы зарождения и развития трещин (например, проводят измерение длины трещины во времени и площади зоны пластической деформации в вершине трещины), оценивают изменение геометрии структурных составляющих (например, площади зерен, протяженности их границ, размеров включений) и т.д.

Характерным признаком протекания пластической деформации, которая в определенных условиях может приводить к возникновению зародышевых микротрещин, является возникновение на поверхности образца полос скольжения. Эти полосы состоят из различного числа линий скольжения, которые представляют следы перемещения кристаллографических плоскостей.

Однако оптические методы микроскопии не позволяют исследовать строение полос скольжения и выявлять в них зародышевые микротрещины, возникающие на ранних стадиях пластической деформации. Для этого необходимо использовать электронно-микроскопические методы (ПЭМ и РЭМ). На РЭМ с помощью реплик исследуют деформационный рельеф поверхности образца, на ПЭМ – с помощью фольг с поперечного сечения образца (с фиксированной величиной микропластической деформации) исследуют изменение тонкой структуры металла в условиях термдеформационного воздействия. В последнее время созданы установки, совмещающие методические возможности РЭМ и температурной микроскопии.

При изучении деформационных микрорельефов нередко возникает необходимость исследовать химический и фазовый составы определенных участков образца, в том числе строение и химический состав включений, влияющих на процесс разрушения. Для этого применяют физические методы анализа микроколичеств вещества, отличающиеся высокой локальностью, позволяющие получать информацию о составе тончайших поверхностных слоев, а также микрообъемов на поверхности образцов.

К таким методам относятся рентгеноспектральный микроанализ (РСМА); Оже-электронная спектроскопия (ОЭС); масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ); электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА); лазерный спектральный микроанализ (ЛСМА). Характеристики перечисленных методов микроанализа, их методические возможности и чувствительность приведены в гл. 8.

Итак, используя метод температурной микроскопии, можно выявить скрытые ресурсы прочности и пластичности материала путем выбора рациональных технологий производства изделий. Применение этого метода позволяет расширить возможности традиционных металлографических и фрактографических методов исследований и дополнительно определять:

- микроочаги зарождения разрушения;

- уровень напряжений в условиях заданных температур, при которых происходит зарождение трещин;
- кинетику распространения трещин и их взаимодействие с элементами структуры, ускоряющими или тормозящими развитие трещин.

ГЛАВА 8

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель данной главы дать общие краткие представления об основных современных физических методах исследования, которые могут быть полезны и необходимы для оценки качества металлов и природы их разрушения. Приведены технические характеристики этих методов.

Подробно сведения об аппаратуре и методиках проведения исследований металлов (учитывая их сложность и необходимость специалистов высокой квалификации) описаны в специальной литературе, список которой приведен в конце книги.

При изучении качества металлов и природы их разрушения часто имеется необходимость исследовать ее химический и фазовый состав, атомно-кристаллическое строение, вид и степень искаженности кристаллической решетки, размеров кристаллов, текстуры деформации и т.д. в том числе строение и химический состав включений, влияющих на процесс разрушения. Эти включения могут представлять пленочные прослойки толщиной в несколько атомных слоев или быть точечными размером от долей микрометра. Традиционные методы определения химического состава (макрометоды) в этом случае неэффективны. В настоящее время для этих целей применяют физические методы анализа микроколичеств вещества, отличающиеся высокой локальностью, позволяющие получать информацию о составе тончайших поверхностных слоев, а также микрообъектов на поверхности разрушения.

Ниже рассмотрены методы микроанализа, достаточно надежные при проведении экспериментов и интерпретации результатов, в том числе при исследовании природы разрушения металлов: рентгеноспектральный микроанализ (РСМА); Оже-электронная спектроскопия (ОЭС); Оптический эмиссионный спектральный микроанализ (ОЭСМА); масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ); электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА); лазерный спектральный микроанализ (ЛСМА); Ядерный гамма-резонанс (ЯГР).

По эффективности применения для решения наиболее часто встречающихся практических задач методы микроанализа можно разделить на две группы:

Методы ЭСХА, МСВИ позволяют проводить интегральное измерение химического состава тонких поверхностных слоев изломов (определяющим является разрешающая способность по глубине и чувствительность анализа). Методы этой группы особенно эффективны при изучении поверхностей разрушения, образование которых связано с наличием в материале тонких пленочных выделений, зерно - граничных прослоек и других элементов строения изломов, имеющих большую площадь при незначительной толщине, что затрудняет их идентификацию при использовании световой или электронной микроскопии. Особенность этих методов - повышенные требования к чистоте поверхности образцов.

Методы РСМА, ОЭС, ЛСМА позволяют определять химический состав микроколичеств материала в точечном объеме (определяющим является локальность по площади, возможность проведения анализа на заданном участке поверхности и локальная чувствительность анализа). Методы этой группы особенно эффективны при исследовании включений, с размерами в несколько микрометров.

В последнее время для изучения атомно - кристаллической структуры и фазового состава поверхности разрушения успешно применяют метод ядерного гамма - резонанса (ЯГР). В отличие от других физических методов исследования этот метод позволяет проводить фазовый анализ поверхности с развитым рельефом, исследовать структуру в поверхностных слоях толщиной менее 1 мкм и изучать структурные и концентрационные неоднородности на атомарном уровне.

Сравнительные характеристики перечисленных методов микроанализа приведены в табл. 8.1

ТАБЛИЦА 8.1 Сравнение характеристик физических методов микроанализа химического состава.

Методы	Атомный номер определяемых элементов	Локальность		Чувствительность анализа, %	Точность анализа, %	Возможность повторного анализа микрообъектов
		По глубине	По площади			
ОЭС	>2	1 нм	20 мкм ²	$10^{-1}-10^{-2}$	5 - 10	+
ЭСХА	>2	1 нм	3 мм ²	$1-10^{-2}$	5 - 10	+
МСВИ	Все	1 нм	1 мм ²	$10^{-2}-10^{-8}$	5 - 10	-
ЛСМА	>2	5 мкм	100 мкм ²	$10^{-1}-10^{-3}$	-	-
РСМА	>4	5 мкм	1 мкм ²	$10^{-2}-10^{-3}$	2 - 5	+

8.1 Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА)

Метод РСМА основан на регистрации рентгеновскими спектрометрами характеристического рентгеновского излучения, возбужденного пучком электронов и сфокусированного на образце в пятно диаметром ~ 1 мкм. По длине волны и интенсивности характеристического рентгеновского излучения, отнесенной к интенсивности эталона, определяют присутствие любых элементов в исследуемом микрообъекте и их концентрацию.

Рентгеновские спектрограммы фиксируются как спектрометром волновой дисперсии (для элементов начиная с бора), так и энергетическими спектрометрами (для элементов, начиная с натрия). Энергетические спектрометры позволяют получать энергетический спектр одновременно нескольких элементов, что существенно сокращает время проведения качественного анализа. Локальность РСМА определяется главным образом диаметром зонда на образце и при анализе сталей для монолитных образцов не должна быть больше 1 -2 мкм.

Методом РСМА определяют химический состав микрообластей на микрошлифе или изломе, что очень важно при изучении распределения компонентов и примесей на отдельных микроучастках сталей (дендритной ликвации, микросегрегаций, при идентификации отдельных включений и фазовых составляющих, пленок на границах зерен и др.).

Анализ химического состава методом РСМА проводят по точкам путем сканирования вдоль выбранной прямой или по площади участка микрошлифа, а также излома.

Точечным анализом возможно проводить количественные измерения для каждого определяемого элемента с точностью, зависящей от номера элемента, его объемного содержания и влияния остальных элементов.

При непрерывном анализе вдоль выбранной прямой получают полуколичественные сведения об изменениях концентрации элементов. Анализ по площади позволяет дифференцировать фазы по химическому составу, что особенно важно в тех случаях, когда они имеют одинаковую отражательную способность, и это затрудняет их идентификацию с помощью световых микроскопов, а также не позволяет использовать методы количественной микроскопии.

Кроме того, анализ по площади дает наглядное качественное представление о распределении элементов (например, легирующих) на выбранном участке размерами от 30 до 400 мкм².

Качественный анализ позволяет приблизительно судить о составе разных участков сложных включений, выделений по границам зерен и т. д.

Малые количества элементов (например, примеси) методом РСМА обнаружить нельзя, так как при сканировании продолжительность регистрации в каждой точке невелика, что значительно снижает чувствительность определения анализируемых элементов в стали. Эта чувствительность составляет для алюминия, фосфора и серы 0,002 %, для кремния 0,003 % и кальция 0,0007 %.

Количественный РСМА можно проводить при размерах частиц включений более 5 мкм. Чувствительность метода зависит от отношения интенсивности сигнала, получаемого при

регистрации излучения чистого элемента, и интенсивности фона и составляет сотые доли процента для элементов с $Z \geq 11$; для легких элементов (В, С, N, О) чувствительность анализа снижается до 1 %.

Локальная чувствительность, т. е. абсолютная массовая чувствительность, отнесенная к единичному определению в микрообъеме, различна для каждого вещества и может достигать $4 \cdot 10^{-14}$ г для тяжелых элементов.

Точность количественного РСМА для большинства элементов, за исключением легких ($Z < 11$), обычно равна 2 - 5 % при исследовании на шлифе и снижается до 20 - 30 % - при исследовании на изломе.

При использовании метода РСМА на исследуемом участке излома высота шероховатостей не должна превышать 0,15 мкм, в противном случае резко возрастает ошибка измерения. Для уменьшения ошибки образцы рекомендуются осторожно послойно стачивать механическим путем.

Методом РСМА возможно проводить повторные анализы на одном и том же микроучастке излома. Следует отметить, высокие требования к качеству подготовки образцов и эталонов и большую методическую сложность анализа и обработки полученных результатов.

8.2. Оже – электронная спектроскопия (ОЭС)

Суть метода состоит в том, что поверхность материала облучают пучком электронов определенной энергии, под влиянием которого происходит возбуждение атомов исследуемого вещества, в результате они начинают испускать вторичные Оже-электроны. Эти электроны регистрируют с помощью спектрометра. Оже-электроны являются характеристическими; их энергию для каждого исследуемого элемента и, следовательно, химический состав исследуемого объекта определяют по пикам энергетического спектра.

Энергия Оже-электронов невелика, поэтому они интенсивно поглощаются исследуемым материалом, и только Оже-электроны, испускаемые атомами поверхностных слоев образца (до глубины порядка 10 атомных слоев), регистрируют спектрометром. Это определяет эффективность применения метода ОЭС для определения химического состава поверхности металлических материалов. Кроме того, малый диаметр первичного пучка электронов обеспечивает локальность метода по площади от 5 до 50 мкм². Метод легко совмещается с растровой электронной микроскопией, что дает возможность непосредственно в процессе изучения морфологии поверхности разрушения проводить прицельный химический микроанализ элементов излома.

Метод отличается высокой чувствительностью при проведении химического анализа поверхностных слоев толщиной до 2-3 нм и быстротой проведения анализа. С его помощью можно обнаружить все химические элементы, кроме водорода и гелия. Метод особенно эффективен при определении в сталях неметаллических включений, содержащих серу (чувствительность при анализе серы достигает 10^{-4} %), и примесей сурьмы и мышьяка.

Следует отметить затрудненность проведения количественного анализа методом ОЭС и необходимость получения излома непосредственно в камере прибора. Кроме того, интерпретация Оже-спектров при сложном химическом составе анализируемого вещества сложна и не всегда однозначна, что ограничивает возможности применения метода для анализа сложнолегированных сталей.

8.3 Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА)

Суть метода ЭСХА заключается в том, что с поверхности металла под воздействием рентгеновского излучения эмитируются фотоэлектроны, фиксируемые на энергетическом спектре. Эмитируемые фотоэлектроны являются характеристическими, и по их энергетическим пикам определяют химический состав исследуемого объекта (поверхностные слои толщиной от 1 до 3 нм). Методу ЭСХА, как и методу ОЭС, присуща довольно сильная зависимость

характеристического спектра анализируемых элементов от общего химического состава исследуемых образцов, что затрудняет расшифровку спектров. Анализ особенностей получаемых спектров дает дополнительную информацию о типе химических связей и электронной структуре анализируемых объектов.

Локальность метода ЭСХА по площади невелика, и фиксируемый результат является интегральным для площади от 3 до 100 мм². Этим методом анализа можно определить все химические элементы, кроме водорода и гелия. Метод эффективен при исследовании поверхностных слоев или сверхтонких пленок (до 2,5 - 3 нм). Кроме того, им возможно проводить повторные анализы одного и того же исследуемого участка излома.

Следует отметить невысокую чувствительность метода (от 1 до 10⁻² %), малую локальность по площади, а также необходимость получения излома непосредственно в камере прибора.

8.4 Масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ)

Суть метода заключается в бомбардировке поверхности твердого тела пучком ускоренных ионов. При этом происходит распыление атомов исследуемого вещества в ионизированном состоянии. Наличие заряда у ионов позволяет эффективно собирать и фокусировать их электрическими методами, а различие в величине массы ионов обеспечивает получение информации о химическом составе исследуемого объекта по фиксируемому масс-спектру (пики на масс-спектре определяются отношением массы иона к его заряду). Для исследования поверхности металлических материалов применяют только масс-спектрометры с источником распыления в виде пучка первичных ионов.

Метод основан на анализе продуктов распыления, которые соответствуют исходному составу объектов исследования, характеризуется исключительно высокой относительной и абсолютной чувствительностью и широким диапазоном анализируемых свойств, что делает его перспективным для многих задач фрактографических исследований, когда другие методы малоэффективны.

Особенно эффективен метод МСВИ для контроля химического состава ближайших к поверхности атомных слоев. Его рекомендуется применять, например, для анализа химического состава зернограницных выделений на поверхности разрушения.

Преимущество метода МСВИ - прежде всего возможность послойного анализа образца с использованием ионного травления. Зондирование по толщине слоя и формирование полезного сигнала осуществляется в одном процессе, режимом которого легко управлять. Физический предел послойного разрешения составляет 1 нм.

Применение метода МСВИ ограничивается сложностью и высокой стоимостью масс-спектрометрического оборудования.

Недостаток метода - повреждение поверхности излома при анализе и сложность количественного анализа, малая локальность анализа по площади.

8.5. Оптический эмиссионный спектральный микроанализ (ОЭСМА)

Метод основан на возбуждении атомов исследуемого вещества подводимой извне энергией. Возникшие спектры излучения регистрируются с помощью оптической спектрометрической аппаратуры и производится замер их относительной интенсивности для проведения количественного и полуколичественного анализа.

Наиболее широко применяется для химического микроанализа металлических образцов метод искрового спектрального микроанализа. Он основан на возбуждении искрового разряда между электродом и поверхностью исследуемого образца; в результате происходит испарение исследуемого материала и испускание возбужденными атомами оптического излучения. В литературе описано много способов локализации искры на исследуемом участке поверхности разрушения, однако из-за ее шероховатости такая локализация затруднена, что ограничивает возможность применения этого метода в случае изломов с сильно развитой шероховатостью.

В последнее время интенсивно развивается метод лазерного спектрального микроанализа, при котором на поверхности исследуемого объекта фокусируется лазерный луч, атомизирующий и возбуждающий микрообъем исследуемого вещества; спектр излучения этого микрообъема фиксируется с помощью спектрометрической аппаратуры. Лазерное излучение характеризуется чрезвычайно высокой концентрацией энергии. Часть энергии лазерного луча отражается поверхностью исследуемого материала, оставшаяся часть энергии поглощается материалом. Локальность методов ОЭСМА определяется площадью поверхности на образце, которая испаряется под воздействием искрового разряда или лазерного луча.

Искровой спектральный микроанализ дает информацию о химическом составе участков образца диаметром 50 мкм и более, лазерный эмиссионный спектральный - 10 мкм и более.

Масса вещества, расходуемого при химическом анализе с помощью методов ОЭСМА, составляет 10^{-3} - 10^{-6} г. С помощью этих методов определяют элементы начиная с Be ($Z > 2$). Чувствительность анализа для большинства элементов, содержащихся в сталях, составляет 10^{-1} - 10^{-3} %.

Одним из определяющих факторов в методах ОЭСМА является минимальная масса вещества, используемого при анализе, поэтому указанные методы могут быть охарактеризованы локальной чувствительностью, которая составляет 10^{-8} - 10^{-10} г для большинства анализируемых элементов.

Методы ОЭСМА по сравнению с другими методами химического микроанализа отличаются быстротой анализа, отсутствием специальных требований к подготовке исследуемой поверхности. В то же время следует отметить недостаточную локальность методов по площади и глубине исследуемых объектов, а также повреждаемость поверхности в процессе исследования и, следовательно, невозможность повторного анализа того же участка излома. Для искрового спектрального микроанализа можно использовать призменные и дифракционные спектрографы, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью.

Лазерный спектральный микроанализ изломов более перспективен, чем искровой, так как обладает более высокой локальностью по площади и возможностью анализа изломов, имеющих шероховатую поверхность. Однако при использовании этого метода возникают затруднения при количественном анализе, связанные с отсутствием гомогенных эталонов, а также повреждаемость поверхности образца, что исключает проведение повторного анализа.

При исследовании включений, выявляемых в изломе, весьма эффективным может оказаться применение метода электроразрядного микроанализа с предварительным отбором пробы.

Суть метода - сжигание микроколичеств вещества на кончиках электродов электроразрядной установки, помещенных в специальную вакуумную камеру, регистрации полученных спектрограмм и их фотометрировании. Метод позволяет определять химический состав микроколичеств исследуемого материала. Локальная чувствительность этого метода для большинства элементов Периодической системы Д. И. Менделеева находится в области 10^{-10} - 10^{-12} г.

Электроразрядный спектральный микроанализ дает информацию о химическом составе отдельных частиц размером от 0,01 мм и массой порядка 10^{-6} г. В таких малых количествах анализируемого вещества можно определить примеси в количествах 10^{-2} - 10^{-3} %.

Основное преимущество этого метода - высокая локальная чувствительность при минимальной пробе вещества. Для фрактографических целей этот метод особенно удобен, так как позволяет определять химический состав таких малых объемов, которые обнаруживаются только с помощью оптических микроскопов. Метод целесообразно применять при определении химического состава точечных объектов. Такими объектами в зоне разрушения металла бывают неметаллические включения, карбиды и т. д., которые обнажаются на поверхности излома и становятся доступными для анализа. Хрупкие и мелкие частицы вдавливанием электродов непосредственно в исследуемую поверхность могут быть перенесены на кончики медных или алюминиевых электродов. Сжигание этих частиц на кончиках электродов позволяет получить информацию об их составе.

Существует другой способ выделения частиц с поверхности излома методом электролиза в капле электролита, нанесенной на поверхность образца. При этом образец служит анодом, а

угольный или платиновый электрод вводимый в каплю - катодом. Анализировать в этом случае можно и электролит, и осадок, оставшийся на поверхности образца.

8.6 Ядерный гамма-резонанс (ЯГР)

Метод эффективен для исследования поверхности разрушения массивных образцов. При использовании его поверхность образца облучается направленным пучком γ - квантов, испускаемых радиоактивным источником ^{57}Co в так называемом режиме рассеяния. Возникающие при этом рентгеновское излучение и γ - кванты регистрируются сцинтилляционным спектрометром, электронное излучение - резонансным детектором. С помощью рентгеновского излучения и γ - квантов получают информацию о поверхностных слоях толщиной до 1 мкм, а с помощью электронного излучения - толщиной до 0,1 мкм.

Таким образом можно определять градиент структурных составляющих по толщине поверхностного слоя. С помощью получаемых спектров можно изучать фазовый состав, исследовать тонкую кристаллическую структуру и особенности перераспределения легирующих элементов в твердом растворе.

При изучении фазового состава поверхности разрушения стали можно определять состав и количество железосодержащих фаз, таких, как мартенсит, аустенит, цементит, оксидные соединения железа, карбиды, нитриды и т. д. Чувствительность и точность фазового анализа зависят от конкретного состава исследуемого образца. Например, чувствительность определения остаточного аустенита в закаленных и низкоотпущенных сталях (не содержащих парамагнитных карбидов) составляет 0,5 %. Точность определения количества железосодержащих фаз составляет ориентировочно $\pm 10\%$.

Метод ядерного γ -резонанса отличается высокой разрешающей способностью, позволяющая не только определять состав фаз, но и исследовать тонкую кристаллическую структуру поверхностных слоев (толщиной менее 1 мкм). Определение областей структурных и концентрационных неоднородностей методом ЯГР возможно в слоях толщиной от 1 до 0,1 мкм, что при диаметре пучка от 20 до 50 мм позволяет анализировать общую площадь излома; при использовании мощных источников и увеличенной экспозиции возможно уменьшение диаметра пучка до 5 мм, что позволяет исследовать отдельные участки изломов.

8.7. Другие физические методы

8.7.1 Методы определения плотности

Определение плотности металла – один из методов предварительной оценки качества металлов.

Расчетный метод

Плотность определяют по формуле:

$$\rho = m/V$$

где: m - масса материала; V - его объем (г/см³ или кг/дм³).

Пикнометрический метод

Заключается в определении массы и объема жидкости, вытесненной из специального сосуда (пикнометра) погруженным в него исследуемым образцом. Точность определения этим методом : $5 - 10^{-5}$ г/см³;

Сначала исследуемый образец взвешивают на воздухе, затем в пикнометр заливают вспомогательную жидкость, нагревают до кипения для удаления газов и выдерживают в термостате до необходимой температуры (20 °С).

После извлечения пикнометра из термостата, протирки, сушки и достижения температуры окружающей среды его взвешивают.

Аналогичные операции проводят и с пикнометром с погруженным в него образцом. Плотность образца для температуры (t) определяют по формуле:

$$\rho = \frac{md_1-(m_2-m_1)\sigma}{m_1-(m_2-m_1)}$$

где: **d₁** -плотность вспомогательной жидкости при температуре (t); **σ** - плотность воздуха; **m** - масса образца в воздухе; **m₁** -масса пикнометра с вспомогательной жидкостью; **m₂** -масса пикнометра с образцом, погруженным в пикнометр

Флотационный метод

Подбирается жидкость с такой плотностью, которая сравнялась бы с плотностью помещенного в нее образца.

Метод используется для небольших образцов легких металлов. Для этого метода созданы специальные установки – градиентные колонки, в которых можно создать стабильный по высоте градиент плотности.

В такой колонне мерой плотности материала является высота, на которой он плавает в жидкости.

Для определения плотности образца надо взвесить его на воздухе и во вспомогательной жидкости.

Плотность определяется по формуле

$$\rho_t = \frac{m_1 d_1 m_2 \sigma}{m_1 - m_2}$$

где: **m₁** - масса образца в воздухе;; **m₂** - масса образца в жидкости при температуре (t)

Прецизионное определение плотности даже для изучения точечных дефектов структуры реального кристалла. Относительное изменение плотности, вызванное наличием избыточных вакансий, требует чувствительности измерения более 1: 10⁻⁴.

Рентгеновский метод

Точность рентгеновского метода выше точности других методов вследствие наличия в реальном кристаллическом материале пор и других макро- и микродефектов, снижающих плотность.

Различие в значениях плотности может дать информацию о несовершенствах кристаллической решетки. Примеси могут по разному воздействовать на плотность металла в зависимости от их атомного диаметра, атомной массы, типа твердых растворов (внедрения или замещения).

8.7.2 Рентгеноструктурный анализ

Рентгеноструктурным анализом определяют тип кристаллической решетки металлов и ее периоды, фазовый состав сплавов (смеси), наличие преимущественных кристаллографических ориентировок (текстур), ориентировку кристаллов, искажение кристаллической решетки, размеры кристаллов и блоков мозаики, изменение сил межатомной связи в кристаллической решетке.

Разработаны рентгеновские методы изучения дислокационной структуры моно- и поликристаллов.

При рентгеноструктурном анализе можно исследовать процессы, происходящие при закалке и отпуске металлов.

Рентгеноструктурным анализом пользуются для контроля и корректировки существующих технологических процессов, а также при создании новых технологических процессов и разработке новых материалов

Микродифракционный анализ

Микродифракционным анализом идентифицируют дисперсные фазы в металлической матрице (карбиды, нитриды, неметаллические включения и т.д.). Способ эффективен при малой объемной доле этих фаз в металле.; изучает особенности фазовых превращений (мартенситные превращения, распад пересыщенных твердых растворов), происходящих при термической обработке (закалка, отпуск).

Неметаллические включения этим методом, как правило, идентифицируются редко, так как они велики по размерам, что создает определенные методические трудности. Для их идентификации обычно используют методы рентгено-спектрального микроанализа (РЭМ совмещенный с РСМА). Этим методом успешно идентифицируют мелкодисперсные неметаллические включения .

8.7.3 Дилатометрический анализ

Дилатометрический анализ основан на изменении объема (длины образца) металла при нагреве. Это позволяет использовать дилатометрический метод для определения термических коэффициентов линейного расширения. Так как фазовые превращения связаны с изменением удельного объема металлов то, изучая изменения длины образца в процессе нагрева, охлаждения или изотермической выдержки, можно определить температуру и время начала и конца превращения, а также критические точки.

Критические точки в области превращения при дилатометрическом анализе определяют на приборах, фиксирующих расширение образца в зависимости от температуры, или разность расширения образца и эталона в зависимости от температуры.

В современных приборах – дилатометрах нагрев или охлаждение образца и эталона может происходить в инертной среде или вакууме в интервале температур от -196 °С до +1000 °С . Чувствительность метода – $0,6 \times 10^{-3} \%$.

Помимо определения коэффициента линейного расширения дилатометрический анализ позволяет исследовать явления в металлах, протекающие при изменении температуры и скорости ее изменения.

С помощью дилатометрического метода можно моделировать процессы превращения, происходящие при непрерывном нагреве или охлаждении.

8.8. Методы исследования металлических наноматериалов

К металлическим конструкционным наноматериалам относят материалы, с размерами элементов структуры порядка 100 нм и менее ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) с высокоугловой разориентировкой, т.е. с зеренной структурой с большеугловыми границами.

Методы исследования наноматериалов имеют много специфических особенностей, поэтому более подробные сведения о них приведены в соответствующей литературе. Цель данного раздела дать общие представления о методах исследования наноматериалов с использованием современного оборудования

При исследовании металлических наноматериалов применяются традиционные методы определения физико-механических свойств, а также элементов структуры

Размер структурных элементов в нанокристаллических материалах определяется способом его получения и химическим составом. Результаты многочисленных работ, посвященных изучению нано - кристаллических материалов, обобщены в ряде монографий.

Одним из важнейших вопросов диагностики таких материалов является определение размеров их структурных элементов (зерен, субзерен, отдельных частиц и др.). Эти размеры находят различными методами, в частности просвечивающей и высокоразрешающей растровой электронной микроскопией или рентгеноструктурным анализом.

Определение размеров кристаллитов в нано - кристаллических материалах проводят методами электронной микроскопии.

Прямой метод измерения и исследования структурных элементов – просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ).

Метод достаточно трудоемкий, поскольку требует изготовления образцов в виде тонких фольг (приблизительно толщиной 0,1 мкм). Этим способом возможно исследование нанокристаллических порошков. В этом случае при подготовке образцов для исследования необходимо предотвращать слипание частиц порошка.

Размеры частиц порошка и кристаллитов можно измерять по светлопольному или темнопольному изображению. При этом считается, что размер зерна, определенный по темнопольному изображению, немного меньше, чем размер, определенный по светлопольному изображению, так как в последнем случае завышение происходит в результате учета ширины границ. Методом ПЭМ также измеряют размеры и других структурных элементов, например, ячеек внутри зерна, разделенных достаточно широкими дислокационными границами, которые выявляются при электронно - микроскопическом исследовании, а электронной дифракцией определяют состав металлических наночастиц.

Определять размер структурных элементов возможно методами высокоразрешающей растровой электронной микроскопии (РЭМ). Современные высокоразрешающие растровые микроскопы обеспечивают разрешение на уровне нескольких единиц нанометров. При этом размер электронного зонда на поверхности образца должен составлять 1-2 нм, а изображение формироваться вторичными электронами. Контраст изображения обусловлен рельефом поверхности образца. Подготовка образцов для исследования в растровом микроскопе проще, чем в ПЭМ. Можно исследовать как «массивные» образцы в виде шлифов (лучше с протравленной поверхностью), так и порошки (предотвратив их слипание). Однако, при таком исследовании существуют проблемы интерпретации изображения, особенно в случае дисперсных нанокристаллов.

Методы ПЭМ и РЭМ позволяют определять распределение структурных элементов по размеру.

В последнее время для изучения наноматериалов используются сканирующие зондовые микроскопы.

Основные типы сканирующих микроскопов – туннельные и атомно - силовые.

Туннельный микроскоп позволяет исследовать поверхность на атомном уровне, но применяется для материалов, хорошо проводящих электрический ток.

Основой сканирующего туннельного микроскопа является очень острая игла, скользящая над исследуемой поверхностью (зазор между иглой и поверхностью составляет менее 1 нм). При этом вследствие туннельного эффекта между острием иглы и поверхностью образца возникает туннельный ток. Поддерживая ток и расстояние до образца постоянным при помощи следящей системы, зонд сканирует поверхность, перемещаясь над ней по осям x и y , опускаясь и поднимаясь в зависимости от ее рельефа. Информация об этом перемещении отслеживается компьютером и программно визуализируется, чтобы исследователь мог увидеть на экране объект с нужным разрешением.

Существуют два варианта конструкции СТМ в зависимости от режима сканирования образцов:

- в режиме постоянной высоты (острие иглы перемещается в горизонтальной плоскости над образцом, а ток туннелирования изменяется);
- в режиме постоянного тока путем автоматической подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью в каждой ее точке.

Атомно - силовые микроскопы (АСМ) позволяют исследовать поверхности с атомной точностью, но материалы можно исследовать любые, не обязательно электропроводящие.

Принципы действия СТМ и АСМ практически одинаковы, но работа АСМ основана на использовании сил межатомных связей. На малых расстояниях ($\sim 0,1$ нм) между атомами двух тел действуют силы отталкивания, а на больших – силы притяжения. В АСМ сканирование

поверхностей может производиться кантилевером (зондом), когда относительно неподвижного кантилевера движется сама подложка.

В настоящее время наиболее известны следующие виды сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ): туннельные зонды, атомно - силовые зонды, оптические зонды ближнего поля, электростатические силовые зонды и др.

Общая схема всех СЗМ практически одинакова, в состав СЗМ входит компьютер.

При исследовании наноматериалов используются методы спектроскопии. Этими методами определяют химический состав материалов, т.е. содержание в них атомов любых элементов.

Для конструирования новых наноматериалов перспективно использование специальных компьютерных программ моделирования этих материалов.

Приведем примеры нанотехнологических программ в таб. 8.2

Таблица 8.2 Примеры нанотехнологических программ

№	Тип моделирования	Примеры программ
1	Визуализационный	Ras Mol
2	Вычислительный	Chem 3D
3	Инженерный	Nano Xplorer

Первые программы показывают наноструктуры, но ничего не рассчитывают; вторые программы позволяют проектировать различные наноструктуры, используя методы математического моделирования;

третьи программы позволяют рассчитывать наносистемы, описывая их на молекулярном уровне, и определять основные физико-механические свойства.

Рентгеноструктурные измерения размера нанокристаллитов возможно из анализа уширения дифракционных линий. Этот метод наиболее прост в реализации, поэтому он используется во многих исследованиях. Но необходимо учитывать, что ширина дифракционных линий (НКЛ) зависит от среднего размера области когерентного рассеяния (ОКР) в направлении нормали к плоскости $(hkl) \langle D \rangle_{hkl}$. Усреднение величины $\langle D \rangle$ ведется по достаточно большой площади исследуемого образца ($\sim 1 \text{ см}^2$). В случае нанокристаллических материалов считают, что значение $\sqrt{\langle D \rangle_{KL}}$ равно размеру нанокристаллита, поскольку предполагается, что последний не «разбивается» на более дисперсные фрагменты и соответственно состоит из одной ОКР.

На уширение дифракционной линии (НКЛ) влияют микродеформация решетки $\langle \epsilon \rangle$, наличие дефектов решетки, инструментальные причины.

Одной из важнейших задач исследователя является выбор методики, которая позволяет наиболее адекватно описать структурное состояние материала.

Одна из рентгеновских методик определения среднего размера нанокристаллитов основана на методе Ритвельда.

Для измерения субмикрон неоднородностей нанокристаллитов может быть использован метод малоуглового рассеяния.

Для определения размеров нанокристаллитов используют следующие методы:

- физико-химические методы;
- измерение удельной площади поверхности частиц адсорбционным методом или с помощью седиментационного анализа, основанного на рассеянии частицами световых или рентгеновских лучей.

Для определения размеров структурных элементов и их разориентировок в наноматериалах также применяется метод обратно отраженных электронов (EBSD анализ).

Размеры структурных элементов, определенные методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа в наноматериалах зависят от особенностей их тонкого строения и используемых методик. Поэтому на современном уровне методического развития для количественного определения размерных характеристик наноматериалов целесообразно комплексное исследование с применением различных методов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Методы исследования неметаллических включений в стали

Металлографические методы

Металлографические методы дают возможность сравнительно быстро и просто оценить загрязненность стали неметаллическими включениями.

Методы качественного микроструктурного анализа основаны на металлографическом исследовании неметаллических включений по их характерным признакам и свойствам.

Вырезка образцов для исследования проводится по ГОСТ 1778-70.

Исследования проводятся на микрошлифах. Изготовление микрошлифов необходимо производить самым тщательным образом, иначе абразивные частицы могут остаться на шлифе и завуалировать истинную картину. Перед просмотром на микроскопе в связи с этим микрошлифы обязательно промываются спиртом. Если на шлифе наблюдаются много пустот от выкрашившихся включений («хвостов»), его необходимо заново перешлифовать.

Включения, получающиеся в результате заполнения пустот или трещин абразивными материалами или из-за намазывания материалов на поверхность шлифа, не имеют резко очерченных границ, неплотно прилегают к металлу, часто оставляют «хвосты». В случае их обнаружения шлиф также следует изготовить заново.

Таблица п1.1 Травящие растворы для выявления основных неметаллических включений

Условия, метод травления	Сульфиды	Оксиды
Нетравленный полированный образец	(Mn, Fe)S - серовато-голубой цвет, темнеющий при увеличении содержания Mn; поверхность ровная	Al ₂ O ₃ - мельчайшие резко очерченные зерна; никогда не вытягиваются при прокатке
1 ч. серной кислоты (1,84)+50 ч. H ₂ O. Лучший способ применения посредством капилляра под микроскопом	Пузырьки H ₂ S	Пузырьков нет
Хромовая кислота, 10 %- ный водный раствор, травить 10 мин	-	Не действует
Плавиковая кислота, 20 %- ный водный раствор, травить 10 мин	(Mn, Fe)S травится, темнеют.	Не действует
Пикриновая кислота, 1 %- ный раствор или органические кислоты, например, уксусная, лимонная, щавелевая и винно- каменная. При растворении в спирте травление в пять раз более медленное	(Mn, Fe)S только слабое потемнение в течение 45 с	Не действует
Нейтральный пикрат натрия	Темнеют	Не действует
Щелочной пикрат натрия, кипятить не более 10 мин	Темнеют	Не действует
Водород при 600 °С	Не действует	-
Водород катодный (2 г NaOH+ + 1000 см ³ H ₂ O)	Не действует	-
Водяной пар при 600 °С	Не действует	-
Разбавленный спиртовой раствор хлорного железа после восстановления водородным газом или катодным водородом и последующей шлифовки	(Fe, Mn)S - яркое окрашивание	-
3 %-ное азотнокислое серебро, легкая полировка (действует подобно солям ртути и золота)	(Mn, Fe), S не действует	-
Соли сурьмы (соединение солей виннокалиевой и винносурьмяной)	Желто-красный кружок	Окрашивания нет
Соли свинца	Черный кружок	Окрашивания нет
Кадмиевая соль	Светло-желтый кружок	Окрашивания нет
Соли серебра	Черный маленький кружок	Окрашивания нет
Примечание Нитрид титана – желтые округлые зерна. Цианонитрид титана – ярко - розовые кубические кристаллы.		

Метод качественного анализа позволяет получить достаточно полную характеристику вида и свойств неметаллических включений.

В светлом поле микроскопа определяют:

- общую картину расположения неметаллических включений при малых увеличениях (100-200 крат), а также мельчайшие подробности строения отдельных включений, их окраску, отражательную способность при больших увеличениях (400-1000 крат и свыше 1000 крат).

В темном поле микроскопа исследуют:

- мелкие неметаллические включения (до 0,010 мкм);
- рельефы поверхности включений;
- собственный цвет включений (внутреннюю окраску);
- строение прозрачных и полупрозрачных включений.

Исследования в поляризованном свете позволяют определить степень прозрачности и анизотропности включений.

Кроме того, проводят определение твердости включений и их химического состава. При измерении твердости (прибор ПМТ) отмечают качественные характеристики для включений малых размеров.

При воздействии химических реактивов неметаллические включения вытравливаются, растворяются, оставляя пустоты, окрашиваются, изменяя цвет, или остаются неизменными (табл. п1.1).

Характерные признаки и свойства неметаллических включений, наиболее часто встречающихся в стали, приведены в табл. п.1.3-п1.9.

По величине различают включения: очень крупные, крупные, средней величины, мелкие, очень мелкие.

Внешняя форма включений может быть следующей: правильная геометрическая (глобули, прямоугольники, треугольники); неправильная (овальная, многоугольники с искривленными сторонами); вытянутая (в виде веретена, нитей, пленки по границам зерен), обволакивание других включений.

Расположение включений бывает общее, равномерное или неравномерное по всему шлифу и взаимное, в виде отдельных включений, группами, цепочкой, одно внутри другого.

По виду строения различают включения однородные и сложные.

По степени прозрачности неметаллические включения подразделяют на прозрачные (к ним относятся прозрачные и полупрозрачные) и непрозрачные. У прозрачных и непрозрачных (в тонких слоях) включений различают свой собственный и поверхностный цвет. Собственный цвет для данного вида включений строго постоянен. Поверхностный цвет может изменяться в зависимости от состояния поверхности и качества полировки металлографического шлифа, от выбранного для исследования объектива и степени увеличения.

Различают анизотропные включения, изменяющие цвет при вращении предметного столика и изотропные, не изменяющие цвета при этом. По силе эффекта анизотропии включения делят на сильно анизотропные и слабо анизотропные. У глобулярных прозрачных включений, таких как глобулярный кремнезем, прозрачные силикаты, в поляризованном свете наблюдают явления темного креста и темных концентрических кругов.

Отражательная способность неметаллических включений может быть высокой (включение близко по своему блеску к металлу и почти сливается с ним), низкой (включение на фоне металла кажется темным) и средней (промежуточной между двумя первыми).

По способности противостоять пластической деформации неметаллические включения бывают пластичные, вытягивающиеся вдоль направления деформации, причем тем сильнее, чем пластичнее, и твердые, непластичные, не изменяющие своей формы при деформации. Твердые включения могут быть хрупкими и выкрашиваться. По степени выкрашивания неметаллических включений определяют их хорошую или плохую полируемость.

Характеристики деформируемости включений определяют по отношению протяженности отдельных включений или групп включений (строчек) к их поперечному сечению в продольной

плоскости (в направлении прокатки). Для деформируемых включений загрязненность металла характеризуют суммарной протяженностью их включений, вытянутых в направлении деформирования.

Первым этапом исследования включений является их качественное распознавание. Нетравленный микрошлиф просматривают на оптическом микроскопе и, используя некоторые частные признаки включений, определяют основные типы включений. К частным признакам относят форму, размеры, цвет, твердость включений.

Форма включений является одним из основных опознавательных признаков включений. Так, шпинели и нитриды всегда наблюдаются в виде кристаллов правильной геометрической формы и имеют на изображении вид треугольников, прямоугольников, трапеций. Силикаты (стекла) в большинстве случаев имеют глобулярную форму. При горячей пластической деформации форма этих включений может существенно измениться. Включения, обладающие хорошей пластичностью, вытягиваются вместе с металлом в направлении обработки, принимая форму непрерывных нитей. К таким включениям относятся сульфиды, закись железа, силикаты с высоким содержанием закиси железа и закиси марганца, оксисульфиды. При недостаточной пластичности включения деформируются в меньшей степени, частично надламываются и частично принимают прерывистые очертания, например, силикатные стекла с повышенным содержанием кремнезема. Твердые включения небольших размеров в процессе деформации обычно сохраняют свою первоначальную форму (глинозем, нитриды, карбонитриды титана).

Цвет включений определяется их отражательной способностью. В светлом поле наиболее темными выглядят включения, слабо отражающие свет, например, силикатные стекла, кварц, наиболее светлыми – нитриды титана. Собственный цвет включений предпочтительнее определять при наблюдении в темном поле, когда устраняются отраженные от поверхности лучи.

Степень прозрачности включений лучше всего определять при наблюдении в темном поле и в поляризованном свете при скрещенных николях.

При исследовании включений в светлом поле зрения используют увеличения 100-150 крат. При этих увеличениях отмечают общее количество включений, отдельные встречающиеся виды включений, их форму, цвет, расположение по отношению ко всему сечению, взаимное расположение (группами, цепочкой, изолированно). Затем переходят к изучению видов обнаруженных включений при увеличениях 400-600 крат, подробно изучая характерные признаки и индивидуальное строение отдельных включений.

При исследовании в поляризованном свете и темном поле определяют прозрачность и наличие собственного цвета включений.

Целесообразно определять включения по приведенной схеме (рис.1.П), постепенно исключая группы включений, объединенные одинаковыми признаками. Ею можно пользоваться, только изучив характерные признаки основных видов включений.

В основу схемы положено разделение включений по их прозрачности, определяемой наблюдением в темном поле зрения или в поляризованном свете. По этим признакам возможно разделить включения сразу на две большие группы и исключить из исследования одну из них.

При оценке влияния неметаллических включений на процесс разрушения целесообразно определять вид неметаллических включений на микрошлифах, изготовленных вблизи зоны разрушения, проводя их идентификацию по таким характеристикам, как форма, полируемость, твердость, оптические свойства и др., сопоставлять неметаллические включения, выявленные на поверхности разрушения с включениями вдали от разрушения и устанавливать их влияние на разрушение.

Количественные исследования неметаллических включений проводят согласно ГОСТ 1778-79, либо путем сравнения поля зрения микрошлифа, видимого под микроскопом, с эталонными шкалами (метод «Ш»), либо подсчетом количества и объемного процента включений (методы «К», «П», «Л»).

Одним из главных условий определения количественного содержания включений на автоматическом анализаторе изображений (ААИ) является различие отражательной способности включений и металлической матрицы, а также типов включений. В большинстве

случаев различия отражательной способности кислородных и сульфидных включений недостаточно для того, чтобы отделить сигналы от них.

Раздельный подсчет содержания основных типов неметаллических включений в стали (оксиды, сульфиды, нитриды) на ААИ проводится по следующей методике.

Вначале определяется общее содержание кислородных и сульфидных включений. Затем проводится обесцвечивание сульфидов путем полировки шлифов в течение 3 – 5 мин на сукне в 5% -ном водном растворе азотнокислого серебра. Сульфиды по отражательной способности сближаются с матрицей («серебряются»), благодаря чему можно подсчитать количество только кислородных включений. Разность между результатами этих двух определений соответствует содержанию сульфидных включений.

При определении содержания нитридов и карбонитридов титана, имеющих низкую отражательную способность, можно использовать для усиления различия в отражении тепловое травление (Например, для стали X18H12M3TЛ при режиме теплового травления 600 – 670 °С от 2 до 7 мин карбонитриды титана приобретали темно - коричневый, а нитриды титана – темно - золотистый цвет).

Другие методы определения состава и структуры включений в стали

Наиболее полные сведения о загрязненности металла неметаллическими включениями получают при комплексном использовании нескольких методов исследования, сочетающих количественный подсчет и определение фазового состава включений. Помимо рассмотренных методов для исследования неметаллических включений наиболее часто применяются следующие методы: рентгеноструктурный, электронно-графический, микрорентгеноспектральный, микрохимический.

Рентгеноструктурный метод исследования включений позволяет установить структуру и состав включений. Исследования можно проводить на микрошлифах, осадках включений и единичных крупных включениях. Для определения включений на микрошлифе необходимо, чтобы площадь, занятая включениями, составляла не менее 5% площади шлифа. Выпускаемые промышленностью специальные камеры для микролокального анализа позволяют получать рентгенограммы отдельных включений размером 80 мкм и более.

Осадки включений, изучаемые рентгеноструктурным методом и получаемые электрохимическим или химическими способами путем растворения основного металла, должны быть очищены от карбидов и интерметаллидов. Для получения четкой рентгенограммы необходимо, чтобы определяемая фаза содержалась в осадке в количестве не менее 10 – 20 %.

Электронно-графический метод целесообразно применять для изучения структуры включений в осадке при малом количестве выделенных включений. Очищенный от посторонних примесей осадок наносят на металлическую или стеклянную пластинку и на электронографе снимают дифракционную картину, по которой проводят расшифровку кристаллической структуры.

Микрорентгеноспектральный метод с применением микрозондов позволяет сравнительно быстро и точно определять содержание всех компонентов, входящих в состав включений. Современные микрозонды определяют элементы, начиная с бора. Микрорентгеноспектральным методом можно изучать включения размером от 1 мкм и более.

Микрохимический метод позволяет определить состав включений в выделенных осадках. Этот метод дает более достоверные результаты при исследовании низкоуглеродистых нелегированных и низколегированных сталей.

Идентификация выделений на поверхности образцов.

Фазовый состав выделений, находящийся на поверхности образцов металла идентифицируют с помощью ПЭМ на экстракционных репликах, используя метод микродифракции. При этом получают микродифракционную картину от отдельных частиц выделений, так как реплика не имеет собственной структуры. Благодаря этому расшифровка микродифракционных картин этим способом проще, чем в случае идентификации частиц, находящихся в металлической матрице. (при использовании метода фольг),

Методики получения электронограмм и методы их расшифровки подробно описаны во многих методических пособиях /см. гл.8 /.

При микродифракционном фазовом анализе решают две задачи: расшифровывают неизвестные выделения и определяют, имеются ли фазы с известными кристаллическими структурами.

Если включение не является монокристаллом или исследуется скопление мелкодисперсных включений, то микроэлектронограммы могут иметь вид либо сплошных колец, либо состоять из отдельных рефлексов.

Если кольца на микроэлектронограмме принадлежат включениям одной фазы, то для ее идентификации необходимо:

- измерить диаметры колец;
- вычислить соответствующие межплоскостные расстояния;
- выявить среди вероятных фаз такую, для которой межплоскостные расстояния совпадают с определенными экспериментально.
- соблюдение геометрических размеров, позволяющих поместить его в камеру прибора;
- соблюдение чистоты поверхности образца, не допускать присутствия продуктов коррозии и загрязнений.

Так, например, виды карбидных выделений, характерных для конструкционных среднеуглеродистых сталей, приведены в табл. п.1.2.

Методами электронной микроскопии неметаллические включения, как правило, не идентифицируют, так как они велики по размерам, что создает трудности при их извлечении на экстракционную реплику. Для их идентификации обычно используют методы рентгеноспектрального микроанализа (РЭМ, совмещенный с РСМА). Если неметаллические включения мелкодисперсны, то их идентифицируют так же, как карбиды .

Когда разрушение происходит по включениям только одной какой-либо фазы, то для идентификации этой фазы можно использовать метод рентгенографирования экстракционных реплик.

Таблица п1.2 Виды карбидных выделений в конструкционных сталях

Вид выделения	Кристаллич. решетка	Периоды, нм			Температура плавл. °С
		а	б	с	
FeC	Ромбическая	0,508	0,674	0,452	723
M ₂ C	Ромбическая	0,472	0.6	0,519	850 - 1100
M ₂₃ C ₆	ГЦК	1,058	-	-	850 - 900
M ₆ C	ГЦК	1,113	-	-	850 - 900
M ₁₂ C	ГЦК	1,093	-	-	850 - 900
VC	ГЦК	0,417	-	-	900 - 1200
Cr ₇ C ₃	Тригоальная	0,452	-	1,4	850 - 1020

Методы изготовления реплик и тонких фольг, а также идентификации выделений и интерпретации результатов исследований отличаются достаточной сложностью и требуют высокой квалификации персонала. Поэтому в данной главе это подробно не описано, а приведены ссылки на специальную методическую литературу.

Оценка влияния включений на разрушение металлов

В металле, в том числе в металле сварных швов, наблюдаются различные включения, которые могут оказывать отрицательное влияние на характеристики его разрушения. Для анализа влияния включений на процесс разрушения используют два способа.

Первый способ – основан на оценке отношения доли частиц включений, определяемых на проекции, нормальной к поверхности разрушения (излома) P_n , к доле частиц включений на поверхности микрошлифа $P_{ш}$. Это отношение (b) вычисляется по формуле $b = P_n/P_{ш}$. Если оно

больше 1, то включения способствуют процессу разрушения, если меньше 1, то препятствуют ему, а если это отношение равно 1, то не влияют на разрушение.

При втором способе используют коэффициент выявляемости включений, учитывающий кроме доли включений в изломе и на поверхности микрошлифа также влияние рельефа в изломе и средний размер частиц. Поверхностный слой металла, участвующий в процессе разрушения, характеризуется объемом $V^S = S_n H$, где S_n – площадь нормальной проекции излома, H – толщина слоя металла, частицы из которого принимают участие в процессе разрушения.

Объемная доля частиц включений в поверхностном слое металла определяется из выражения $V_n^S = P_n L_z / H$, где L_z – средний размер частиц включений по оси z .

Участие частиц включений в процессе разрушения, характеризуемое коэффициентом выявляемости включений, определяется по формуле $b_V = V_n^S / P_{ш}$ либо при объединении уравнений по формуле $P_n L_z / (P_{ш} H)$.

Значение H определяют на поперечных разрезах изломов как среднее значение из 5–10 замеров максимальных перепадов высот микрорельефа в участках, где располагаются частицы включений. Величину L_z определяют на шлифах, перпендикулярных поверхности излома, как среднюю случайную хорду, ориентированную вдоль оси z .

Величина b равна нулю, когда частиц на поверхности излома нет. Это означает, что частицы препятствуют процессу разрушения. При $b_V = 1$ все частицы из объема V^S участвуют в процессе разрушения. Увеличение b_V от 0 до 1 указывает на усиление влияния частиц включений на процесс разрушения.

В практике нередко возникает необходимость определять долю разрушения по конкретным неметаллическим или другого вида включениям. В пределах границ характерных участков разрушения, обусловленных включениями одного вида, любым способом измеряют суммарную площадь этих участков и определяют ее долю по отношению к общей площади анализируемого участка. Определение площади на РЭМ осуществляют с помощью любых количественных микроскопов. Итогом измерения является определение средней площади участков разрушения по конкретным включениям, например типов a , b , c :

$$S_{a\text{ср}} = \frac{1}{n} S_a / (na); S_{b\text{ср}} = \frac{1}{n} S_b / (nb); S_{c\text{ср}} = \frac{1}{n} S_c / (nc),$$

где na , nb , nc – число включений анализируемого вида.

Доля разрушения для конкретного включения (например, типа a) составляет:

$$P_a = \frac{1}{n} S_a / S_n,$$

где S_n – проанализированная площадь излома.

Сопоставление полученных данных со свойствами металла позволяет выявить тип включений, оказывающий наибольшее отрицательное влияние на характер разрушения и, следовательно, на уровень свойств металла.

При оценке влияния неметаллических включений на процесс разрушения целесообразно определять природу этих включений на изломах или микрошлифах, изготовленных вблизи зоны разрушения, и проводить их идентификацию по таким характеристикам, как форма, полируемость, твердость, оптические свойства и др. и, главное, химический состав, микроструктурными и физическими методами.

Таблица п1.3. Диагностические признаки основных типов неметаллических включений в сталях

Название включений и химическая формула	Форма, наблюдаемая на шлифе	Расположение	Отражательная способность	Оптические свойства в отраженном свете		
				в светлом поле	в темном поле	в поляризованном свете
Закись железа (вюстит) FeO	Глобулярная, овальная	Беспорядочное	Средняя	Цвет серый с бледно-коричневым оттенком	Непрозрачны, окантованы тонкой светящейся полосой	Изотропны
Оксид алюминия (корунд) Al_2O_3	Мелкие частицы неправильной формы, шестигранные пластинки	Беспорядочное, иногда скоплениями и строчками	Низкая	Цвет темно - серый	Прозрачны, цвет беловато-желтый	Прозрачны, анизотропны
Диоксид кремния (кварц) SiO_2	Крупные частицы неправильной формы и глобули	Отдельные включения	Низкая	Цвет темно - серый до черного	Прозрачны, ярко светятся бело-желтым цветом	Слабо-анизотропны
Аносовит (твердый раствор оксидов железа, магния и алюминия на основе Ti_3O_5)	Мелкие призмы, включения неправильной формы	Отдельные включения	Низкая	Цвет серый: от сиреневых до голубых и розоватых оттенков	Непрозрачны	Анизотропны. Четкий эффект двуотражения
Тиалит β - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$	Короткие призмы, шестиугольники, частицы неправильной формы	Отдельные включения и скопления	Низкая	Цвет светло - серый до серого	Прозрачны, появляется голубая окраска	Анизотропны
Оксиды церия (диоксид CeO_2 и полуторный оксид Ce_2O_3)	CeO_2 - мелкие включения неправильной формы, Ce_2O_3 - мелкие глобули	Скопления	Средняя	Цвет CeO_2 темно - серый, Ce_2O_3 - светло - серый	CeO_2 прозрачны, оранжево - бурого цвета различных оттенков, окаймлены ярко светящимся ободком; Ce_2O_3 - от темных непрозрачных до оранжево - красных	Изотропны
Структурно-неоднородные включения церия ($\text{CeO}_2 + \text{Ce}_2\text{S}_3$)	Неправильная, иногда глобулярная	Беспорядочное	Средняя	Цвет основного фона Ce_2S_3 светло - серый, выделения CeO_2 темно-серые	Светятся отдельными участками; цвет от темного до темно-красного, глобули прозрачны, цвет рубиново-красный	Изотропны
Марганцево-железохромовые шпинели (твердый раствор) $(\text{MnFe})\text{O} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$	Правильная, кристаллическая	Отдельные включения, группы и строчки	Средняя	Цвет серый	Цвет оранжевый и красный	Изотропны
Хромовые шпинели (хромиты) $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$	Треугольники, ромбы, квадраты	Преимущественно группами	Средняя	Цвет серый со слабым фиолетовым оттенком	Цвет красно - коричневый до темного	Изотропны

Название включений и химическая формула	Форма, наблюдаемая на шлифе	Расположение	Отражательная способность	Оптические свойства в отраженном свете		
				в светлом поле	в темном поле	в поляризованном свете
Кварцевое стекло SiO_2	Глобулярная	Беспорядочное	Низкая	Глобули черного цвета с блестящей точкой	Ярко светятся, очень прозрачны	Изотропны, наблюдается «черный крест»
Алюмосиликат-муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	Тонкие призмы и иглы	Беспорядочное	Средняя	Цвет темно-серый	Прозрачны, светло - желтого цвета	Изотропны
Ортосиликат закиси железа (фаялит) $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$	Глобулярная	Беспорядочное	Средняя	Цвет темно-серый	Прозрачны, цвет от зеленовато - желтого до темного, с кольцевыми отсветами в теле включения	Анизотропны
Силикатные включения с никелем	Глобулярная	Беспорядочное	Средняя	Цвет темно-серый	Прозрачны, цвет основной массы – от желто-белого с голубым оттенком до коричневого. Скелетообразные вкрапления в основной массе ярко светятся	Анизотропны
Стекла железомарганцево силикатные (различные соотношения $\text{FeO} \cdot \text{MnO}$ и SiO_2)	Глобулярная	Беспорядочное	Средняя	Цвет серый, с увеличением содержания FeO меняется до темного	Прозрачны, цвет от ярко красного до темного	Изотропны
Стекла хромосиликатные (различные соотношения Cr_2O_3 , SiO_2 и FeO)	Глобулярная	Беспорядочное	Средняя	Цвет серый	Прозрачны, серо-желтого цвета, выделения FeOCr_2O_3 ярко красного цвета.	Изотропны
Сульфиды – твердый раствор FeS MnS	Глобули	Беспорядочное, внутри и по границам зерен, в деформированном металле - строчечные	Средняя	Цвет от серо-голубого до светло-желтого в зависимости от содержания Mn	Непрозрачны, окаймлены тонкой светящейся линией	Изотропны
Нитрид титана TiN	Квадраты, прямоугольники	Группами, цепочками	Высокая	Золотисто - желтого цвета	Непрозрачны, окаймлены по границам тонкой светящейся линией	Изотропны
Карбонитриды титана Ti(CN)	Неправильной формы, вытянутые призмы	Скоплениями, строчками	Высокая	Цвет от розового до фиолетово - сиреневого	Непрозрачны, окаймлены по границам светящейся линией	Изотропны

Название включений и химическая формула	Форма, наблюдаемая на шлифе	Расположение	Отражательная способность	Оптические свойства в отраженном свете		
				в светлом поле	в темном поле	в поляризованном свете
Нитрид циркония ZrN	Квадраты, прямоугольники	Отдельные включения и группы	Высокая“	Цвет от лимонного до желтого	Непрозрачны, по границам окаймлены светящейся линией	Изотропны “
Нитрид алюминия AlN	Шестиугольники, треугольники	Группами и в виде отдельных мелких включений	Высокая“	Цвет серый до темного	Прозрачны, цвет золотисто - желтый	Сильно анизотропны
Нитрид ванадия VN	Кристаллы правильной формы	Группами или поодиночно	Высокая	Цвет белый с бледнорозовым оттенком	Непрозрачны	Изотропны

ТАБЛИЦА п1.4 Характерные признаки и свойства наиболее часто встречающихся в стали неметаллических включений.

Включения	Химическая формула	Кристаллическая решетка и форма, наблюдаемая на шлифе	Расположение	Полируемость	Пластичность	Твердость HV	Отражательная способность	Оптические свойства				Химические свойства
								при обычном свете		в поляризованном свете	в проходящем свете после выделения	
								в светлом поле	в темном поле			
Оксиды алюминия (корунд)	α - Al_2O_3	Гексагональная, в большинстве случаев мелкие зерна неправильной формы, иногда кристаллы правильной гексагональной формы (шестиугольники), реже крупные зерна	В большинстве случаев группами, скоплениями, после деформации – строчками	Плохая, выкрашиваются, оставляя «хвосты»	Не деформируясь	Очень высокая	Низкая	Цвет – от темно - серого до черного (с фиолетовым оттенком)	Прозрачен, бледно желтого цвета	Прозрачен, анизотропный. Эффект анизотропии проявляется слабо, особенно у мелких зерен	Мелкие, прозрачные, неправильной формы зерна	Стандартные реактивы не действуют
Сложные силикаты железа и марганца	$n\text{FeO}$ $m\text{MnO}$ $p\text{SiO}_2$	В большинстве случаев стекловидные глобулярной формы	Хаотичное	Хорошая	Деформируемость хорошая	Очень высокая	Низкая	Цвет темно – серый с кольцевым отсветом и блестящей точкой в центре. При большом содержании Si и Mn видны «розетки» темного цвета	Прозрачны, цвет янтарно – желтый, розетки кажутся выпуклыми	Стекловидны, изотропны, на некоторых включениях с большим содержанием Si наблюдается «темный крест»	Мелкие, прозрачные, неправильной формы зерна	Стандартные реактивы не действуют
Кварцевое стекло	SiO_2	Аморфное, глобулярной формы, различных размеров	Беспорядочное	Плохая, легко выкрашиваются	Не деформируется	700	Низкая	Черное с блестящей точкой в центре с кольцевыми отсветами	Ярко светится, очень прозрачны	Изотропны, с характерным черным «крестом»	Прозрачные глобулы и глобулы с темным ядром	Вытравливается 20 % - ным раствором HF в спирте, 5 % - ным раствором CuSO_4

Включе ния	Химичес кая формула	Кристаллическ ая решетка и форма, наблюдаемая на	Расположен ие	Полиру емость	Пластичнос ть	Твердо сть HV	Отра жатель ная спосо	Оптические свойства				Химические свойства
								при обыкновенном свете		в поляризов анном	в проходящем свете после	
								в светлом поле	в темном поле			
ульфиды	FeS; MnS	Встречаются главным образом в виде глобулей или эвтектики	Случайное, внутри и по границам зерен металла	Хороша я	Легко деформирую тся, вытягиваютс я в направлении деформации	700	Средн ая	Цвет изменяется от серо – голубого до светло – желтого в зависимости от содержания Mn	Непрозрачн ы	Изотропны	Непрозрачны , изотропны	Вытравливаю тся 3 % - ной H ₂ SO ₄ ; 10 % - ной HCl; 20 % - ной HF; 10 % - ной хромовой кислотой
Нитрид титана	TiN	Кубическая. Наблюдается в виде кристаллов правильной формы: квадратов, прямоугольник о в	Группами, после деформации – цепочкой	Плохая, легко выкраш иваютс я	Не деформирует ся	Высока я	Высо кая	От светло – желтого до розового	Непрозрачн ы, окаймлены по границам светящейся линией	Изотропны, непрозрачн ы	Изотропны, непрозрачны	Стандартные реактивы не действуют
Карбонит- риды титана (циаоно- нитриды)	Ti(CN); (TiC* TiN); [Ti ₂ (CN ₂)]	Кубическая. Наблюдается в виде кристаллов правильной формы: квадратов, прямоугольник о в	Группами, после деформации – цепочкой	Плохая, легко выкраш иваютс я	Не деформирует ся	Высока я	Высо кая	От розового с фиолетовым оттенком до фиолетово- сиреневого в зависимости от содержания углерода	Непрозрачн ы, окаймлены по границам светящейся лини	Изотропны, непрозрачн ы	Изотропны, непрозрачны	Стандартные реактивы не действуют
Нитрид алюминия	AlN	Гексагональная. Наблюдается в виде шестигранников, треугольников, прямоугольник о в	Группами	Плохая	Не деформирует ся	856	Низка я	Темно – серый	Прозрачны, цвет бледно – желтый	Сильно анизотропн ы	Прозрачны, бесцветны, сильно анизотропны	Стандартные реактивы не действуют
Сульфид титана	TiS	Мелкие включения, в основном прямоугольной формы	Группами, после деформации строчками	Плохая	Не деформирует ся	856	Высо кая	Бледно – розовый	Непрозрачн ы, окаймлены тонкой светящейся линией	Сильно анизотропн ы, показываю т четыре положения угасания, цвет бледно – розовый	Прозрачны, бесцветны, сильно анизотропны -	Вытравливаю тся тольео 5 % - ным раствором CuSO ₄

Включе ния	Химичес кая формула	Кристаллическ ая решетка и форма, наблюдаемая на	Расположен ие	Полиру емость	Пластичнос ть	Твердо сть HV	Отра жатель ная спосо	Оптические свойства				Химические свойства
								при обыкновенном свете		в поляризов анном	в проходящем свете после	
								в светлом поле	в темном поле			
Оксид алюминия с церием	CeAl ₁₁ O ₁₈	Неправильной формы	В большинстве случаев группами, скоплениями, после деформации – строчками	Плохая, выкраш иваются	Не деформирует ся	Высока я	Низка я	Темно – серый	Непрозрач ны	Цвет рубиновый	Прозрачны, бесцветны, сильно анизотропны -	Вытравливаю тся только 5 % - ным раствором CuSO ₄ -
Сульфиды церия	Ce ₂ S ₂	Глобулярные	Отдельными включениями , скоплениями, после деформации – строчками	Хороша я	Не деформирует ся	Высока я	Средн яя	Серый, более темный, сульфид железа и марганца	Непрозрач ны	Цвет рубиновый	Прозрачны, бесцветны, сильно анизотропны -	Вытравливаю тся только 5 % - ным раствором CuSO ₄ -
Сульфиды кальция	CaS	В деформированно м металле вытянутые	В деформиро ванном металле – строчками	Хороша я	Пластичны, легко деформирую тся	Высока я	Низка я	Темно – серый	Непрозрач ны	Непрозрач ны	Прозрачны, бесцветны, сильно анизотропны -	Вытравливаю тся только 5 % - ным раствором CuSO ₄ -

Таблица п1.5. Электролитическое выявление карбидных и интерметаллидной фаз в быстрорежущей стали

Электролит	Режим электрического травления для выявления карбидов и интерметаллидов				
	карбида железа	карбида хрома	карбида ванадия	карбида вольфрама	вольфрамида железа
0,5 % - ный раствор едкого натра	0,5 А/дм ² , 12 В, светлый	0,5 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,5 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 30 В, темнеет
10 % - ный раствор едкого натра	7 А/дм ² , 30 В, темнеет медленно	2 А/дм ² , 1 - 2 В, темнеет	0,7 А/дм ² , 4 В, темнеет	0,1 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,05 А/дм ² , 1 В, темнеет
8 % - ный водный раствор аммиака	0,4 А/дм ² , 5 – 30 В, темнеет медленно	0,3 А/дм ² , 12 В, темнеет	0,5 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 20 В, темнеет медленно
Насыщенный раствор щавелевой кислоты	0,3 А/дм ² , 3 В, светлый, основа равномерно травится	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет, основа равномерно травится	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, светлый, основа травится равномерно
10 % - ный раствор щавелевокалиевой соли	0,3 А/дм ² , 3 В, светлый, основа равномерно травится	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 в, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, светлый, основа травится равномерно
10 % - ный раствор щавелевокислого железа	0,3 А/дм ² , 1 – 2 В, темнеет, основа травится	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, светлый, основа травится равномерно	-	—
10 % - ный раствор лимонной кислоты	0,3 А/дм ² , 5 В, светлый	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 6 В, светлый
10 % - ный раствор лимонно-алюминиевой соли	0,2 А/дм ² , 5 В, светлый	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 5 В, темнеет
10 % - ный раствор ацетата калия	0,2 А/дм ² , 5 В, светлый, травление неравномерное	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 5 В. Темнеет
10 % - ный раствор углекислого натрия	0,3 А/дм ² , 5 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 5 В, светлый
10 % - ный раствор углекислого аммония	0,3 А/дм ² , 6 В, светлый	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,3 А/дм ² , 7 В, светлый
10 % - ный раствор уксусной кислоты	0,2 А/дм ² , 1 В, светлый, травление неравномерное	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 3 В, темнеет, основа травится равномерно	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет, травление неравномерное
5 % - ный ацетат меди	0,2 А/дм ² , 5 В, светлый, травление неравномерное	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	-	0,2 А/дм ² , 5 В, светлый, травление неравномерное
10 % - ный раствор синеродистого натрия	0,2 А/дм ² , 2 В, светлый	0,2 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 2 В, светлый	0,2 А/дм ² , 1 В, темнеет	0,2 А/дм ² , 2 В, светлый
10 % - ный раствор синеродистой ртути	0,2 А/дм ² , 6 В, темнеет, травление неравномерное	0,1 А/дм ² , 2 В, темнеет	0,1 А/дм ² , 5 В, светлый, травление неравномерное	0,1 А/дм ² , 1 В, темнеет, травление неравномерное	0,1 А/дм ² , 3 В, светлый, травление неравномерное
Примечание: 1. Концентрация электролитов, % (масс) 2. При травлении образец служит анодом, платиновая проволока – катодом					

Таблица п1.6 Электролиты и режимы электроотравления для дифференциации карбидов и интерметаллидов различных элементов в стали

Электролит	Режим электроотравления	Интерметаллиды (с железом)			карбиды		
		не окрашиваются	окрашиваются	не выявляются	не окрашиваются	окрашиваются	не выявляются
10 % - ный раствор щавелевой кислоты	0,1 – 0,5 А/дм ² , 5 – 20 с	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–
10 % - ный раствор хлорного железа + 1 % - ный раствор соляной кислоты	1 – 4 В, 5 – 15 с	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–
Травящая электрополировка в фосфорохромовом электролите	0,1 – 0,5 А/дм ² , 3 – 10 с	Cr, Mo, V	W, Ti, Nb	–	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–
Лимонная кислота, йодистый калий, соляная кислота	1 – 4 В, 2 – 20 с	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–	Cr, W, Mo, V, Ti, Nb	–	–
Щелочной раствор пикрата натрия	1 – 3 В, 5 – 30 с	Mo, V, Nb	Cr, W, Ti	–	Cr, Ti, Nb	W, Mo, V	–

Таблица п1.7 Характеристика фаз, идентификация которых возможна на нетравленных шлифах

Фаза	Характеристика фазы
Mg ₂ Si	Серо - голубая, на воздухе быстро тускнеет, покрываясь радужной пленкой
CaSi ₂	Серая, быстро тускнеет
CuAl ₂	Светло-розовая
NiAl ₂	Светло-серая
FeAl ₃	От бледно-лилового до серого с фиолетовым оттенком
MnAl ₆	Бледно-серая в двойных Al-Mn сплавах (чем больше марганца, тем темнее)
CrAl ₇	Светло-серая
Si	Четкие рельефные включения серого цвета
α (AlMnSi)	Светло-серая, более темная и тусклая, чем CrAl ₇
β (AlMgSi)	Более темная, чем фаза AlMnSi, с более заметным серо-голубым оттенком, обычно в виде продолговатых игл
Al ₂ CuMg	Бледно-лиловая с голубым оттенком
α (AlFeSi)	Серая с фиолетовым оттенком, часто имеет вид китайских иероглифов
β (AlFeSi)	Светло серая, обычно иглообразной формы
AlCuFe	Серая
AlFeMn	Бледно-серая, как фаза MnAl ₆
AlCuNi	Серая с фиолетовым оттенком
AlFeSiMg	Перламутрово-серая
AlCuFeMn	Светло-серая
Ni ₄ Mn ₁₁ Al ₆	Серая с фиолетовым оттенком
<i>Примечание.</i> Фазы, состав которых точно не установлен, приведены в скобках	

Таблица п1.8 Условия электролитического травления нержавеющей стали для выявления карбидов и сигма-фазы

Реактив	Режим		Окраска		
	Напряжение, В	Время, с	Сигма-фазы	Карбидов	Основы
Концентрированный раствор NaOH	6	30	-	Синяя	-
Концентрированная кислота HNO ₃	1,5	5	Темная	-	Светлая
10-н. раствор KOH	3	0,4	Розово-коричневая	-	-
10-н.раствор KOH	3	1,2	Зеленая и коричневая	Белая	-
0,1.-н. раствор KOH	3	25	Тускло-желтая или синяя	Синяя	-
1-н. раствор (CH COO) ₂	3	5	Пурпурно-красная	Рыжеватокоричневая	Светлая
Насыщенный раствор Ba(OH) ₂	6	2	Желтая	Коричневая и белая	-
Щелочной раствор KMnO ₄	6	3	Ярко-розовая или оранжево-коричневая	Светло-коричневая	-
50 % - ный раствор KOH	1,5	12	Синяя	Белая	-
10 % - ный раствор C (CH COO) ₂	1,5	15	Белая	Темно-синяя	Тускло-желтая
2-н. раствор NaOH	3	7	Коричневая	-	-
Концентрированный раствор KaOH	6	10	-	Желтоватая	-
10-н. раствор KOH	1,5	3	Синяя	-	-

Таблица п1.9 Наилепое употребляемые электролиты и режимы электролитического выявления карбидов специальных сталей

Растворы травления	Режимы электролитического травления для выявления карбидов								
	железа			Хрома			Ванадия		
	Плотность тока, А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры	Плотность тока А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры	Плотность тока А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры
0,5 % - ный раствор едкого натра	0,5	12	Карбид после травления светлый	0,5	2	Карбид при травлении темнеет	0,5	2	Карбид при травлении темнеет
10 %- ный раствор едкого натра	7	30	Карбид при травлении темнеет медленно	2	1,2	Карбид при травлении темнеет	0,7	4	Карбид при травлении темнеет же
3 % - ный раствор аммиака	0,4	5 - 10	Карбид при травлении темнеет медленно	0,3	12	Карбид при травлении темнеет	0,5	2	Карбид при травлении темнеет
Насыщенный раствор щавелевой кислоты	0,3	3	Карбид после травления светлый. Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко	0,3	2	Карбид при травлении темнеет	0,3	2	Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко
10 % - ный раствор щавелево-калиевой соли	0,3	3	Карбид после травления светлый. Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко	0,3	2	Карбид при травлении темнеет	0,3	2	Карбид при травлении темнеет
10 % - ный раствор щавелево-калиевой соли	0,3	1 - 2	Карбид при травлении темнеет. Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко	0,3	2	То Карбид при травлении темнеет же	0,3	2	Карбид после травления светлый. Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко

Растворы травления	Режимы электролитического травления для выявления карбидов								
	железа			Хрома			Ванадия		
	Плотность тока, А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры	Плотность тока А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры	Плотность тока А/см	Время травления, мин	Характеристика структуры
10 % - ный раствор синеродистой ртути	0,2	6	Карбиды при протравливании темнеют. Протравливание неравномерное	0,1	2	Карбид при травлении темнеет	0,1	5	Карбид после трвления светлый. Протравливание неравномерное
10 % - ный раствор лимонной кислоты	0,3	5	Карбид после травления светлый	0,3	2	Карбид при травлении темнеет	0,3	1	Карбид при травлении темнеет
10 % - ный раствор лимонно-алюминиевой соли	0,2	5	Карбид после травления светлый	0,2	2	Карбид после травления темнеет	0,2	2	Карбид при травлении темнеет
10 % - ная уксусная кислота	0,2	1	Наблюдается неравномерное протравливание	0,2	2	Карбид при травлении темнеет	0,2	3	Основная масса протравливается равномерно, но не глубоко
10 % - ный раствор ацетата калия	0,2	5	Карбид после травления светлый	0,2	1	Карбид при травлении темнеет	0,2	1	Карбид при травлении темнеет
5 % - ный раствор ацетата меди	0,2	5	Протравливание неравномерное	0,2	1	Карбид при травлении темнеет	0,2	1	Карбид при травлении темнеет
10 % - ный раствор углекислого натрия	0,3	5	Карбид после травления светлый	0,3	1	Карбид после травления темнеет	0,3	2	Карбид при травлении темнеет
10 % - ный раствор синеродистого натрия	0,2	2	Карбид после травления светлый	0,2	2	Карбид при травлении темнеет	0,2	2	Карбид при травлении темнеет

Примечание: анодом служит образец, катодом – платиновая проволока

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Примеры стандартных технологических задач, решаемых методами металлографии и фрактографии (с применением дополнительных современных методов исследований)

Рекомендуемые схемы исследований качества стали по изломам

Рекомендуемая схема проведения исследований качества сталей включает перечень основных типовых технологических задач, решаемых с помощью фрактографических методов исследований (с дополнительным привлечением в необходимых случаях структурных и других методов определения качества металла) и выходную информацию, получаемую в результате проведения указанных выше исследований. Исходные данные, характеризующие исследуемый металл:

- марка стали;
- химический состав (истинный или марочный) ;
- технологическая схема изготовления металла;
- механические свойства металла;
- условия поломки образца (температура, скорость).

При отсутствии указанных исходных данных эти сведения выясняются на заводе - изготовителе или проводят необходимые дополнительные исследования.

Задача 1. Идентификация вида излома.

Идентификация проводится визуально в соответствии с описанием изломов и путем сравнения с характерными фрактограммами, приведенными в документах НТД на основе следующей совокупности признаков:::

- по морфологии строения изломов;
- по макрогеометрии;
- по связи с элементами структуры;
- по цвету и блеску;
- по степени пластической деформации;
- по наличию и характеру расположения участков излома со строением, отличающимся от строения основного вида излома (см. схему рис.6.1гл.6).

Решение этой задачи позволяет определять принципиальное соответствие вида излома заданному по нормативно-технической документации (НТД), идентифицировать виды отклонений в строении изломов от оптимального в соответствии с НТД и оценивать степень отрицательного влияния данного вида излома на свойства металла.

Задача 2. Идентификация вида несплошностей, выявляемых в изломе

Идентификация проводится визуально в соответствии с описанием характера несплошностей на поверхности разрушения и сравнением с характерными фрактограммами, приведенными в документах НТД, на основе следующей совокупности признаков:

- по характеру строения и расположения;
- по макрогеометрии;
- по связи с элементами структуры;
- по цвету и блеску (см схему рис.6.1 гл.6) .

Решение этой задачи позволяет идентифицировать выявленные на поверхности разрушения несплошности, которые могут являться дефектами металла, снижающими его эксплуатационные характеристики.

Задача 3. Оценка качества металла по изломам

Оценка качества металла по изломам проводится путем измерения:

- площади, количества, плотности распределения участков излома со строением, отличающимся от заданного по НТД (идентифицированных в задаче 1);
- площади, линейных размеров и плотности распределения несплошностей на поверхности разрушения (идентифицированных в задаче 2);
- величины пластической деформации металла в зоне разрушения (измерение величины утяжки).

Измерения проводятся с помощью методов количественной оценки элементов структуры, указанных в гл. 2.

Решение этой задачи позволяет по результатам измерения, сопоставляемым с требованиями НТД, оценивать кондиционность или некондиционность металла.

Задача 4. Исследование причин отклонения строения излома от заданного

Проводится в шесть этапов:

1. Анализ исходных данных, характеризующих исследуемый металл, и подготовка излома для дальнейших исследований:
 - а) уточнение исходных данных в соответствии с перечнем, приведенным в начале данной схемы;
 - б) очистка излома (см. раздел 6. 1.1 гл. 6);
 - в) фиксирование внешнего вида всего излома или при необходимости отдельных характерных его участков, если возможно его повреждение при исследовании; используются методы получения плоского или объемного изображения (см. раздел 6.1.2 гл. 6);
 - г) установление соответствия исследуемого металла заданной марке стали. Определяется соответствие химического состава стали указанному в ГОСТе или ТУ; используются стандартные методы спектрального и химического анализа;
 - д) идентификация вида излома (проводится в соответствии с решением задачи 1);
 - е) определение возможных причин отклонения вида излома от заданного в соответствии с описанием причин образования дефектов в изломах, приведенных в справочнике / /;
 - ж) установление необходимости дополнительного исследования качества металла на основе результатов анализа возможных причин, вызывающих отклонение вида излома от заданного,

Рекомендуемая последовательность операций:

- определение содержания легирующих элементов и вредных примесей с использованием стандартных методов химического анализа;
- исследование неоднородности макроструктуры металла (распределение серы и фосфора, дендритное строение в литой стали, выявление остатков литой структуры в деформированной стали, определение ликвационной неоднородности) с использованием методов макроанализа (см.гл. 2);
- испытание механических свойств, а именно: прочностных и пластических характеристик при статическом растяжении (ГОСТ 1497), ударной вязкости (ГОСТ 9454), твердости (ГОСТ 9012, ГОСТ 9013, ГОСТ 2999) и других свойств, оговоренных ТУ или связанных с особенностями эксплуатации материала;
- исследование микростроения металла, а именно: определение микроструктуры (см. гл. 2), величины зерна и разнотерности (ГОСТ 5639), микротвердости (ГОСТ 9450), неметаллических включений (см. приложение1), фазового состава и тонкой структуры (см. гл. 8).

Если причины отклонения вида излома от заданного не удалось установить указанными исследованиями, то изучают микростроение поверхности разрушения.

2. Исследования микростроения излома:

- а) определение микромеханизмов разрушения по виду рельефа разрушения (качественная или количественная оценка) с использованием методов электронной микроскопии (см. гл.8);
 - б) определение вида микростроения излома; проводится путем сравнения полученных фрактограмм с характерными микрофрактограммами, приведенными в справочнике (по механизму разрушения, по связи с элементами микроструктуры, по микрогеометрии, по характеру расположения участков излома, отличающихся от основного строения излома).
3. Определение отклонений химического состава поверхности разрушения от состава основного металла и определение состава отдельных включений и выделений.
Используются физические методы определения химического и фазового состава поверхности разрушения (см. гл. 8). Для определения ее отклонения от состава и строения основного металла, а также установления фазового состава и структуры отдельных включений и выделений на поверхности разрушения используются методы электронной микроскопии и ЯГР (см. гл. 8).
4. Установление степени отрицательного влияния компактных включений на строение излома и свойства металла.
Определяется доля изучаемого вида включений на поверхности разрушения в сравнении с их долей в объеме металла (см. Приложение 1).
5. Уточнение причин отклонения в строении излома от заданного по НТД.
Проводится путем анализа результатов исследований по п. 1-4 данной задачи.
6. Установление способа устранения причин отклонения в строении излома от заданного.
Проводится путем выбора способа устранения путем анализа сведений, полученных по п.1 – 5 данной задачи..
Решение этой задачи позволяет устанавливать причины отклонений в строении излома от заданного по НТД и рекомендовать способы их устранения в производственных условиях.

Задача 5. Исследование причин образования несплошностей, выявляемых в изломе

Рекомендуется следующая последовательность:

1. Установление исходных данных, характеризующих исследуемый металл, и подготовка излома для исследований. Проводится аналогично п. 1 Задачи 4.
 2. Идентификация вида несплошности. Проводится в соответствии с решением задачи 2.
 3. Установление возможных причин образования данного вида несплошностей. Проводится по материалам данного справочника (гл. 6 п 3, 4) подраздела «Причины образования дефектов в изломах», устанавливается необходимость дополнительных исследований качества металла.
 4. Уточнение характера несплошностей путем исследования их расположения и размеров вблизи зоны разрушения. Используются методы макроанализа..
 5. Определение газонасыщенности металла. Исследуют содержание водорода, кислорода и азота, используя стандартные методы газового анализа.
 6. Установление природы выделений и включений (плёночных и компактных) на поверхности несплошностей. Исследуют химический и фазовый составы выделений и включений, используя физические методы анализа химического состава и методы электронной микроскопии (см. гл. 8).
 7. Уточнение причин образования несплошностей, проявляющихся в изломе металла.
Проводится анализ результатов исследований по пп. 1-6 данной задачи и сопоставление с подразделом «Причины образования дефектов в изломах (см.данный справочник / гл.6 п.3,4/.
 8. Установление способа устранения несплошностей, проявляющихся в изломах металла.
Способ устранения выбирают в соответствии с разделом « способы предупреждения и способы устранения дефектов в металле» (см. данный справочник (гл. 6 п.3, 4)
- Решение этой задачи позволяет установить причины появления несплошностей металла в изломах и рекомендовать способы их устранения в производственных условиях.

6.2 Методы диагностики разрушенных деталей

Задачу повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей машин и механизмов невозможно решить без эффективной системы технической диагностики причин их разрушения.

Разнообразие применяемых конструкционных материалов, сложность технологических процессов изготовления из них деталей, длительные условия работы деталей в сложно-напряженном состоянии весьма затрудняет диагностику повреждаемости деталей и зачастую требует многостороннего анализа внешних и внутренних конструктивных и технологических факторов, определяющих надежность работы детали, а также качества материалов, применяемых для ее изготовления.

Качество деталей определяется не только свойствами используемого материала, но и наличием дефектов в металле, которые могут способствовать преждевременному ее разрушению.

Поэтому достоверное установление причин появления дефектов в металле детали необходимо для разработки технологических, конструкторских и организационных мероприятий по их предотвращению.

Сложность исследования природы дефектов заключается в том, что дефекты одного вида могут вызываться несколькими причинами на различных этапах производства. Кроме того, одинаковые по внешнему виду дефекты имеют различную природу. При последующих переделах внешний вид их может изменяться.

Важно, чтобы при исследовании природы дефектов находить первичные причины, которые могли привести к его образованию и устранить главную из них.

Опыт эксплуатации и исследования сварных конструкций показал, что независимо от качества свариваемого металла металлургические и технологические дефекты, вызванные сваркой, могут существенно снижать работоспособность сварных соединений.

В сварных конструкциях, работающих в условиях статического нагружения, дефекты являются очагами хрупкого разрушения. При значительных напряжениях такие дефекты, как подрезы, непровары, несплавления и трещины создают значительную концентрацию напряжений и снижают долговечность соединений. При определенных условиях дефекты типа пор и шлаковых включений, неопасные при статических нагружениях, могут вызвать преждевременное усталостное разрушение.

Рекомендуемая схема исследования причин разрушения детали

1. Оценка общего состояния детали

Описание вида разрушенной детали;

Определение длительности службы детали;

Определение нарушения нормального ритма работы детали;

Составление документации на бракование (акты, фотографии);

Предварительное определение возможных причин разрушения.

Примечание. Проводится совместно с отделом технического контроля.

2. Оценка характера разрушения

Определение характера разрушения (статическое, динамическое, усталостное) ;

Определение очага разрушения;

Определение наличия концентраторов напряжения или дефектов;

Определение возможного направления действия напряжений;

Оценка состояния детали по внешнему виду и излому;

Оценка качества механической обработки (состояния поверхности);

Оценка характера взаимодействия деталей в конструкции и изменения ее в размерах.

Примечание. Проводится совместно с технологическими службами.

3. Анализ технической документации

Анализ аварийного акта;

Анализ чертежей, технических условий, нормативно-технической документации;
Анализ соответствия геометрических размеров детали чертежу;
Анализ наличия документации на ремонт или замену детали;
Анализ сертификата на материал детали;
Анализ технологической карты изготовления детали по следующим направлениям:
конструктивным (геометрии, чистоте поверхности, наличии концентраторов напряжений и др.), металлургическим (способу выплавки, чистоте металла по неметаллическим включениям, газосодержанию и др.), материаловедческим (замене марки материала и др.), технологическим (режимам термообработки, режимам деформации, технологии поверхностного упрочнения и др.).
Анализ предполагаемых условий работы детали (вид нагружения, продолжительность работы, схема приложенных напряжений, их величина).
Анализ статистического материала аналогичных поломок;
Анализ информации об обстоятельствах поломок:
- разрушение единичное или массовое;
- одноразовое или повторяющееся;
- при повторяющемся разрушении – общность или различие в характере поломки этих деталей.

Примечание. Проводится совместно с конструкторами, технологами, службой ОТК.

При установлении причины разрушения детали – составление заключения и выдача рекомендаций по предотвращению поломок.

При неустановлении причины поломок – продолжение исследований.

4. Исследование поверхности разрушения

Изучение раскрывшейся трещины:

- установление степени окисленности;
- проникновение покрытий или краски на стенки трещин;
- установление поверхностных концентраторов напряжений (подрезы, острые углы, забоины и т.д.);
- установление повреждений и следов деформации на стенках трещины;
- долом детали по раскрывшейся трещине.

Примечание: указанные сведения позволят определить стадию, когда образовалась трещина: в период изготовления детали или в период ее эксплуатации

Изучение нераскрывшейся трещины:

- раскрытие трещин, не получивших развития (для установления начальной стадии возникновения трещин – очага разрушения);
- изучение поверхности нераскрывшейся трещины (вид излома, окисленность и т.д.);
- установление наличия или отсутствия поверхностных концентраторов напряжений вблизи нераскрывшейся трещины;
- при отсутствии поверхностных концентраторов напряжений:
 - а) вырезка образцов из «здорового» участка металла или из аналогичных деталей, отработавших ресурс в аналогичных условиях, из зоны металла, соответствующей зоне разрушения дефектной детали;
 - б) поломка образцов (п.а) при нагружениях, имитирующих условия работы реальной детали (статическое, динамическое, циклическое нагружение).

5. Исследование и оценка качества материала детали

Химический анализ металла детали (легирующих элементов и примесей);
Вырезка образцов из места разрушения детали и сравнительных вдали от места разрушения;
Проведение макроструктурного анализа;
Проведение микроструктурного анализа;
Определение механических свойств вблизи и вдали от места разрушения;
Проведение (при необходимости) технологических испытаний;

Оценка качества термической обработки по структуре и механическим свойствам;
Оценка влияния на качество материала технологических, металлургических и конструктивных факторов;

Выводы о качестве материала детали.

Примечание. При неустановлении причины поломки продолжить исследования далее по п.6.

6. Структурные исследования качества материала

Проведение количественного металлографического анализа;

Проведение электронно - микроскопического исследования изломов;

Определение природы выделений на поверхности разрушения физическими методами исследований.

Анализ результатов исследований.

Примечание. При неустановлении причины поломки продолжить установление причин разрушения по п.7.

7. Расчетная и экспериментальная проверка результатов исследования

Анализ эксплуатационных нагрузок;

Проведение расчетов на прочность;

Оценка характеристик линейной механики разрушения;

Оценка вероятности разрушения;

Моделирования условий эксплуатации детали;

Воспроизведение характера разрушения детали в лабораторных условиях;

Проведение натурных стендовых испытаний;

Окончательные выводы по определению причины разрушения, составление заключения и выдача рекомендаций по предотвращению поломок.

Окончательное заключение о причинах поломки может быть сделано на различных этапах исследования на основании внешнего состояния условий работы и излома детали, оценки качества материала, расчетов на прочность или экспериментальной оценки напряжений. В нем должно быть обоснование последовательности и картины разрушения, установление его причины. Оно позволяет разработать предложения и мероприятия по предотвращению поломок в дальнейшем.

Рекомендации по предотвращению поломок детали могут предусматривать улучшение конструкций деталей и узлов, качества изготовления и ремонта, изменение технологии изготовления, свойств материала, соответствующих условиям эксплуатации, дополнение к инструкциям по эксплуатации и обслуживанию, устранение недостатков и нарушений, выявленных при обследовании.

Методы оценки качества сварных соединений

Методы оценки качества сварных соединений во многом аналогичны методам оценки качества металлов, но имеют свои особенности, связанные с влиянием температурно-деформационного цикла, различиями в структуре шва и околошовной зоны, отличием химического, фазового и структурного состояния металла шва от состояния сравниваемого металла, наличием остаточных внутренних напряжений и присутствием внешних и внутренних дефектов.

Причиной разрушения сварных соединений могут быть дефекты сварного шва, образование закалочных структур, высокий уровень остаточных напряжений, загрязнение металла включениями.

Чаще всего местом разрушения (более 90%) является участок основного металла в зоне соединения, подвергнутого нагреву.

Качество сварного шва может быть оценено неразрушающими методами, механическими испытаниями и металловедческими исследованиями.

Механические свойства сварного соединения оцениваются в различных структурных зонах. Однако необходимо иметь в виду, что условия испытания механических свойств

металлического соединения и его зон не соответствуют условиям работы нагруженной сварной конструкции.

Свойства сварных соединений могут в целом существенно отличаться от свойств отдельных зон. Действие неодноосной внешней нагрузки в реальных условиях может деформировать и разрушать сварное соединение по механизму, отличному от разрушения при испытании образцов.

Методами металлографии (разрушающий метод исследования) можно анализировать любые участки сварного соединения. Образцы для металлографического анализа вырезают из наиболее характерных участков исследуемой детали.

Образцы должны охватывать все участки сварного соединения: сварной шов, зону термического влияния, основной металл, не подвергавшийся термическому влиянию сварки и дефекты, вероятно, послужившие причиной разрушения.

Рекомендуемая схема исследования причин разрушения сварных соединений

1. Информация о возможности образования и поведения структуры сварного соединения при заданных нагрузках
Свойства основного материала;
Свойства присадочного металла;
Способы сварки;
Последующая термическая обработка;
2. Выявление дефектов в сварном шве (соединении)
3. Определение рациональности принятого технологического режима сварки;
4. Определение пригодности и кондиции используемых сварочных материалов и основного металла;
5. Выяснение квалификации сварщика;
6. Выяснение общей культуры производства.

Для установления окончательной причины разрушения сварных соединений проводится необходимый комплекс исследований, предусмотренный в вышеприведенной схеме.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ГОСТы, позволяющие дополнительно оценивать качество металлов и металлопродукции

1497–84	Металлы. Методы испытаний на растяжение
1763–92	Сталь. Методы определения глубины обезуглероженного слоя
1778–70	Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений
2601–84	Сварка металлов. Термины и определения основных понятий
2789–73	Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
2999–75	Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу
3242–79	Соединения сварные. Методы контроля качества
3248–81	Металлы. Метод испытания на ползучесть
3565–80	Металлы. Метод испытания на кручение
4543–71	Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия
5009–82	Шкурка шлифовальная тканевая. Технические условия
5272–68	Коррозия металлов. Термины
5639–82	Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна
5640–68	Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты
5657–69	Сталь. Метод испытания на прокаливаемость
6032–2003	Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии
6130–90	Металлы. Метод определения жаростойкости
6996–66	Сварные соединения. Методы определения механических свойств
7268–82	Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб
7512–82	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод
7564–97	Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний
8233–56	Сталь. Эталоны микроструктуры
9012–59	Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю
9013–59	Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу
9450–76	Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников
9454–78	Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах
9651–84	Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах
10145–81	Металлы. Метод испытания на длительную прочность
10243–75	Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры

10446–80	Проволока. Метод испытания на растяжение
10510–80	Металлы. Метод испытания на выдавливание листов и лент по Эриксену
11150–84	Металлы. Методы испытания на растяжение при пониженных температурах
11701–84	Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент
11878–66	Сталь аустенитная. Методы определения содержания ферритной фазы в прутках
12004–81	Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение
13813–68	Металлы. Метод испытания на перегиб листов и лент толщиной менее 4 мм
14019–2003	Материалы металлические. Метод испытания на изгиб
17367–71	Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы
18661–73	Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка
18835–73	Металлы. Метод измерения пластической твердости
20017–74	Сплавы твердые спеченные. Метод определения твердости по Роквеллу
20018–74	Сплавы твердые спеченные. Метод определения плотности
20019–74	Сплавы твердые спеченные. Метод определения предела прочности при поперечном изгибе
20485–75	Пайка. Метод определения затекания припоя в зазор
20486–75	Пайка. Методы определения растекания припоя
21073.0-4–75	Металлы цветные. Определение величины зерна
21318–75	Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками
21548–76	Пайка. Метод выявления и определения толщины прослойки химического соединения
21549–76	Пайка. Метод определения эрозии паяемого материала
22706–77	Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269 °С
22761–77	Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия
22762–77	Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара
22838–77	Сплавы жаропрочные. Методы контроля и оценки макроструктуры
22848–77	Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при температурах от минус 100 до минус 269 °С
22975–78	Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Роквеллу при малых нагрузках (по Супер-Роквеллу)
23046–78	Соединения паяные. Метод испытаний на удар
23207–78	Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения

23273–78	Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору)
23402–78	Порошки металлические. Микроскопический метод определения размеров частиц
23479–79	Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования
23870–79	Свариваемость сталей. Метод оценки влияния сварки плавлением на основной металл
24167–80	Соединения паяные. Метод испытаний на изгиб
24648–90	Чугун для отливок. Отбор проб и изготовление образцов для механических испытаний
24715–81	Соединения паяные. Методы контроля качества
25095–82	Сплавы твердые спеченные. Метод определения модуля упругости (модуля Юнга)
25172–82	Сплавы твердые спеченные. Метод определения твердости по Виккерсу
25502–82	Объективы. Метод определения фотографической разрешающей способности
25849–83	Порошки металлические. Метод определения формы частиц
26007–83	Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на релаксацию напряжений
26388–84	Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением
26389–84	Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением
26446–85	Соединения паяные. Методы испытаний на усталость
26528–98	Материалы металлические спеченные, исключая твердые сплавы. Метод испытания на ударный изгиб
26529–85	Материалы порошковые. Метод испытания на радиальное сжатие
26849–86	Материалы порошковые. Метод определения величины пор
27034–86	Сплавы твердые спеченные. Метод определения предела прочности и предела текучести при сжатии
27637–88	Полуфабрикаты из алюминиевых деформируемых термоупрочняемых сплавов. Контроль микроструктуры на пережог металлографическим методом
27750–88	Контроль неразрушающий. Покрытия восстановительные. Методы контроля толщины покрытий
28830–90	Соединения паяные. Методы испытаний на растяжение и длительную прочность
28840-90	Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования.

28868–90	Металлы и сплавы цветные. Измерение твердости методом ударного отпечатка
30003–93	Металлы. Испытание на изгиб навивкой листов и лент толщиной менее 2,5 мм
30415–96	Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом
30432–96	Трубы металлические. Методы отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний
30456–97	Металлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб
30480–97	Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования
9.019–78	Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые и магниевые. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание
9.021–74	Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию
9.031–74	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия анодно-оксидные полуфабрикатов из алюминия и его сплавов. Общие требования и методы контроля
9.301–86	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Правила приемки и методы контроля
9.302–88	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля
9.304–87	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия газотермические. Общие требования и методы контроля
9.307–89	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля
9.308–85	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний
9.311–87	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Метод оценки коррозионных поражений
9.312–89	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия защитные. Методы определения жаростойкости
9.315–91	Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия алюминиевые горячие. Общие требования и методы контроля

9.517–2003	Единая система защиты от коррозии и старения. Временная противокоррозионная защита изделий. Методы испытаний
9.901.1–89	Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание
9.901.2–89	Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса
9.901.4–89	Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов при одноосном растяжении
9.903–81	Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы высокопрочные. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание
9.904–82	Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию
9.905–82	Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования
9.911–89	Единая система защиты от коррозии и старения. Сталь атмосферостойкая. Метод ускоренных коррозионных испытаний
9.912–89	Единая система защиты от коррозии и старения. Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии
9.913–90	Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний
25.502–79	Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость
25.503–97	Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие
25.505–85	Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении
25.506–85	Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении
Р 50575–93	Проволока стальная. Требования к цинковому покрытию и методы испытания покрытия
Р 50708–94	Проволока. Метод испытания на знакопеременное скручивание
Р 50724.1-3–94	Ферросплавы

Р 51163–98	Покрытия термодиффузионные цинковые на крепежных и других мелких изделиях. Общие требования и методы контроля
Примечание:	Более подробный перечень ГОСТов, определяющих требования к методам контроля качества металлов приведен в справочнике: Герасимова Л. П. Стандартные методы контроля качества металлических материалов, сварных и паяных соединений / Л.П.Герасимова, Д.Е.Голубков, Ю.П.Гук. – М. ЭКОМЕТ, 2007 – 664 с

Основные международные стандарты (ИСО), используемые при металлографическом контроле качества металлов, их сварных и паяных соединений

146:1982	Материалы металлические. Испытание на твердость. Поверка приборов для определения твердости по Виккерсу от HV 0,2 до HV 100
204:1997	Материалы металлические. Непрерывное испытание на ползучесть при растяжении. Метод испытания
783:1999	Материалы металлические. Прочность на разрыв при повышенной температуре
1463:2003	Покрытия металлические и оксидные. Измерение толщины покрытия. Микроскопический метод
2064:1996	Покрытия металлические и неметаллические покрытия. Определения и понятия, относящиеся к измерению толщины
2740:1999	Материалы металлические спеченные, кроме твердых сплавов. Образцы для испытания на растяжение
2819:1980	Покрытия металлические на металлических подложках. Электроосажденные и химически осажденные покрытия. Обзор методов испытаний на прочность сцепления
3057:1998	Контроль неразрушающий. Металлографический метод реплик для исследования поверхности
3312:1987	Материалы металлокерамические и твердые сплавы. Определение модуля Юнга
3327:1982	Сплавы твердые спеченные. Определение предела прочности при поперечном изгибе
3613:2000	Покрытия хроматные конверсионные по цинку, кадмию, алюминию-цинковым и цинко-алюминиевым сплавам. Методы испытаний
3651-1:1998	Стали нержавеющие. Определение стойкости к межкристаллитной коррозии. Часть 1. Аустенитные и ферритно-аустенитные (дуплекс) нержавеющие стали. Коррозионное испытание в азотной кислоте посредством измерения потери массы (метод Хью)
3651-2:1998	Часть 2. Ферритные, аустенитные и ферритно-аустенитные (дуплекс) нержавеющие стали. Коррозионное испытание в среде, содержащей серную кис-лоту
3738-1:1982	Сплавы твердые. Испытание твердости по Роквеллу (шкала А). Часть 1. Метод испытания

3738-2:1988	Часть 2. Подготовка и калибровка образцовых блоков
3834-1:2005	Требования к качеству сварки плавлением металлических материалов. Часть 1. Критерии по выбору соответствующего уровня требований к качеству
3834-2:2005	Часть 2. Исчерпывающие требования к качеству
3834-3:2005	Часть 3. Стандартные требования к качеству
3834-4:2005	Часть 4. Элементарные требования к качеству
3878:1983	Сплавы твердые. Определение твердости по Виккерсу
3882:2003	Металлические и неметаллические покрытия. Обзор методов измерения толщины
3887:2003	Стали. Определение глубины обезуглиживания
3995:1985	Порошки металлические. Определение прочности неспеченного материала методом поперечного излома прямоугольных прессовок
4136:2001	Разрушающие испытания сварных швов на металлических материалах. Испытание на растяжение образца с поперечным швом
4506:1979	Сплавы твердые. Испытание на сжатие
4516:2002	Покрытия металлические и неметаллические. Определение микротвердости по Виккерсу и Кнупу
4518:1980	Покрытия металлические. Измерение толщины покрытия. Профилометрический метод
4522-1:1985	Покрытия металлические. Методы испытаний электроосажденных покрытий серебром и сплавами серебра. Часть 1. Определение толщины покрытия
4522-2:1985	Часть 2. Испытания на прочность сцепления
4524-1:1985	Покрытия металлические. Методы испытаний электролитических покрытий золотом и сплавами золота. Часть 1. Определение толщины покрытия
4524-3:1985	Часть 3. Электрографические испытания на пористость
4524-5:1985	Часть 5. Испытания на адгезию
4967:1998	Сталь. Определение содержания неметаллических включений. Микрографический метод с применением стандартных диаграмм
5173:2000	Испытания разрушающие на сварных швах в металлических материалах. Испытания на загиб
5187:1985	Сварка и аналогичные процессы. Соединения, паянные мягкими и твердыми припоями. Методы механических испытаний
5754:1978	Материалы спеченные из металлических порошков (кроме твердых сплавов). Образцы без надреза для испытания на удар
6506-1:2005	Материалы металлические. Определение твердости по Бринеллю. Часть 1. Метод испытания
6506-2:2005	Часть 2. Поверка и калибровка испытательных машин
6506-3:2005	Часть 3. Калибрование контрольных образцов
6506-4:2005	Часть 4. Таблица значений твердости
6507-1:2005	Материалы металлические. Определение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод испытания

6507-2:2005	Часть 2. Поверка и калибровка испытательных машин
6507-3:2005	Часть 3. Калибрование контрольных образцов
6507-4:2005	Часть 4. Таблица значений твердости
6508-1:2005	Материалы металлические. Определение твердости по Роквеллу. Часть 1. Метод определения (шкалы А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T)
6508-2:2005	Часть 2. Поверка и калибровка испытательных приборов (шкалы А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T)
6508-3:2005	Часть 3. Калибровка контрольных образцов (шкалы А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T)
6892:1998	Материалы металлические. Испытания на растяжение при температуре окружающей среды
7438:2005	Материалы металлические. Испытание на загиб
7438:2005	Материалы металлические. Испытание на загиб
7539-1:1987	Коррозия металлов и сплавов. Испытание на коррозию под напряжением. Часть 1. Основные указания к методикам испытаний
7539-2:1989	Часть 2. Приготовление и использование коромыслообразных образцов
7539-4:1989	Часть 4. Приготовление и использование образцов для испытания на одноосное растяжение
7989-1:2006	Стальная проволока и проволоочные изделия. Металлические покрытия из цветного металла стальной проволоки. Часть 1. Общие принципы
8401:1986	Покрyтия металлические. Методы измерения пластичности
9591:2004	Коррозия алюминиевых сплавов. Определение стойкости к коррозионному растрескиванию под напряжением
20482:2003	Материалы металлические. Листы и полосы. Испытание на вытяжку по Эриксену
R 293:1981	Сталь. Метод испытания на ползучесть при высоких температурах (прерывистые нагрузки и температура)
R 294:1981	Сталь. Непрерывное испытание на ползучесть при повышенных температурах
R 295:1981	Сталь. Методы определения длительной прочности при повышенных температурах

Примечание: Более подробный перечень международных стандартов (ИСО), определяющих методы контроля качества металла приведен в справочнике Герасимова Л.П. Стандартные методы контроля качества металлических материалов, сварных и паяных соединений / Л.П.Герасимова, Д.Е.Голубков, Ю.П.Гук, - М.ЭКОМЕТ, 2007, 664 с

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

К ГЛАВАМ 1 - 2:

- Пилющенко В.Л.** Справочник по практическому металловедению /В.Л.Пилющенко, Б.Б.Винокур, С.Е. Кондратюк и др.- Киев: Техника, 1984 - 135 с.
- Циммерман Р.** Металлургия и металловедение /Р. Циммерман, К.Гюнтер: справочник; пер. с нем.- М.: Металлургия, 1982.- 479 с.
- Шмит –Томас К.** Металловедение для машиностроения/ К.Шмит-Томас: справочник; пер. с нем.- М.: Металлургия, 1995.- 512 с.
- Попилов Л.Я.** Электрополирование и электротравление металлографических шлифов/ Л.Я.Попилов, Л.П. Зайцева. – М: Металлургиздат, 1963.- 410 с.
- Коваленко В.С.,**/ Металлографические реактивы, справочник. – М.: Металлургия, 1973. -133 с.
- Червяков А.Н.,** Металлографическое определение включений в стали / А.Н.Червяков, С.А. Киселева , А.Г. Рыльникова . – М:Металлургия, 1962.- 248 с.
- Вайтузин О.П.** Изучение микроструктуры металлов методом компьютерной микроскопии./ О.П. Вайтузин: Учебное пособие для ВУЗов. – Красноярск: СГАКУ, 2006.- 360 с.
- Гадалов В.Н.** Металлография с атласами микроструктур металлов, сплавов, покрытий и сварочных соединений/ В.Н.Гадалов. – Курск: КГТУ, 2004.- 460 с.
- Малинина Р.И.** Практическая металлография/ Р.И.Малинина и др.- М.: Интермет Инжиниринг, 2004. - 240с.
- Карпухин С.Д.** Световая микроскопия и количественная обработка изображений структур материалов/ С.Д.Карпухин.- М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2003.
- Бокшин С.Н,** Материаловедение и технология металлов / С.Н.Бокшин, Г.П. Фетисов и др.- М.: Высшая школа, 2002. 637 с.
- Солнцев Ю.П.** Материаловедение./ Ю.П.Солнцев. Е.И. Пряхин, Ф. Войткун.- СПб.: Химиздат, 2002 - 695 с.
- Солнцев Ю.П.** Металловедение /Ю.П. Солнцев, А.М. Вологжанина– М.: Изд. Академия. 2007.- 492 с.
- Новые материалы. Под ред. Карабасова Ю.С.- М. МИСиС 2002.

К ГЛАВЕ 3

- Ржешотарский А. А.** Микроскопическое исследование железа и стали, 1898. //В сб. Русские ученые -металловеды.-М.: Машгиз, 1951.-538 с.
- Portevin A., Bastien P.** Reactifs d'attaque metallographique. - Paris, 1937.
- Kraus V. M.** Pat. CSSR, № 88822, 1959, 15, 02 – М.: РЖ "Металлургия".1960, № 9, 22007.
- Панченко Е. В.** Лаборатория металлографии./ Б.И.Кример, Е.В.Панченко, Ю.А.Скаков.- М.: Металлургия 1965.-341 с.
- Masaniello C. R.** // Rassegna chim. 1958.V. 10. № 2. P.18.
- Beaujard L.,** Revue de Metallurgie, 1952. № 7.
- Bireescu L.** //Metallurgia. 1966, V. 18. № 11. P.634.
- Квашнина Е. И.** // Исследование и разработка технологических процессов термической обработки - М.: ЦНИИТМАШ. 196. Вып. 15. с.39.
- Тыкал К.**// Hutn. listy. 1968. Т. 23. № 6, P.425.
- Приданцев М. В.**// Металлург./М.В.Приданцев. 1931. № 5. С.590.
- Beraha E. J.** //Iron and Steel Inst/ E. J. Beraha. 1966. М. 204, № 3, P.248.
- Могилевский И.З.** Металлографические исследования поверхностного слоя стали после электроискровой обработки // Электроискровая обработка металлов/ И.З.Могилевский. – М.:Изд-во АН СССР 1957.Вып. 1 С.73.
- Алпатов Е. Н.,**// Заводская лаборатория/ Е.Н.Алпатов, Д.П. Заливакин // Заводская лаборатория. 1965. № 5. С.592.
- Biitter I.**// Prakt. Metallogr./ I.Biitte. 1964, v. 1, № 2. P.73.
- Абрамов В. П.** Рост аустенитного зерна в стали при индукционном нагреве / В.П.Абрамов. //Заводская лаборатория. 1962. № 5. С.598.
- Уолдмен Н.** Руководство к лабораторным занятиям по физической металлографии КУБУЧ, 1934.
- Goczal I.** et al. Hluti, 1959. t. 26, № 4 s.167.
- Dreyer G.** et al. Metal Progress, 1964, v. 86, № 1, p.116.
- Beaujard L., Tordeux I.** Revue de Metallurgie, 1955, v. 52, № 9, P.750.
- Васильев К. Н.** Авт. свид. № 115965. Бюлл. изобр., 1958, № 11, кл. 48 d, 1.

Чертов В. М., Постыка В. В. Заводская лаборатория, 1961, № 11, с.1429.
Beraha E. I. Iron and Steel Inst., 1965, 203, № 5, p.454.
Beraha E. J. Iron and Steel Inst., 1964, v. 202, № 8, p.696.
Gerds A. E., Mellon C. W. Iron Age, 1956, v. 178, № 9, p.86.
Войнов Б. А., Гедберг М. Г. В сб. «Материалы научной конференции Волгоградского политехнического института»; — т.1. Волгоград, 1965, с.378.
Ihrenberger A., Bepesovsky F. Prakt. Metallogr., 1967, Bd 4, № 9, S.489.
Brauner I Arch. Eisenhüttenwesen, 1963, Bd 34, № 3, S.173.
Beraha A. Prakt. Metallogr., 1968, Bd 5, № 9, S.501.
Блантер М. Е., Выявление структуры сплавов цветным травлением /Н.П. Беседин, М.Е.Блантер Заводская лаборатория, 1954. № 4. С.433.
Могилевский И.З. Металлографические исследования поверхностного слоя стали после электроискровой обработки // Электроискровая обработка металлов./ И.З.Могилевский, С.А.Чеповая. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. вып. 1. С.73.
Hagivara S.// J. Japan Foundrymen's Snc./ S. Hagivara 1968. № 3. v. 40. P.253.
Июффе А. Я.// Заводская лаборатория/ А.Я.Июффе, А.Г. Конников. 1968. № . С.455.
Малиночка Я. Н.// Заводская лаборатория./Я.Н.Малтнотчка, Н.Г. Осада.- 1959. № 12. С.1523; 1962. №3. С.315.
Johnig W. Freiburger Forschungsinstitut./ W. Johnig, R. Muhlmann. 196. Bd. 111. P.123.
Болотов И. Е. Рост кристаллов./И.Е.Болотов .т.5. —М.:Наука. 1965, С.190.
Riedl F.// Radex Rundschau./ F. Riedl 1967. № 3 — 4. P.646.
Ophetveld A.// . Prakt. Metallogr./ Bogers, A. Ophetveld 1967. Bd 4, № 5 P.235.
Зарубин Н. М. Металлографические реактивы // Заводская лаборатория./Н.М.Зарубин. 1948. № 12. С.1234.
Смирнов А. В. //Заводская лаборатория./ А.В.Смирнов. 1954., № 5, С.582.

К ГЛАВЕ 4

Prakt. // Metallogr. 1968. Bd. 5. № 12.
Коротков В. Г.// Заводская лаборатория. 1964. № 9. С.1115.
Portevin A. Reactifs d'attaque metallographique. Paris. 1937.
Беляев А. П.// Металловедение и термическая обработка металлов./ А.П.Беляев Р.М. Гольштейн 196. № 7.С.37.
Рыбаченко И. Д. //Заводская лаборатория./ М.Н. Витковский, И.Д.Рыбаченко. 1953. № 3. С.369.
 Бериллий / под ре Уайт Д. — М.: Иностранная Литература. 1960. 460 С.
Sawkill I.// Philos Mag./ I. E. Meredith, I. Sawkill. 1960. P.5.59 1195—1196.
Афанасьев Я. Е. Магниеые сплавы./ Я.Е.Афанасьев. Стандартгиз. 1950.
Мараев С. Е. //Заводская лаборатория./ С.Е.Мараев. 1953. № 2. С.196.
Бедрышев О. Л //Заводская лаборатория /О.Л.Бедрышев, З.Н. Мусихина 1951. №6. С.754.
Bireescu L. // Metallurgia./ L. Bireescu. 1966. № 11. v. 18. P.634.
Schatt W. // Prakt. Metallogr. W. Schatt 1967. Bd 4. № 12. P.620.
Попов А. С. //Заводская лаборатория/ А.С.Попов. 1959. № 4. С. 496 - 497.
Beraha E. //Metal Progress./ E. Beraha 1966. 90. № 3. P. 135,136, 138, 140.
Borner G.// Prakt. Metallogr./ G. Borner 1965. Bd. 2. № 4. P.171.
Beraha E.// Iron and Steel Inst./ E. Beraha 1965. 203. № 5. P.454.
Flachbarth C. T.//Metal Progress, nov./ C. T. Flachbarth, C.B.Pondo. 194. v. 56. № 5. P.108.
Миркин И. Л. //Заводская лаборатория./ И.Л.Миркин, Ю.А.Рыбакова 1966. № 4. С.456.
Блантер М. Е. // Заводская лаборатория./М.Е.Блантер. 1964. № 1. С.58.
Rhodes C. G. //Trans. AIME./ C. G. Rhodes R, A. Spuriing 1965. v. 233. № 6. P.1193.
Елисеев С. А.// Заводская лаборатория./С.А.Елисеев 1963. № 7.С.817.
Зарубин Н. М. Металлографические реактивы часть 12 //Заводская лаборатория./Н.М.Зарубин 1948. № 1. С.1234.
Young R. S.// Metallurgia./ R. S. Young 1959. № 354. v. 59. P.210.
Millner T.// Aluminium/ T.Millner, L. Sass. 1953. № 10. v. 8. P.214.
Lovell L. C. // Melal Progress./ L. C. Lovell, 1959. № 5. v. 75. P.96.
Ihrenberger A.// Prakt. Metallogr./ F Bepesovsky, A. Ihrenberger 1967. Bd 4. № 9. P.489.
 Металлургия циркония; пер.с англ.под ред. Г.А.Меерсона. ИЛ. М.: Иностранная Литература, 1959. 419 с.
Roberton A. H. //Metal Progress./ v. 56, № 5, nov.1949.

Кравецкий Г, А. //Сварочное производство./ Г.А. Кравецкий, Г.Д. Пососьева. 1968. № 2. С.15.
Zimmermann H. G. // J. Nucl. Mater./ H. G. Zimmermann. 196. v. 11., № 2. P.247.
Klodt D.T. // Metal Progress./ D.T. Klodt, R. I. Manis. 1958. v. 74. № 6, P.120,12.
Roman W. A. //J. Less-Common Metals. / W. A. Roman. 1966. v. 10. № 2. P.150.
Posey W. N. //Metal Progres./ W. N. Posey. 1959. v. 76. № 6. P.101.
Oliveira S. A. //Prakt. Metallogr./ S. A. Oliveira 1964, v. 1. № 4. P.165.
Мюллер Н. Н. // Заводская лаборатория /Н.Н.Мюллер и др. 1966. № 6. С.725.
Metall, 1957, № 12, p.11.
Малиночка Я, Н. //Заводская лаборатория./Я.Н.Малиночка, Н.Г. Осада. 1962. № 3. С.315.
Грабин В. Ф. // Автоматическая сварка./ В.Ф.Грабин. 1961. № 5. С.91.
Сидляренко В. А. //Автоматическая сварка./ В.А.Сидляренко. 1960. № 2. С.88.

К ГЛАВЕ 6

Балтер М.А., Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей
 /С.И. Аксенова, М.А.Балтер, А.П.Любченко .- М.: Машиностроение, 1987 - 160 с.
Каптюг И.С., Шиферный излом и расслоения в стали / А.Я. Голубев , И.С.Каптюг. – М: Металлургия, 1982.- 87 с.
Герасимова Л.П., Изломы конструкционных сталей: справочник / Л.П.Герасимова, А.А.Ежов, М.И. Маресев. - М.: Металлургия, 1987.- 272 с.
Герасимова Л.П., Контроль качества конструкционных материалов / Л.П.Герасимова, Ю.П. Гук. – М.: Интернет Инжиниринг, 2010,- 844 с.
Голография. Методы и аппаратура /Под ред. В.М.Гинзбург, Б.М.Степанова.- М.: Советское радио, 1974.- 376 с.
Г.Г. Голенко. Растровые голограммы с устраненной дискретной структурой
 /Голенко Г.Г.// Техника кино и телевидения 1983. № 8. с. 31-37.
Оптическая голография /под ред.Г. Колфилда ; пер. с англ.- М.:Мир, 1982.- 735 с.
Методы анализа поверхностей; (пер. с англ.) под ред. А.М.Зандермы .-М.: Мир, 1979.- 582 с.

К ГЛАВЕ 7

Лозинский М.Г. Тепловая микроскопия материалов./М.Г.Лозинский – М.: Металлургия, 1976. - 303 с.
Ежов А.А. Разрушение металлов / Л.П.Герасимова, А.А.Ежов, - М.:Наука, 2004. - 400 с.

К ГЛАВЕ 8:

Электронно - зондовый микроанализ; под ред. И.Б.Боровского.- М.: Мир, 1974.- 260 с.
Методы анализа поверхностей: пер. с англ.; под ред.А.М. Зандерны.- М.:Мир, 1979.- 582 с.
Карлсон Т.А. Фотоэлектронная и Оже – спектроскопия /Т.А.Карлсон; пер.с англ.- М.:Машиностроение, 1981.- 431 с.
Дорожкин А.А. Ионная Оже-спектроскопия /А.А.Дорожкин, Н.Н. Петров: Учеб. пособие. -Л. ЛПИ, 1983.
Мусин Р.З. Основы масс-спектроскопии / Р.З.Мусин: учеб. пособие.- Казань: Изд. КТУ , 2000.
Храпковский Г.М. Ядерный магнитный резонанс /Г.М.Храпковский: учеб. пособие.- Казань: Изд. КТУ, 2000.
Дмитриев Ю.И. Физические основы приборостроения. Ядерный магнитный резонанс /
Ю.И.Дмитриев.- СПб.: Изд. СПбГУ, 1999.
Горелик С.С. Рентгенографический и электронно-микроскопический анализ / С.С.Горелик,
 Л.Н.Ростовцев, Ю.А.Скаков: практ. руководство, -М. : Металлургия, 1970.
Циммерман Р.. Металлургия и металловедение: Справочник; пер. с нем. / К.Гюнтер , Р.Циммерман. - М.: Металлургия. 1982.- 479 с.
Батаев В.А.. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей / А.А. Батаев , В.А.Батаев: учеб. пособие.- М.: Изд. Флинта, 2007.- 217 с.
Батырев В.А. Рентгеноспектральный электрозондовый микроанализ. /В.А.Батырев._ – М.: Металлургия, 1992. – 151 с.
Физические методы исследования металлов и сплавов; учеб. пособие. – изд-во ЮУрГУ, 2003.- 164 с.
Физика металлов: физические методы исследования; учеб. пособие; состав. Е.В.Новиков и др.: - СПб.: ГПУ, 2005, - 110 с.

- Уманский Я.С.** Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / А.Н. Иванов, Ю.А. Скаков, Я.С. Уманский и др. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
- Томас Л.** Просвечивающая электронная микроскопия материалов / М. Гориндж, Л. Томас. – М.: Наука, 1983. – 352 с.
- Практическая растровая электронная микроскопия;** пер. с англ.; под ред. Д. Гоулдстейна, Х. Яковица. – М.: Мир, 1978. – 656 с.
- Практические методы в электронной микроскопии;** под ред. О.М. Глоэра. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
- Гусев А.И.** Нанокристаллические материалы / А.И. Гусев, А.А. Ремпель. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
- Валиев Р.З.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / И.В. Александров, Р.З. Валиев. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
- Пул Ч.** Нанотехнологии / Ф. Оуэнс, Ч. Пул. М.: Техносфера, 2004. – 328 с.
- Николаев А.К.** Нанотехнологии в металлургии / Г.В. Ашихмин, А.К. Николаев, Ю.Н. Райков. – М.: Институт Цветметобработка, 2007. – 112 с.
- Рыжонков Д.И.** Ультрадисперсные системы: получение, свойства, применение / Э.Л. Дзидзигури, В.В. Левина, Д.И. Рыжонков. – М.: МИСИС, 2006. – 182 с.
- Humphreys F.J.** // J. of materials Science. 2001. V.36. P.3833-3854.
- Kunze K., et al.** // Textures and microstructures. K. Kunze, S.L. Wright. 1993. V.20. P.41-54.
- Hill R.I.** // Applied Crystallography. Proc. of XVII Int. Publishing Co. 1998. P.65-86.
- Шелехов Е.В.** / МИТОМ, 2000, №8 С.16-20.
- Попов В.А.** Нанопорошки в производстве композитов / А.Г. Кобелев, В.А. Попов, В.Н. Чернышов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2007. – 336 с.
- Рыбалкина М.А.** Нанотехнология для всех / М.А. Рыбалкина. – М. 2005. 434 с.
- Ягодкин Ю.Д.** Применение электронной микроскопии и рентгеновского анализа для определения размеров структурных элементов в нанокристаллических материалах / С.В. Добаткин, Ю.Д. Ягодкин // Заводская лаборатория. 2007. №1. С.38.
- Матвиенко Ю.Г.** Деформирование и разрушение наноматериалов на микро- и наномасштабных структурных уровнях / Ю.Г. Матвиенко // Заводская лаборатория. 2007. С.83.
- Лякишев Н.П.** Объемные наноматериалы конструкционного назначения / М.И. Алымов, С.В. Добаткин, Н.П. Лякишев // Металлы. 2003. № 3. С. 3 – 16.
- Новые материалы.** Сб. статей; под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСиС, 2002.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	2
Глава 1. Изготовление шлифов	
1.1 Подготовка образцов для шлифов	3
1.2 Шлифование	4
1.3 Полирование	5
1.4 Практические рекомендации по изготовлению шлифов из конструкционных материалов	7
1.5 Практические рекомендации по изготовлению специальных шлифов	10
Глава 2 Выявление структуры металлов и сплавов	
2.1. Задачи металлографических исследований	21
2.2. Методы выявления структуры	22
2.3 Методы микроскопического исследования	32
2.4 Методы электронно-микроскопических исследования	34
2.5 Характерные микроструктуры основных конструкционных металлов	36
2.6 Методы количественной оценки структуры	38
Глава 3 Наиболее употребляемые реактивы для выявления структуры черных металлов и сплавов химическим и электрохимическим травлением	
3.1. Химическое травление	43
3.1.1 Углеродистые и низколегированные стали	43
3.1.2 Сложнолегированные стали	49
3.1.3 Быстрорежущие стали	53
3.1.4 Нержавеющие стали	55
3.1.5 Вольфрамовые стали	58
3.1.6 Кремнистые стали	59
3.1.7 Марганцовистые стали	61
3.1.8 Молибденовые стали	63
3.1.9 Никелевые стали	64
3.1.10 Хромистые стали	65
3.1.11 Ликвация и сегрегация примесей в сталях	68
3.1.12 Включения в сталях	70
3.1.13 Поверхностное упрочнение сталей	73
3.1.14 Электроискровая обработка стали	73
3.1.15 Чугуны	74
3.1.16 Твердые сплавы	77
3.1.17 Покрытия на сталях	78
3.1.18 Упрочняющие слои на сталях	79
3.1.19 Сварные и паяные соединения сталей	80

3.2 Электролитическое травление	81
3.2.1 Стали	81
3.2.2 Чугуны	82

Глава 4. Наиболее употребляемые реактивы для выявления структуры цветных металлов и сплавов химическим и электрохимическим травлением

ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

4.1 Легкие цветные металлы	83
4.2 Тяжелые цветные металлы	90
4.3 Малые цветные металлы	102
4.4 Благородные цветные металлы	109
4.5 Редкие цветные металлы	111
4.6 Радиоактивные металлы	113
4.7 Сварные и паяные соединения цветных металлов	113
4.8 Твердые и спеченные сплавы	114

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

4.9 Цветные сплавы	115
--------------------	-----

Глава 5. Стандартные металлографические методы контроля

5.1 Метод определения микроструктуры стали	119
5.2 Методы определения неметаллических включений в стали	120
5.3 Методы определения величины зерна в сталях и сплавах	122
5.4 Метод оценки микроструктуры листов и лент из сталей	124
5.5 Методы определения структуры отливок из чугуна	124
5.6 Методы определения ферритной фазы в прутках из аустенитной стали	125
5.7 Методы оценки макроструктуры проката из сталей	125
5.8 Методы оценки макроструктуры жаропрочных сплавов	127
5.9 Методы определения глубины обезуглероженного слоя в сталях	128
5.10 Метод определения коррозионных поражений металлических материалов	130
5.11 Метод определения газовой пористости в литейных алюминиевых сплавах	131
5.12 Метод определения эрозии паяемого материала	131
5.13 Метод выявления и определения толщины прослойки химических соединений в паяных соединениях	132

Глава 6. Фрактографические методы исследований

6.1 Методы исследования изломов	133
6.1.1 Очистка поверхности изломов и их консервация	133
6.1.2 Фотографирование изломов	135
6.1.3 Оптические методы исследования строения изломов	139
6.1.4 Изучение микроскопического строения изломов	140

Глава 7. Метод температурной металлографии

7.1 Возможности и преимущества метода	145
7.2 Методики проведения исследований металлических материалов при термдеформационном воздействии	146
7.2.1 Аппаратура	146
7.2.2 Образцы для исследования	148
7.2.3 Методы измерения локальной деформации	150
7.2.4 Способы нагрева образцов	151
7.3 Методические особенности исследования процессов деформирования и разрушения образцов	152
7.3.1 Процессы деформирования и разрушения с различными скоростями растяжения в условиях нагрева и охлаждения на установках температурной микроскопии	152
7.3.2 Процессы деформирования и разрушения в условиях знакопеременного изгиба при комнатной и повышенных температурах	155
7.3.3 Измерение микротвердости при нагреве и одновременном действии растягивающих напряжений на плоских образцах в условиях нормальной и повышенных температур	156
7.3.4 Особенности фиксации процессов пластической деформации и зарождения трещин с помощью киносъемки	157
7.3.5 Исследование макроструктуры в условиях термдеформационных испытаний	157
7.4 Особенности пластической деформации и разрушения сварных соединений	158
7.5 Сочетание метода температурной металлографии с другими методами исследования структуры металлов	161

Глава 8. Основные физические методы исследования металлов

8.1 Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА)	164
8.2 Оже-электронная спектроскопия (ОЭС)	165
8.3 Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА)	166
8.4 Масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ)	166
8.5 Оптический эмиссионный спектральный микроанализ (ОСЭМА)	166
8.6 Ядерный гамма-резонанс (ЯГР)	168
8.7 Другие физические методы	168
8.7.1 Методы определения плотности	168
8.7.2 Рентгеноструктурный анализ	169
8.7.3 Дилатометрический анализ	170
8.8 Методы исследования металлических наноматериалов	170

Приложения

1. Методы исследования неметаллических включений в сталях	173
2. Примеры стандартных технологических задач, решаемых методами металлографии и фрактографии с применением дополнительных современных методов исследований	191
3. Госты и ИСО, позволяющие дополнительно оценивать качество металла и металлопродукции	198

Рекомендуемые библиографические списки к главам	207
Рисунки к главам	208

Рисунки к Главе 2

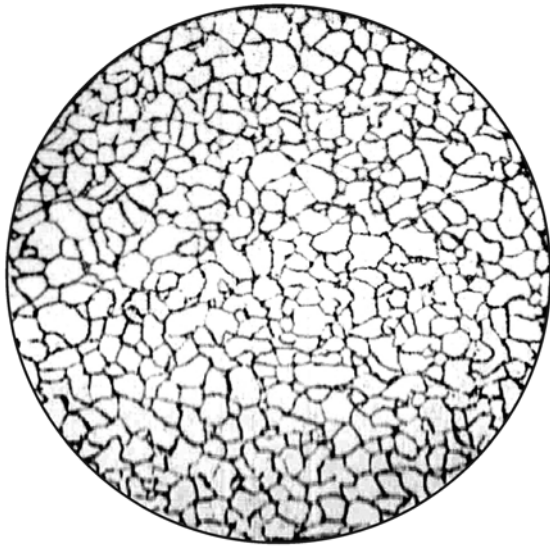


рис 2.1 Микроструктура феррита. X 100

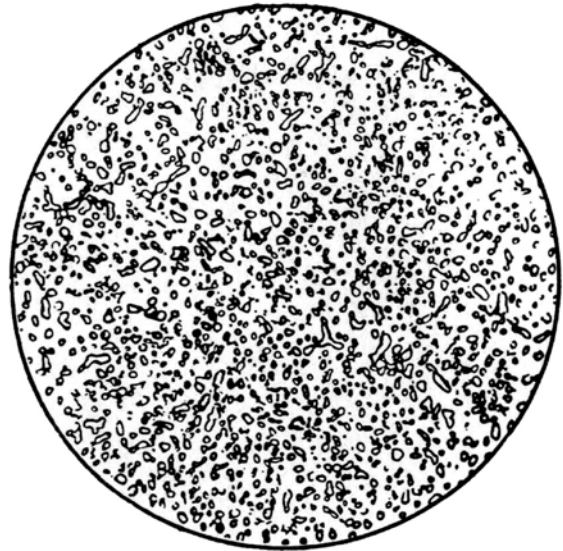


рис 2.2 Микроструктура доэвтектоидной стали с 0,6 % C: перлит зернистый. x 100



рис 2.3 Микроструктура заэвтектоидной стали с 1 % C: перлит пластинчатый. x1000

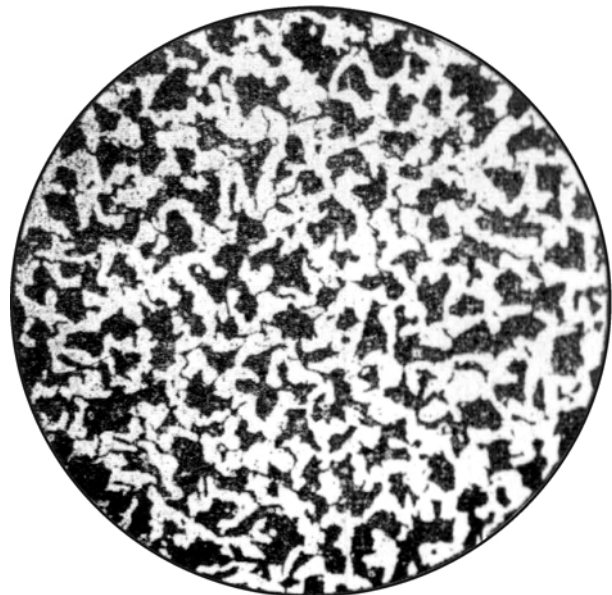


рис 2.4 Микроструктура доэвтектоидной стали с 0,6 % C: смесь 50 % феррита + 50 % перлита (светлые поля – феррит, темные – перлит). x200

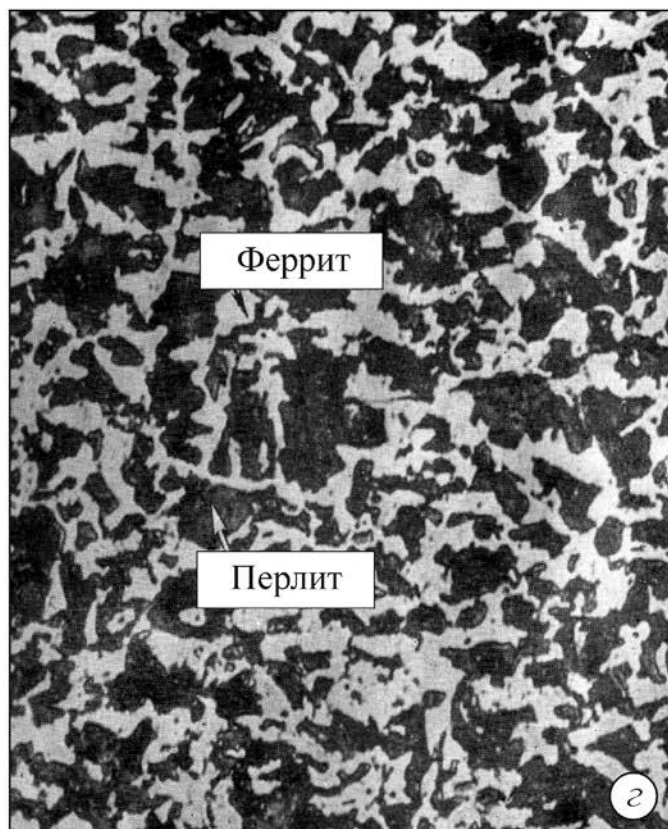
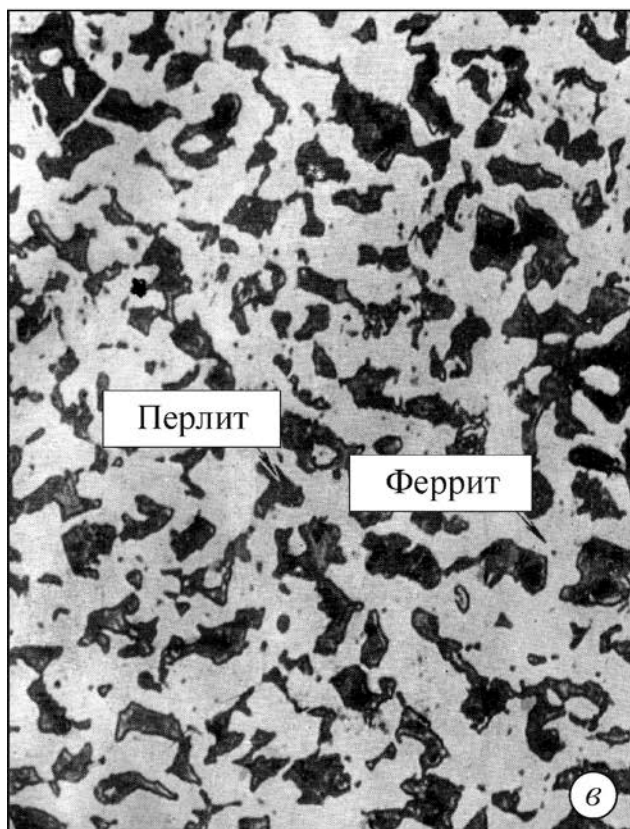
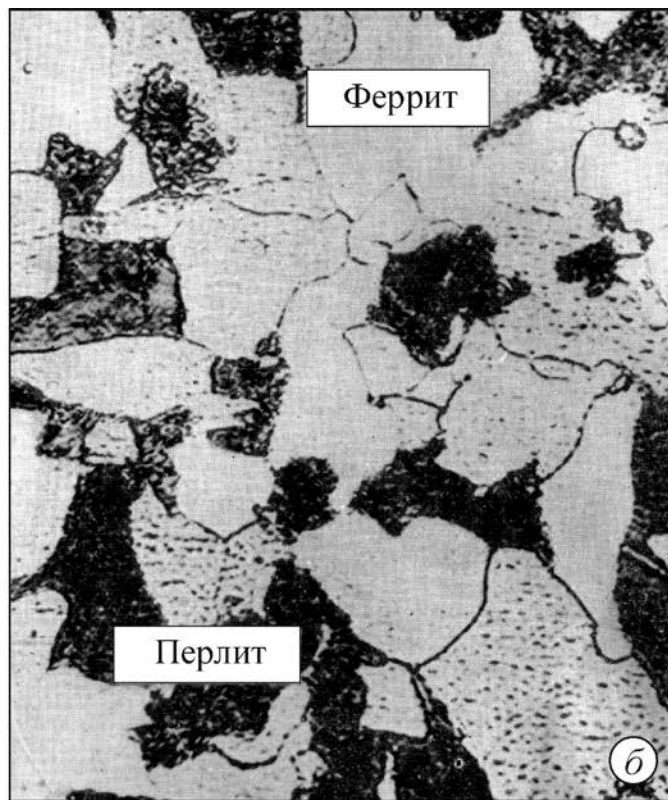
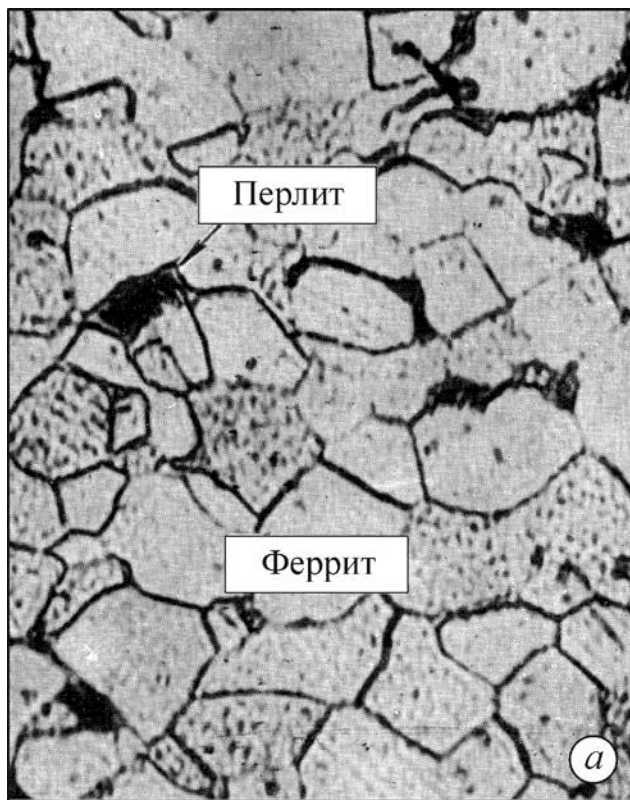


рис 2.5 Микроструктура стали:

а – с 0,1 % С; б – с 0,2 % С; в – с 0,3 % С;

г – с 0,4 % С (светлые поля – феррит, темные – перлит)

д – с 0,6% С (темные поля – перлит, светлая сетка – феррит);

е – с 1,2 % С (темные поля – перлит, светлая сетка – цементит). x200

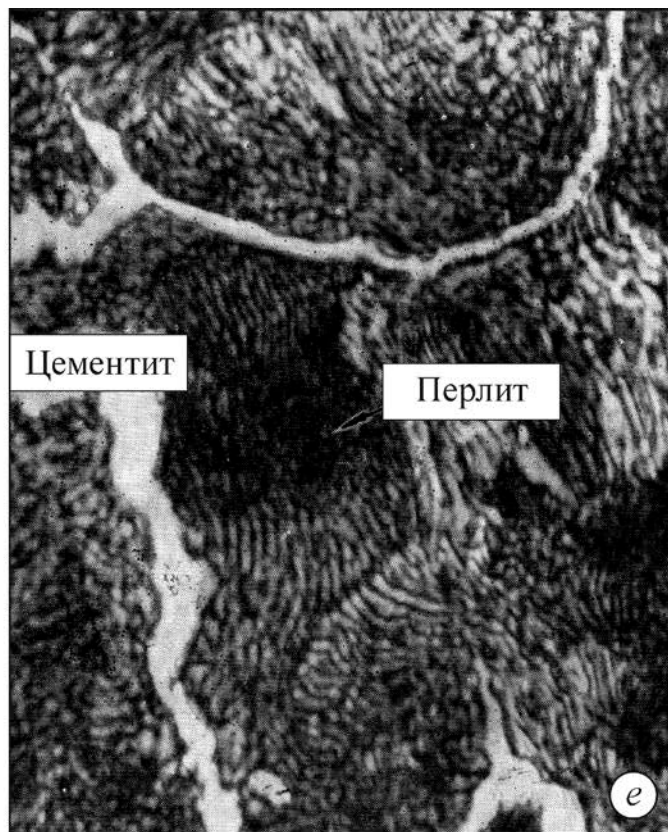
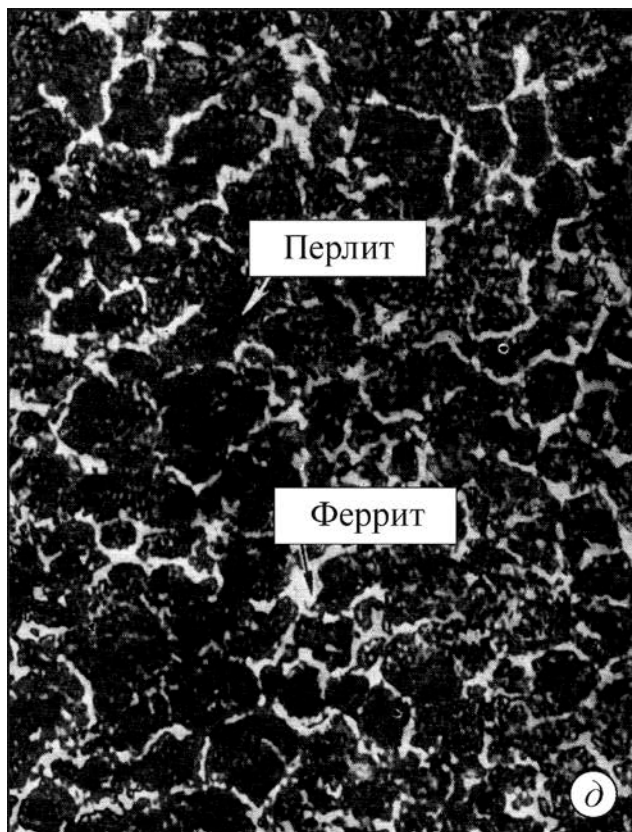


рис 2.5 (Продолжение)

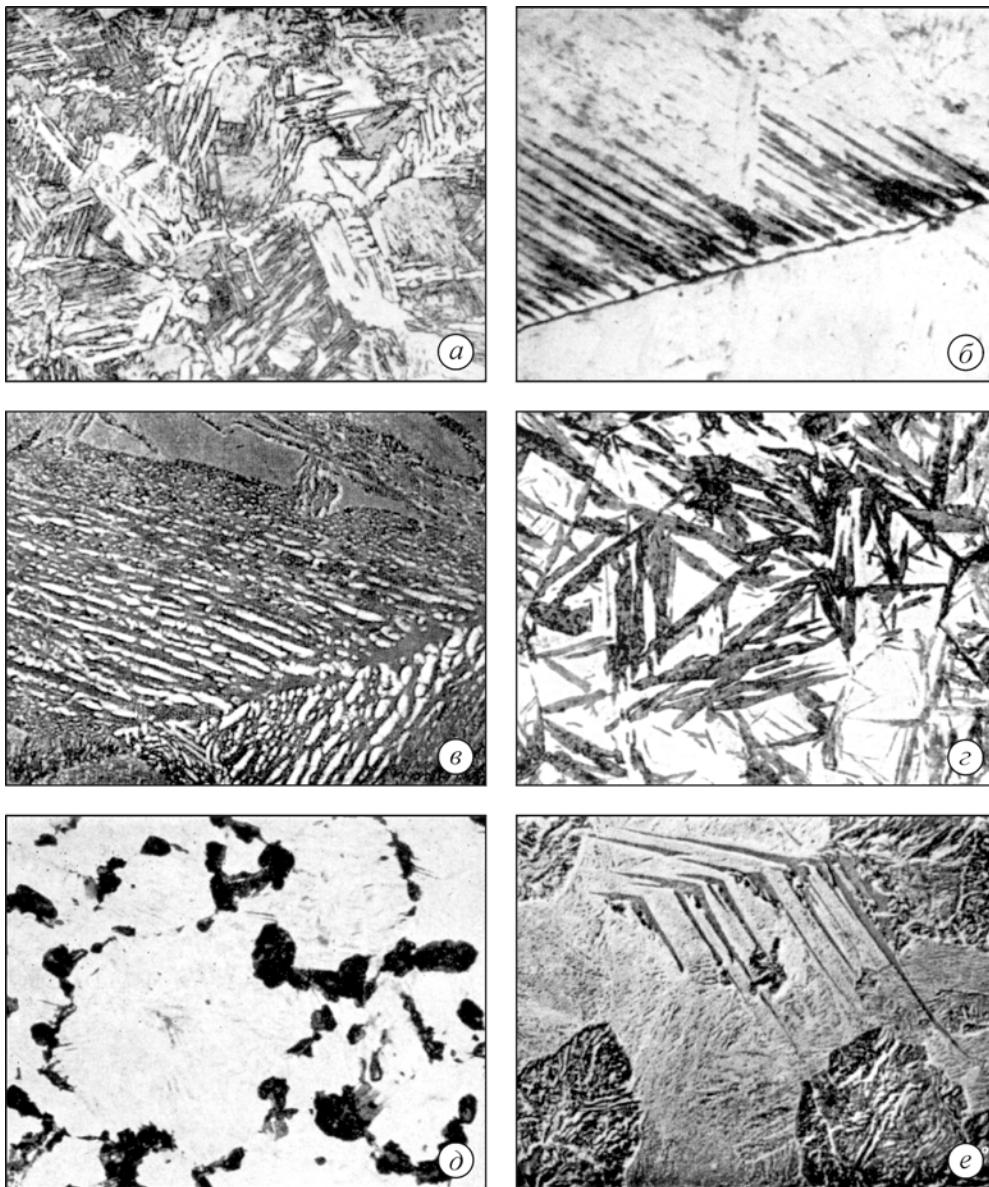


рис 2.6 Микроструктура марганцовистой стали:

а – с 0,2 % С, х500; б – с 0,6 % С, х2000; в – с 0,8 % С, х 5000 (верхний бейнит);

г – с 0,6 % С, х500 (нижний бейнит); д – с 0,6 % С, х500 (троостит); е – с 0,6 % С. х5000 (троостит)

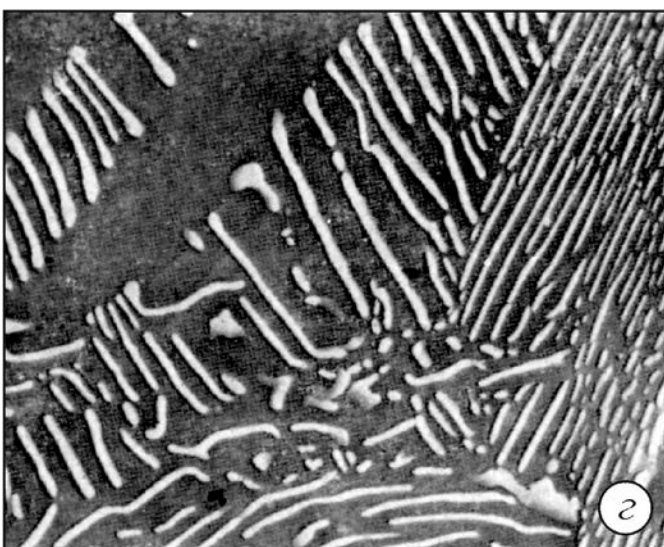
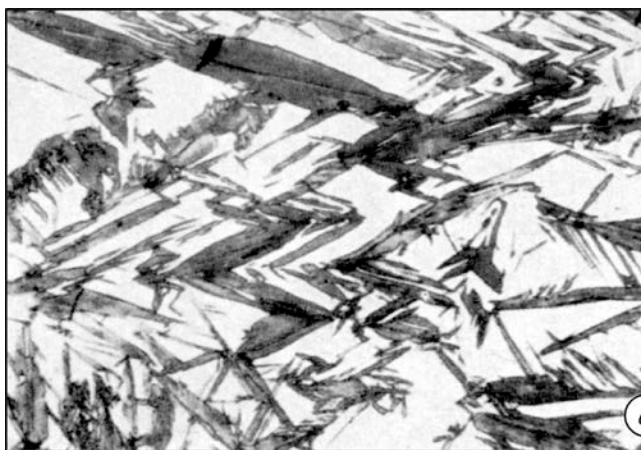


рис 2.7 Микроструктура стали:
а, б – железоникелевая с 0,6 % С (100% мартенсита);
в, г – углеродистая с 0,4 % С (видманштеттова структура);
а – $\times 500$; б – $\times 20000$; в – $\times 100$; г – $\times 5000$

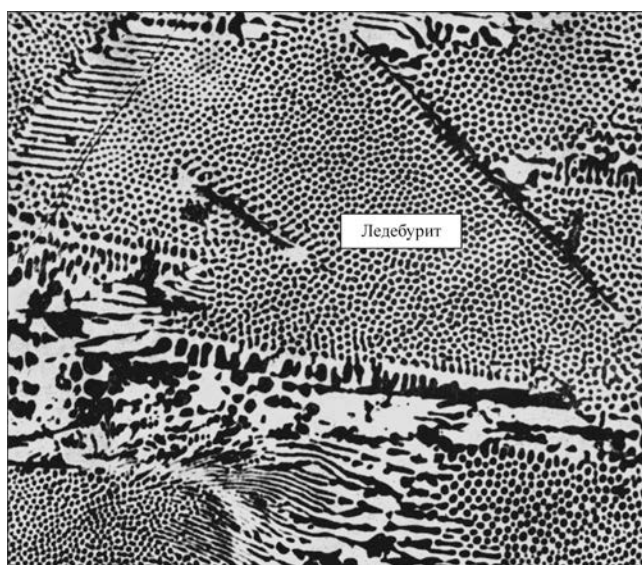


рис 2.8 Микроструктура заэвтектоидной стали (ледобурит):
Эвтектика из округлых темных включений перлита, расположенных в светлой цементитной основе. $\times 500$

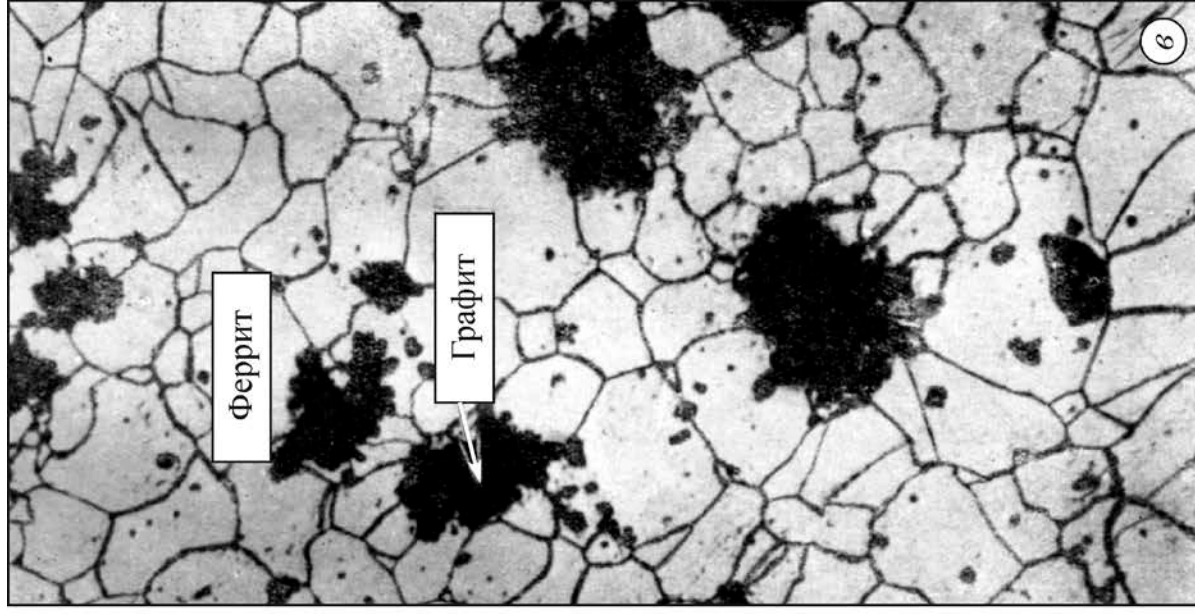
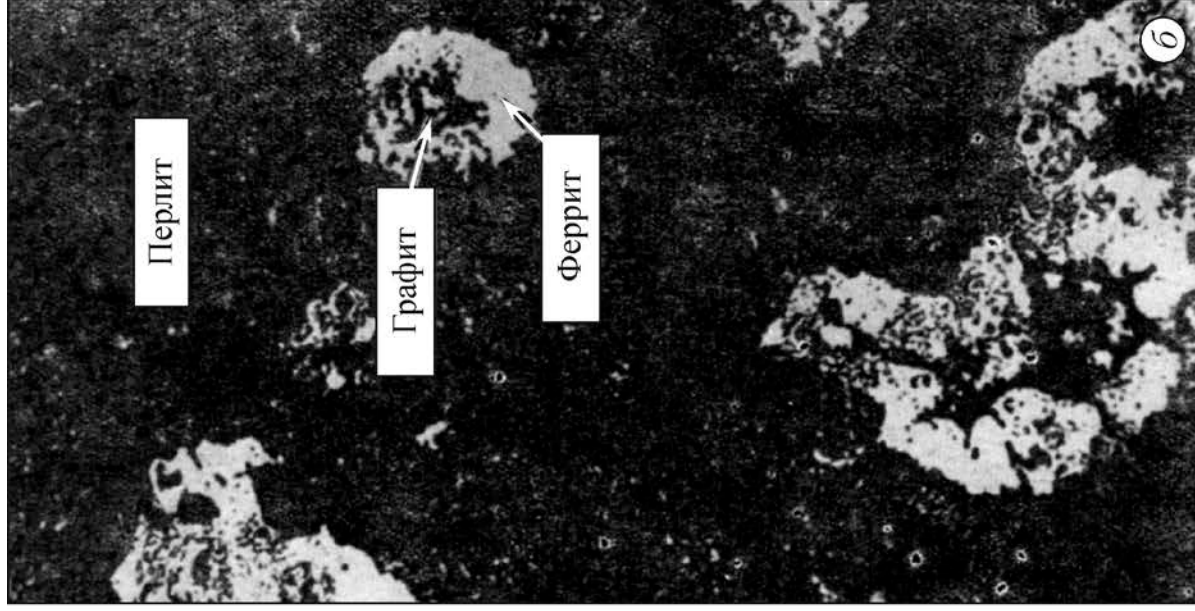
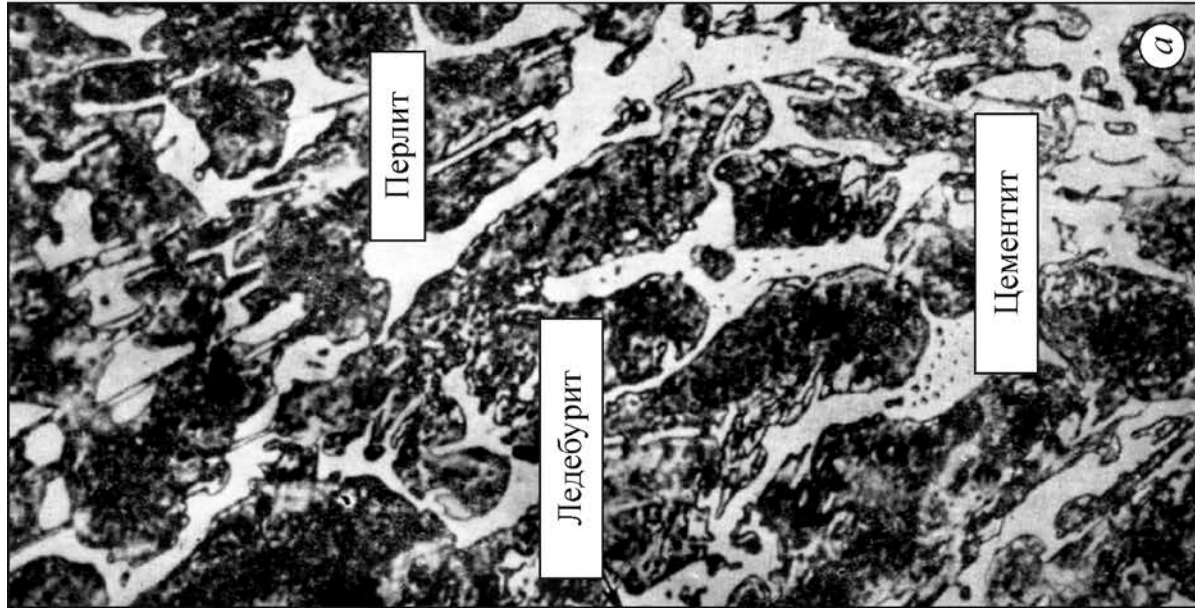


рис 2.9 Микроструктура ковкого чугуна:
 а – до отжига (белый доэвтектический чугун), б – после отжига (после первой стадии графитизации);
 в – после отжига (после второй стадии графитизации). х 250

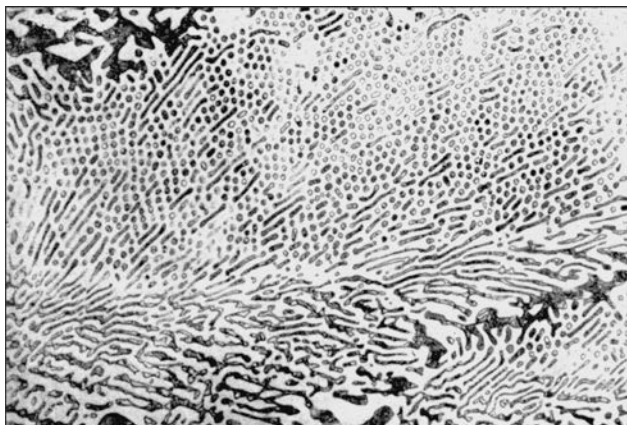
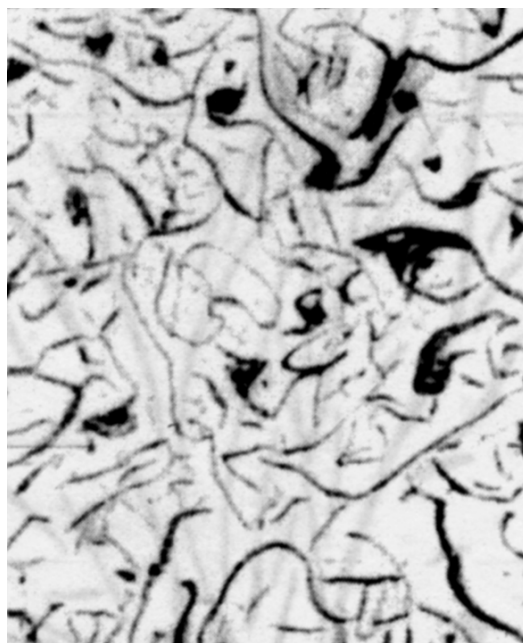


рис 2.10 Микроструктура эвтектического белого чугуна с 4,3 % С, х500



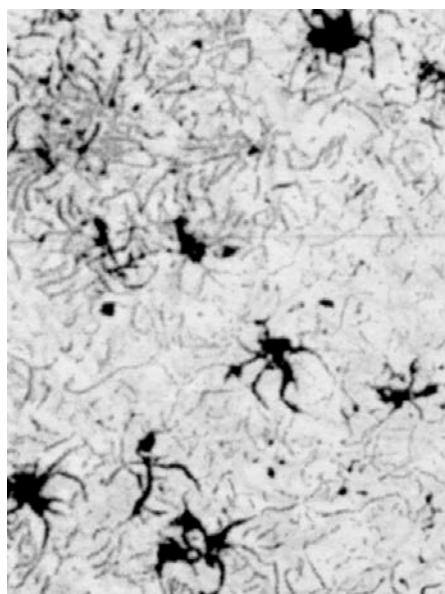
а



б



в



г

рис 2.11 Форма включений графита в чугуне х100:

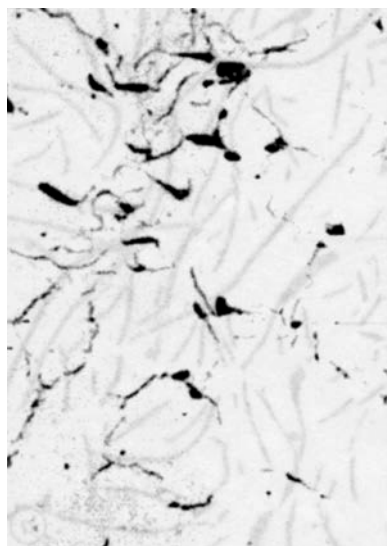
а – пластинчатая прямолинейная; б – пластинчатая завихренная;

в – игольчатая; г – гнездообразная; д – веточное строение;

е - сетчатое строении; ж – розеточное строение; з – междендритное точечное



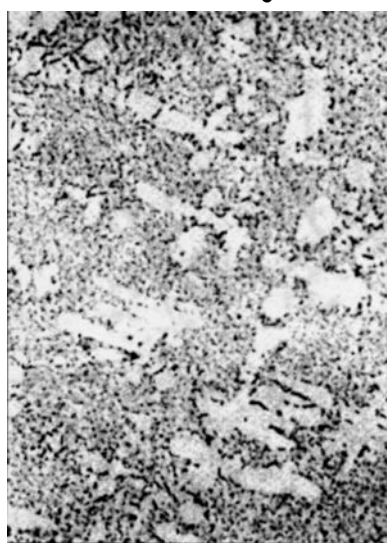
д



е



ж



з



и

рис 2.11 (продолжение)

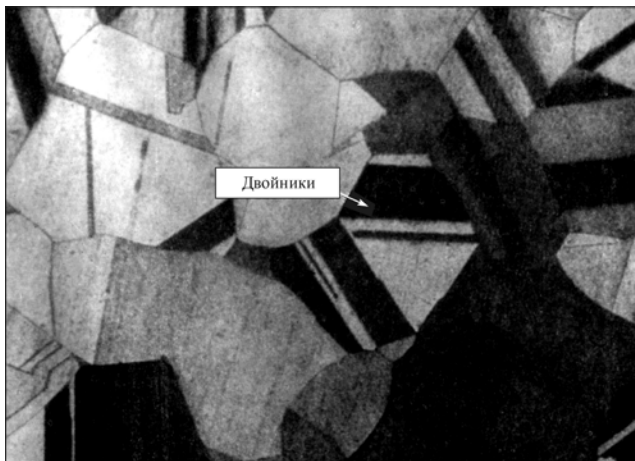


рис 2.12 Микроструктура α - латуни x 250

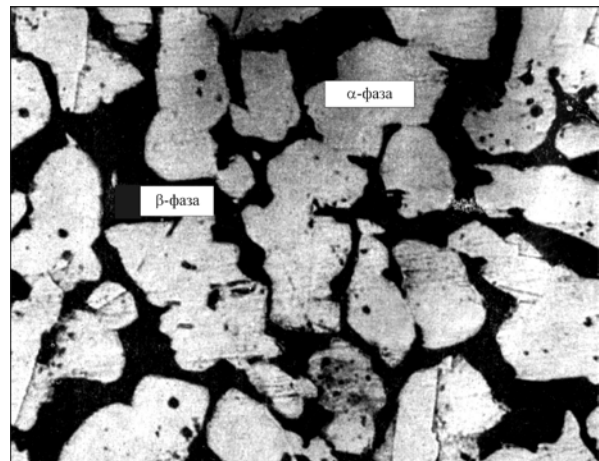


рис 2.13 Микроструктура $\alpha + \beta$ латуни x 250

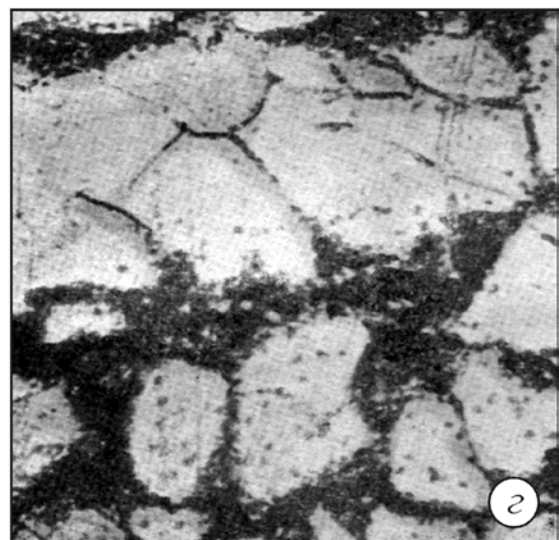
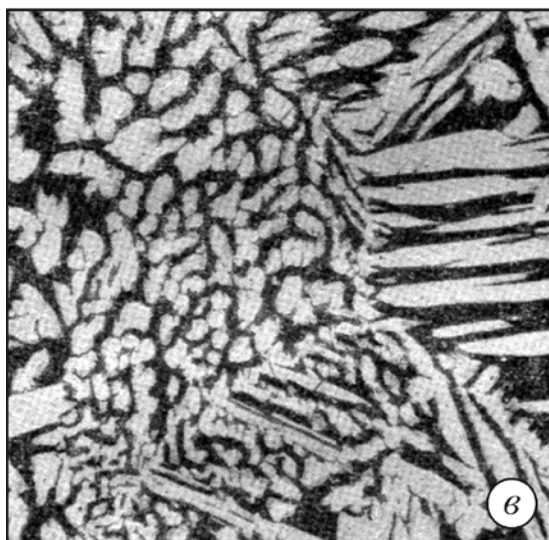
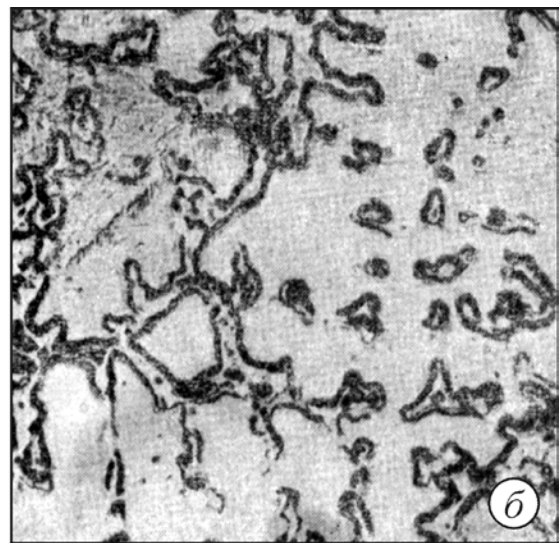


рис 2.14 Микроструктура бронзы:

а – оловянисто - свинцовая; полиэдрическая структура с двойниками рекристаллизации x130;

б – оловянисто - свинцовая; в основной массе твердого раствора между осями дендритов расположены участки, богатые оловом, более темного цвета и черные выделения свинца x240;

в – алюминиевая; светлые выделения α - фазы и эвтектид $\alpha + \gamma$ (темные участки) x5;

г – алюминиевая; светлые участки - α - твердый раствор, темные – распавшийся β – раствор x520

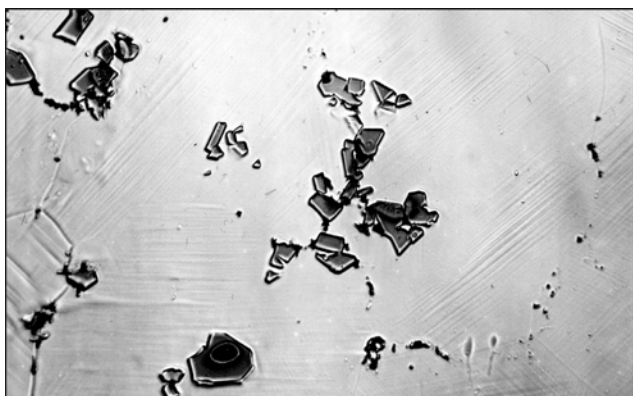


рис 2.15 Микроструктура литого алюминиевого сплава Al -9,5 % Mg -0,1 % Ti -0,1 % Zr на фоне α - твердого раствора видны крупные частицы первичных интерметаллических фаз Al_3Ti и Al_3Zr x500

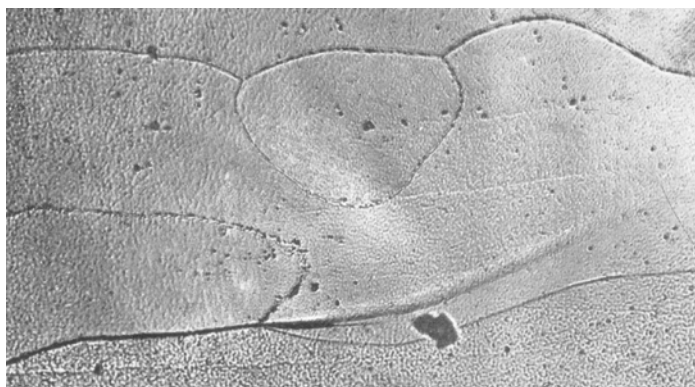


рис 2.16 Микроструктура деформируемого алюминиевого сплава B93 (системы Al-Zn-Cu-Mg) x500

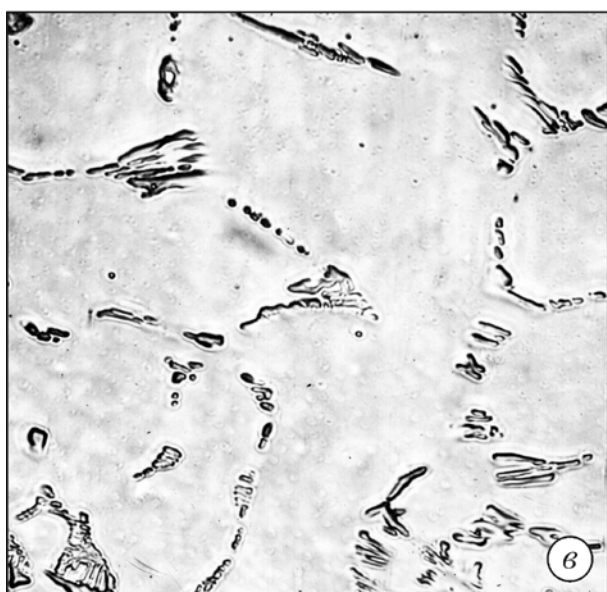
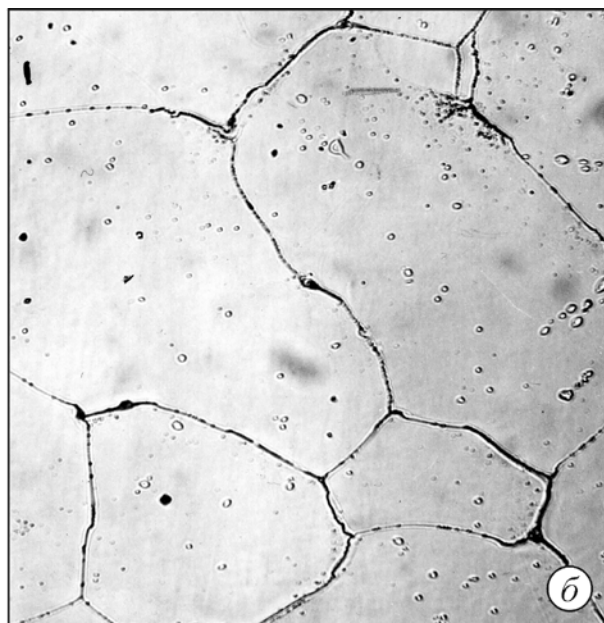
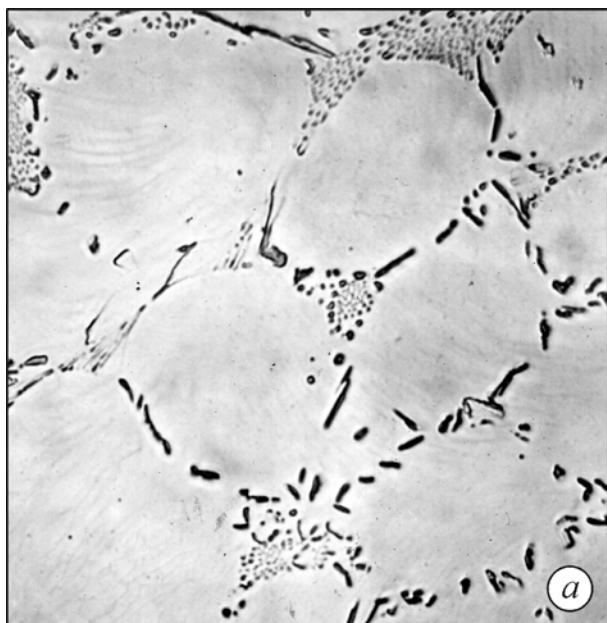


рис 2.17 Микроструктура литейного магниевого сплава МЛ10:
а – литое состояние,
б – закаленное и состаренное,
в – закаленное и отожженное x500

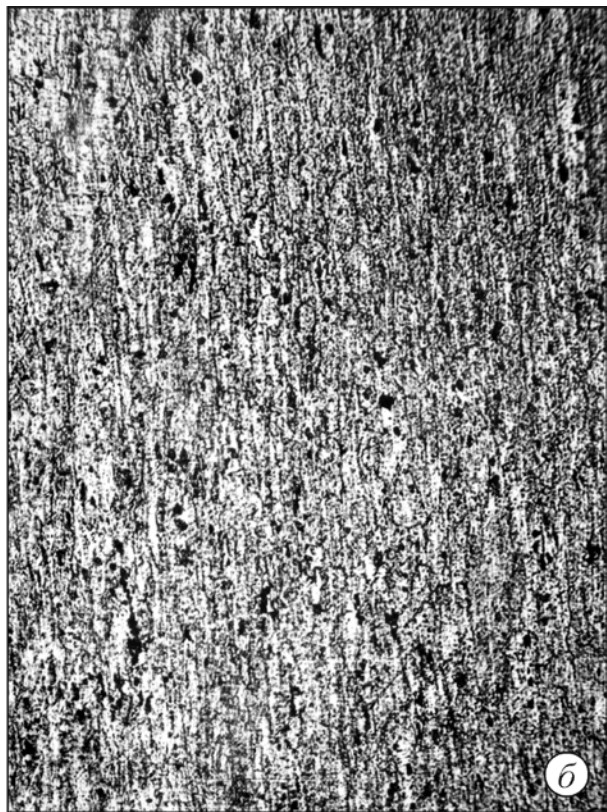
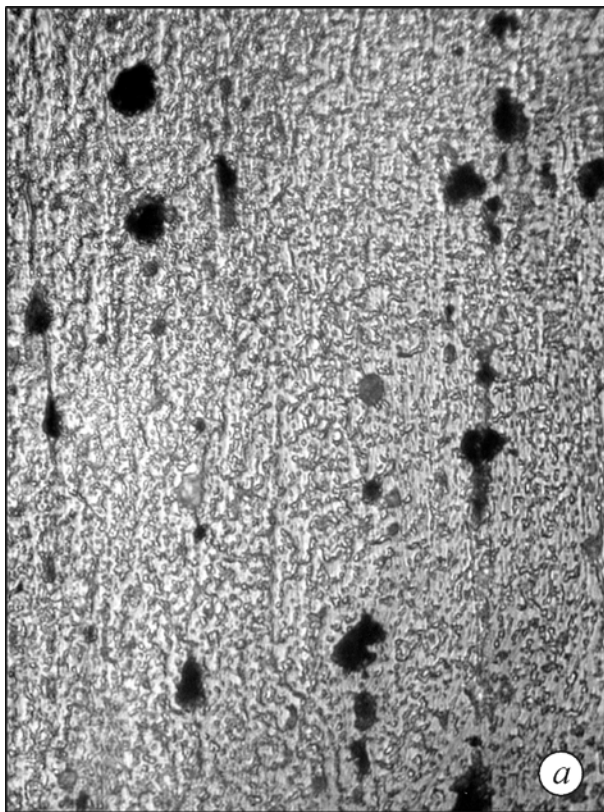


рис 2.18 Микроструктура деформируемого магниевого сплава сплав МА20 после отжига 250 °С (лист толщиной 2 мм) –х500

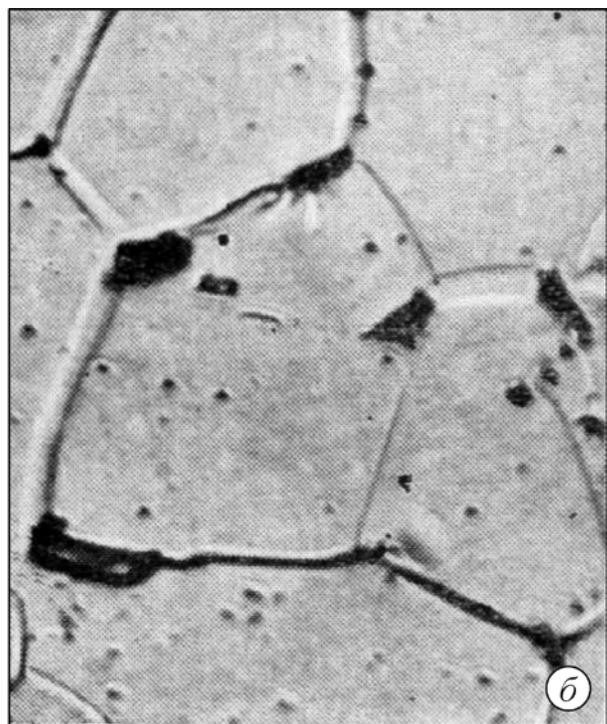
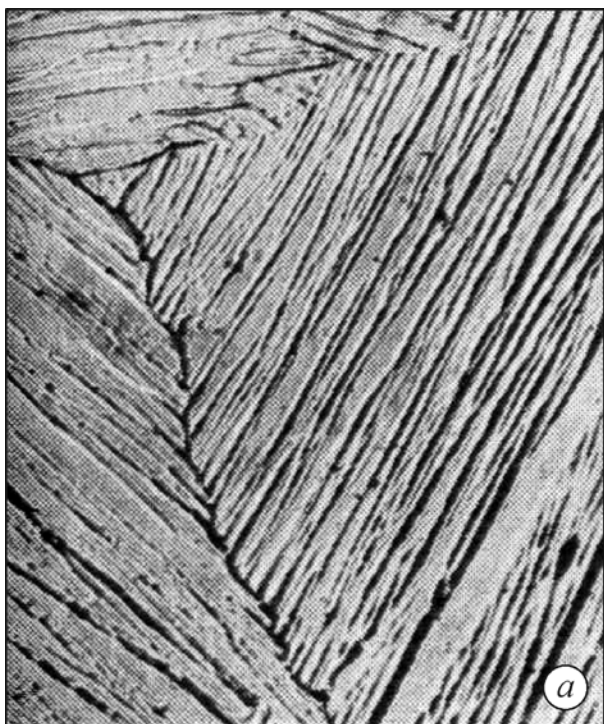


рис 2.19 Микроструктура сплава ВТ5 с пластинчатой (а) и полиэдрической (б) α -фазой х200

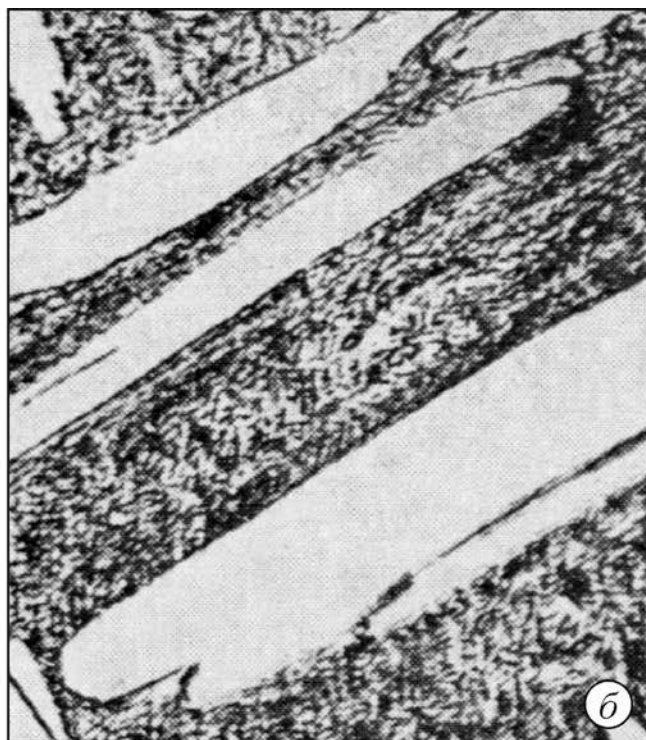


рис 2.20 Микроструктура сплава ВТ3-1 после закалки на мартенсит и отпуска в течение 5 ч. при 650 °С: а – х500; б – х1000

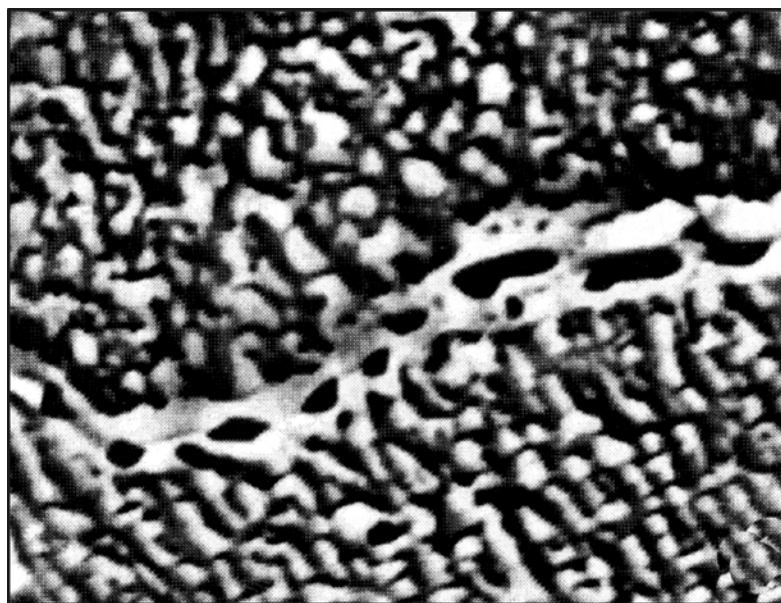


рис 2.21 Микроструктура литого никелевого сплава ЖС6У х500

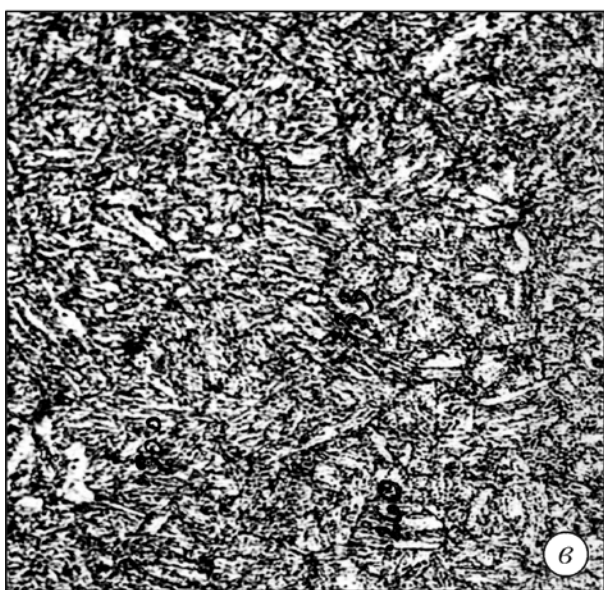


рис 2.22 Микроструктура сварного соединения проката толщиной 40 мм из стали 30Х2Н2М:
а – зона сплавления; б – зона термического влияния; в – основной металл х600

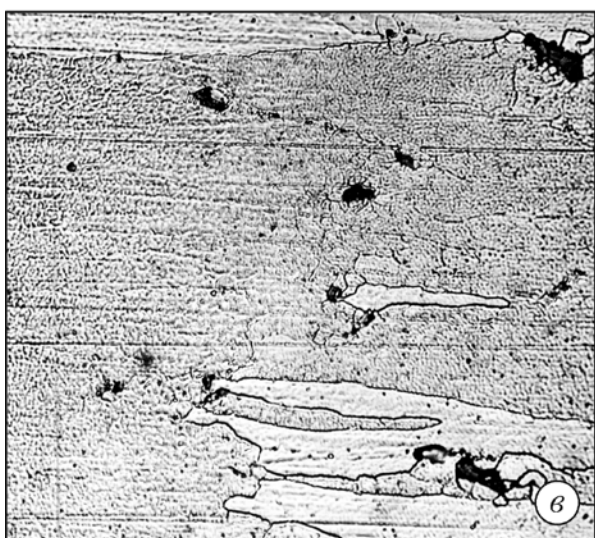
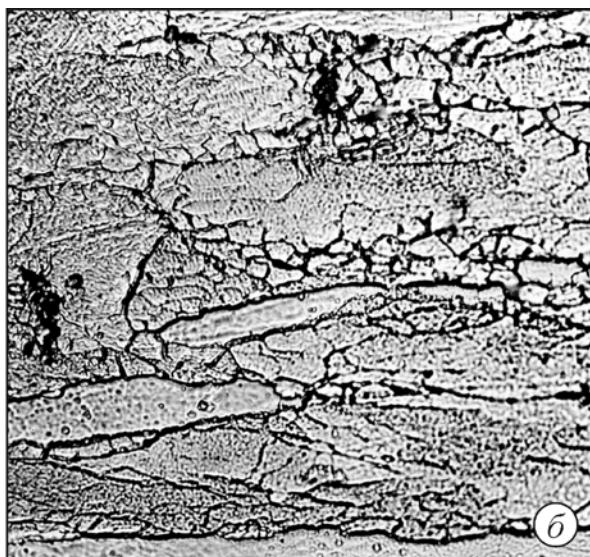
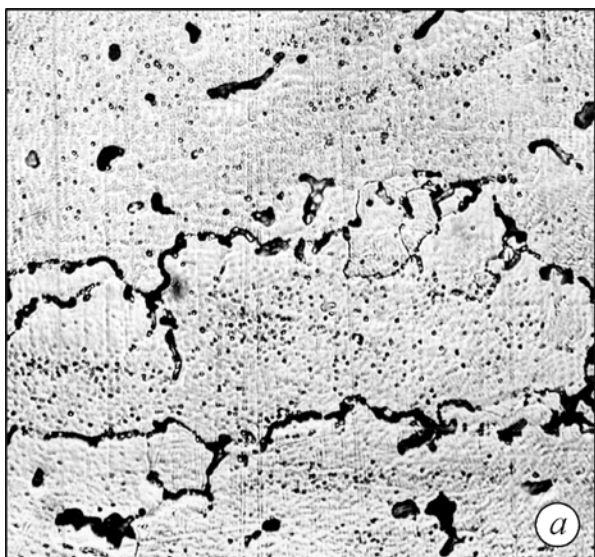


рис 2.23 Микроструктура сварного соединения проката толщиной 40 мм из алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg (сплав В92):
а – сварной шов; б – зона сплавления; в – зона термического влияния х 600

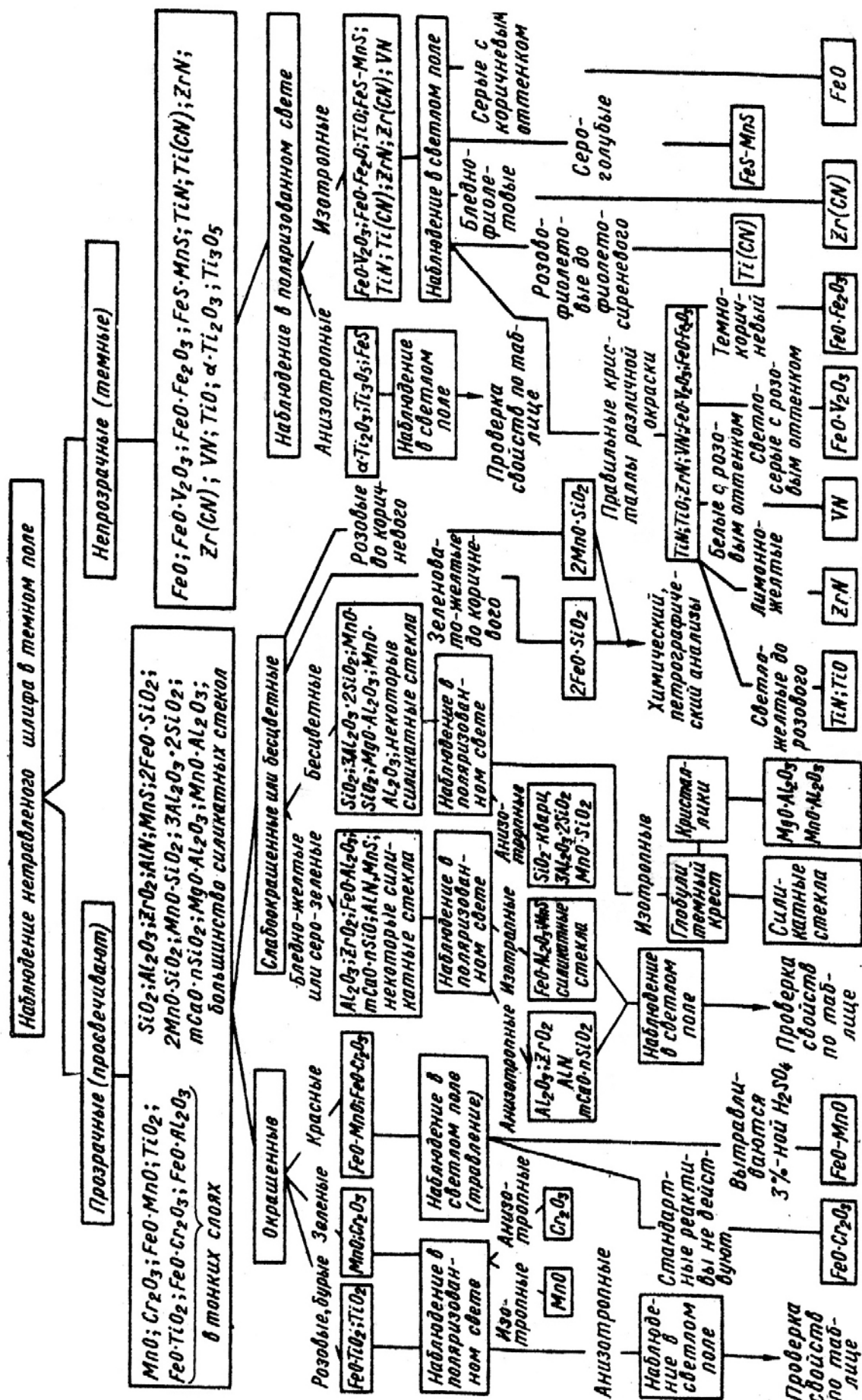


рис 2.24 Схема изучения неметаллических включений

Рисунки к Главе 5

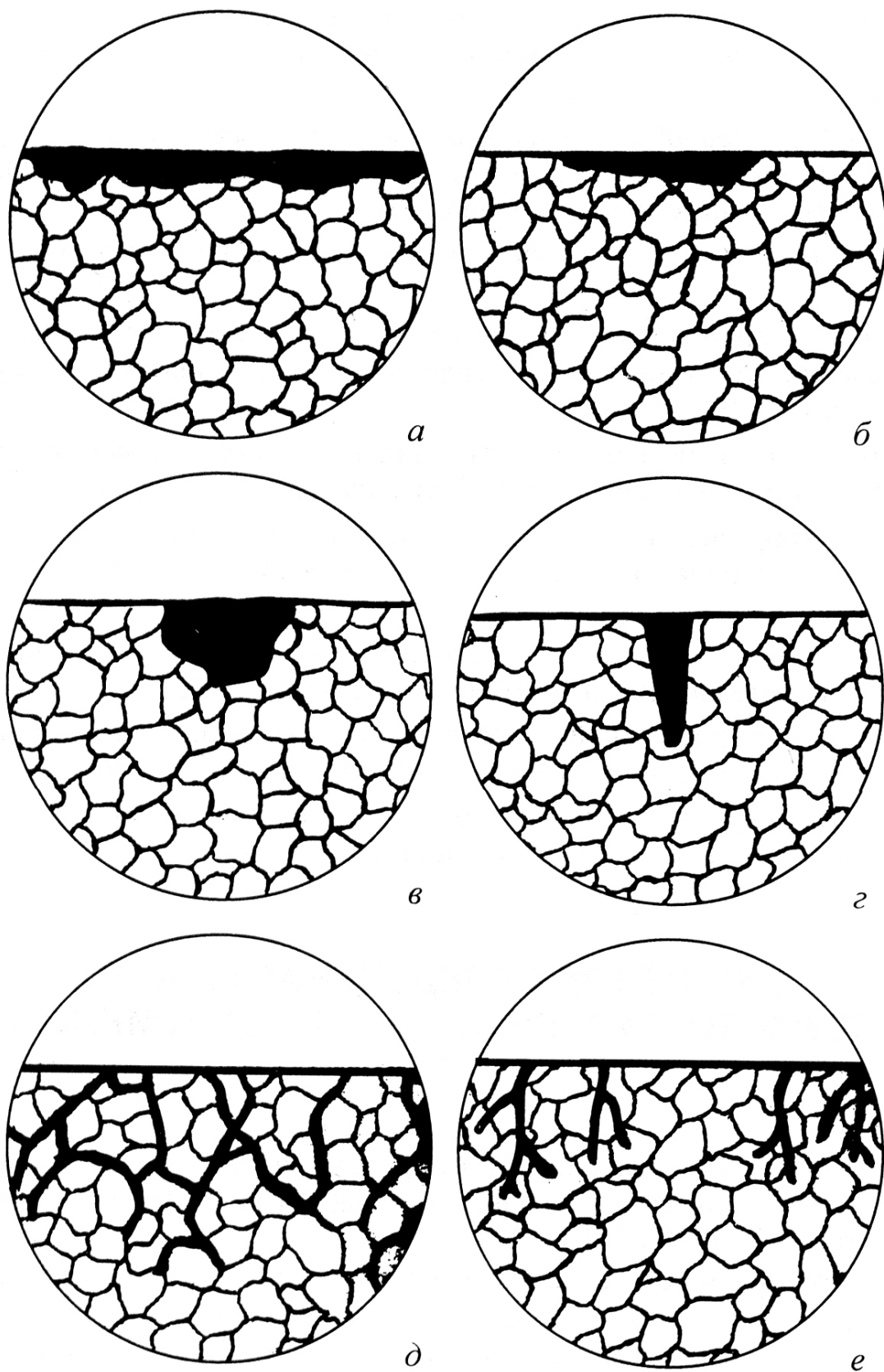


рис 5.1 Схемы некоторых видов коррозионных поражений:
а – сплошная (равномерная) коррозия; б – коррозия пятнами;
в – коррозионная язва; г – питтинговая коррозия;
д – межкристаллическая коррозия; е – транскристаллическая коррозия

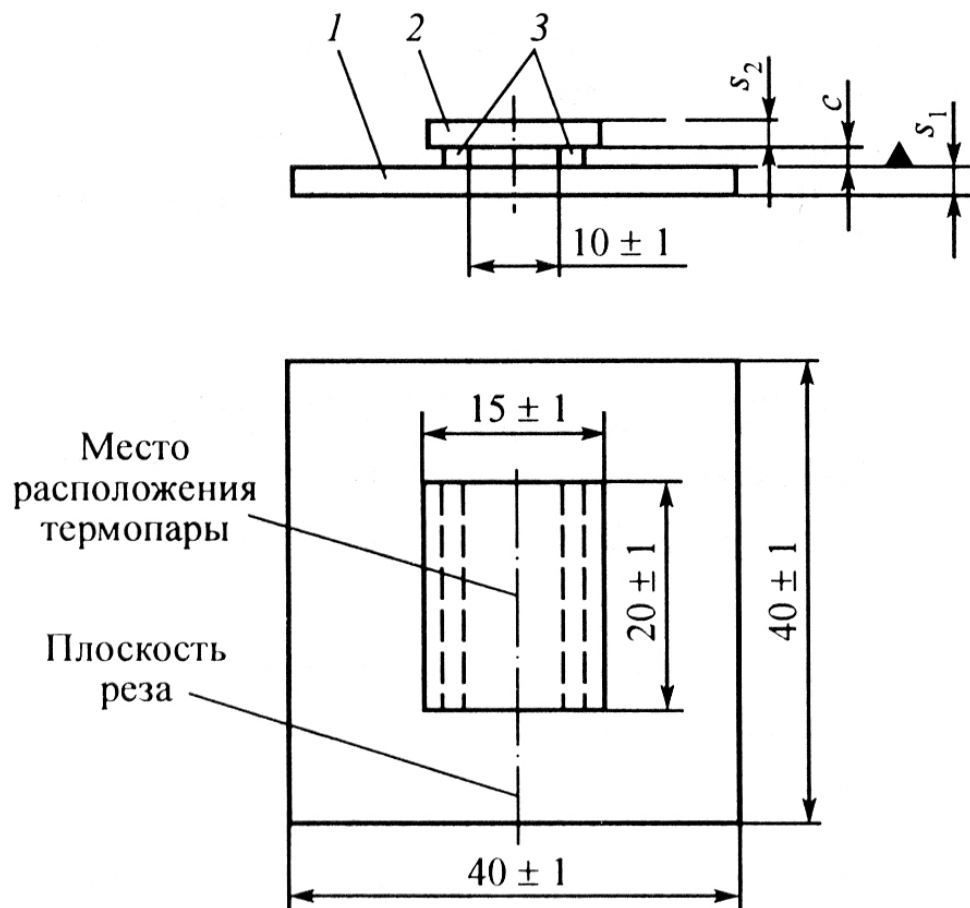


рис 5.2 Форма и размеры паяемых внахлестку или луженых образцов

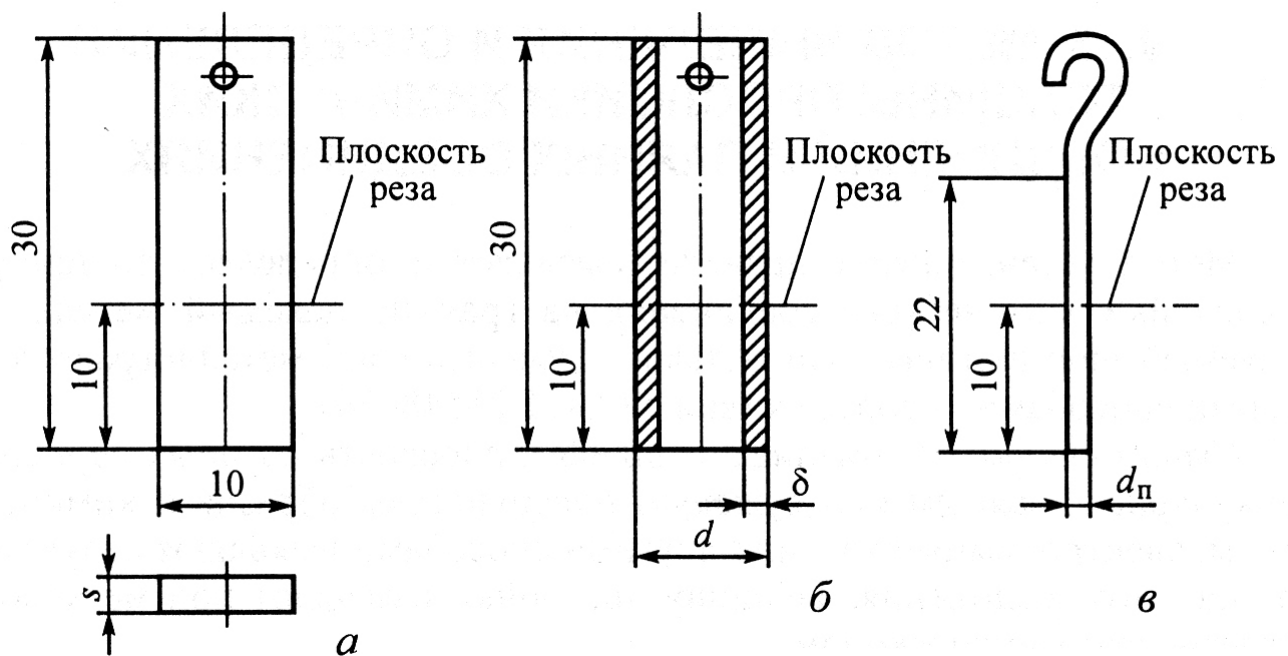


рис 5.3 Форма и размеры образцов для воспроизведения условий лужения или пайки погружением: а – образец из полосы, б – образец из трубы, в – образец из проволоки

Рисунки к Главе 6

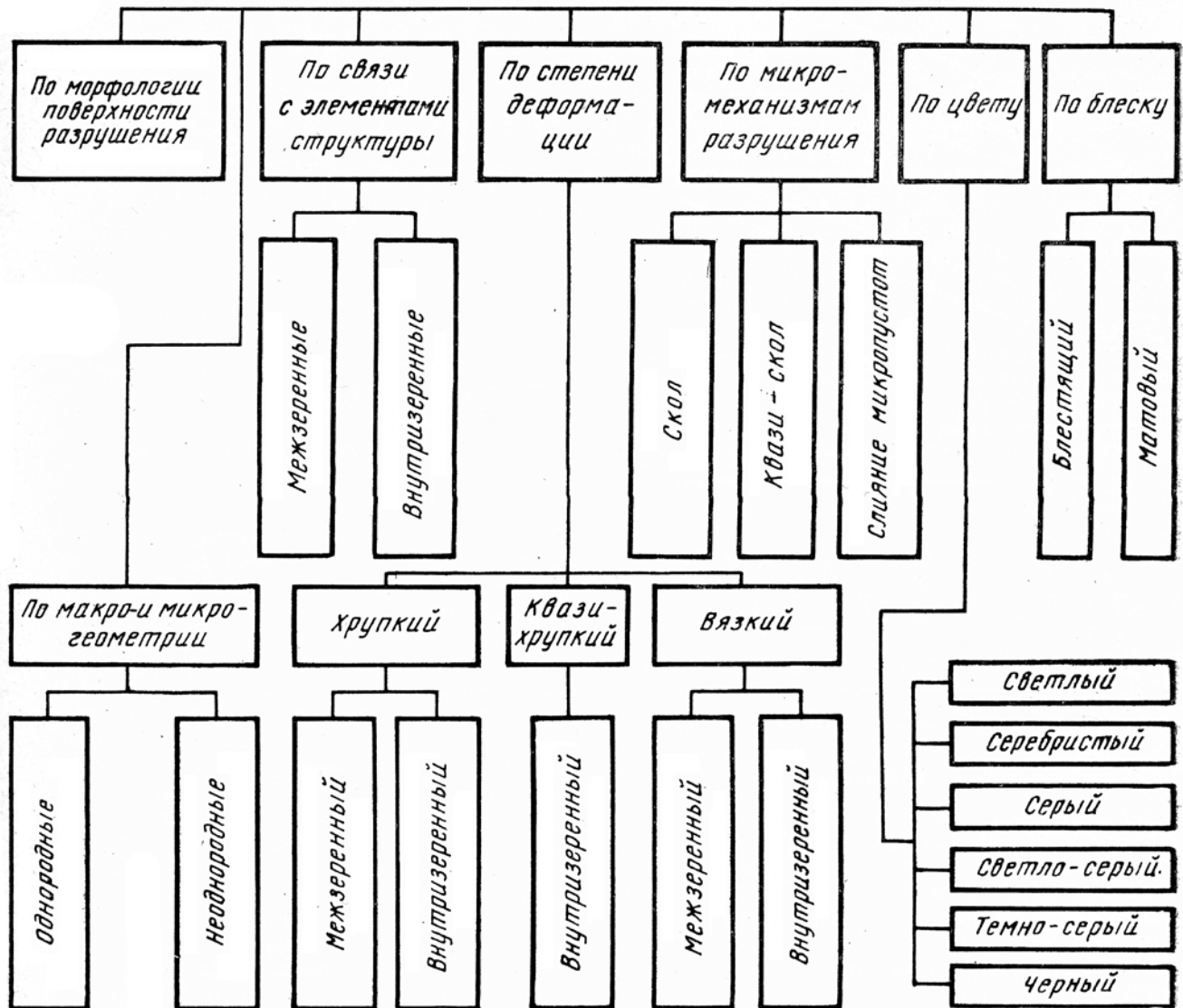


рис 6.1 Классификация изломов по основным признакам.

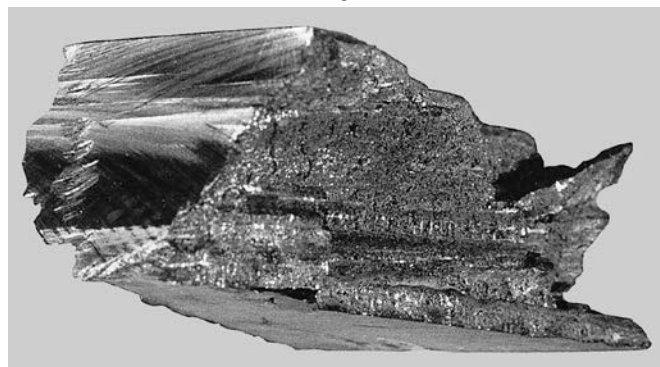
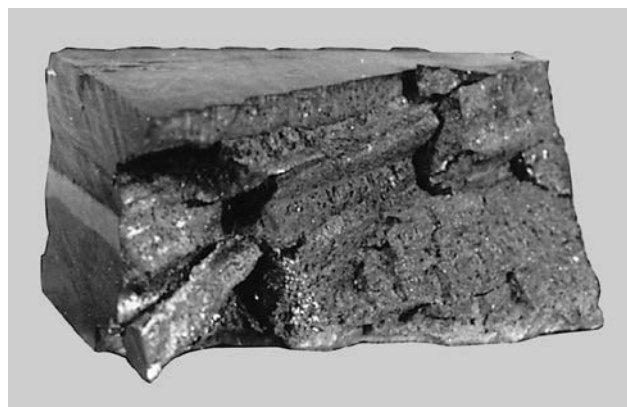
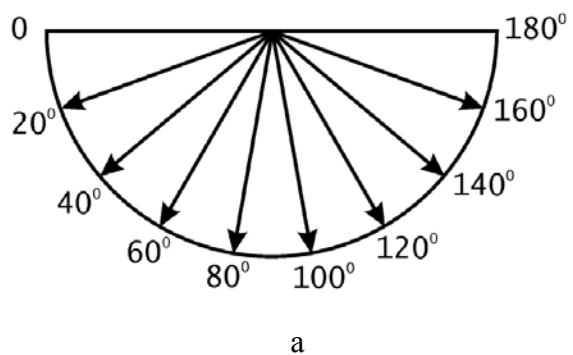


рис 6.2 Излом литой стали при съемке под углами:
а – ракурсы съемки: б – г – виды излома при съемке под углами
б-20°; в – 60°; г – 160°

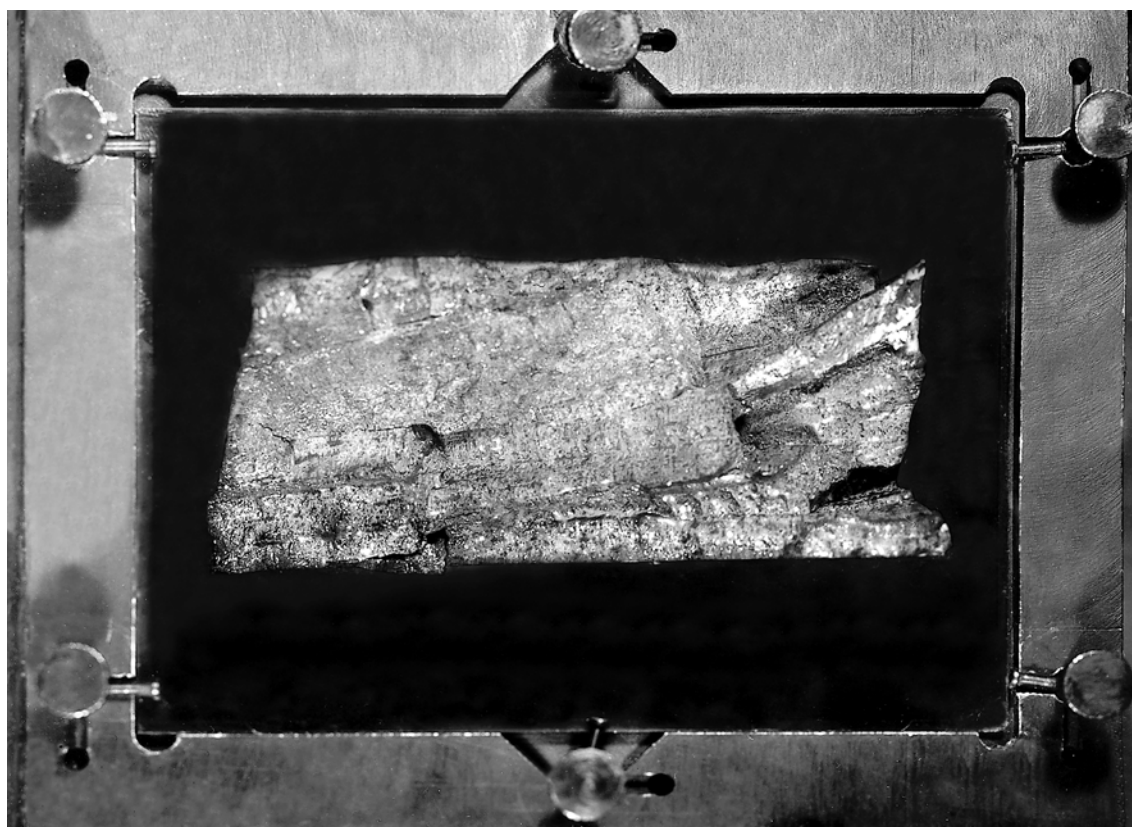


рис 6.3 Излом, показанный на рис.6.2, снятый на голограмму

Рисунки к Главе 7

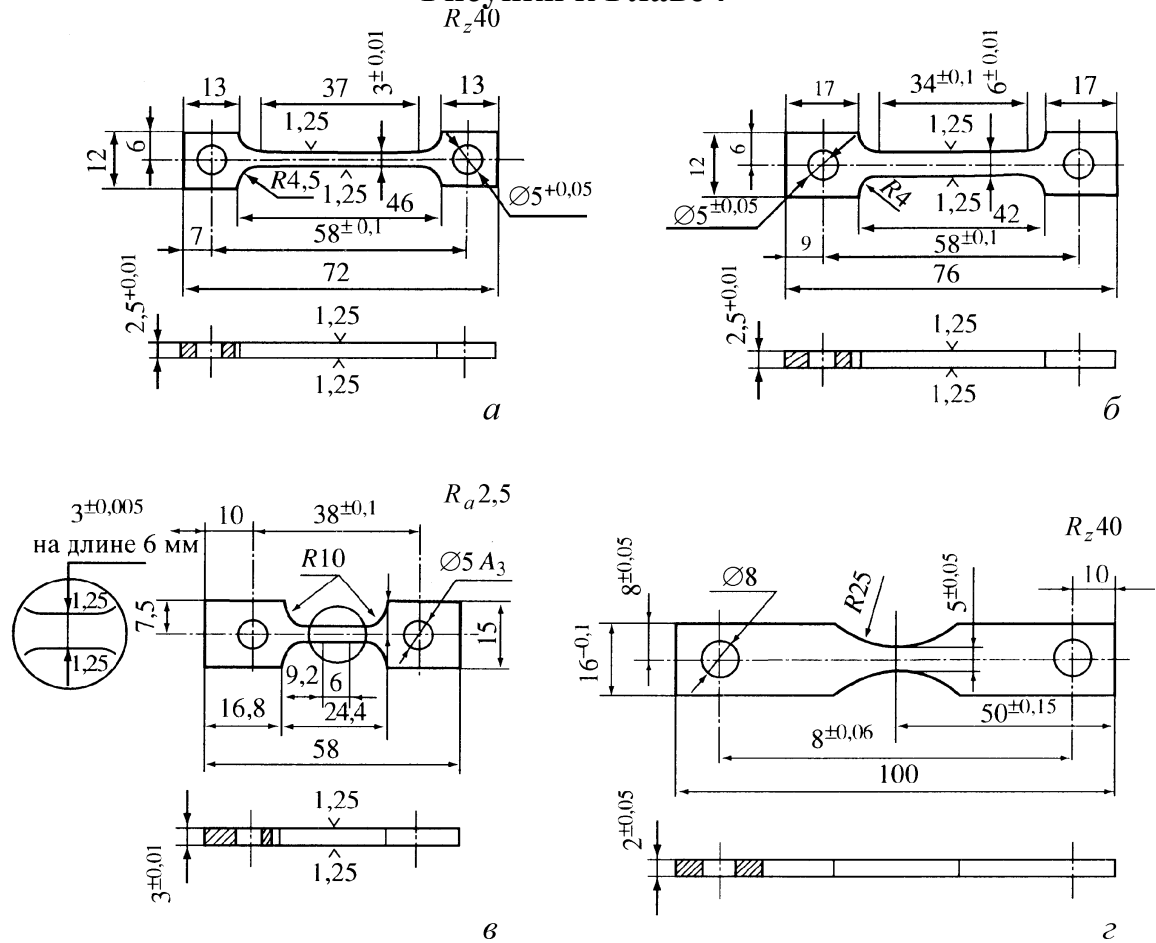


рис 7.1 Образцы для проведения испытаний.

Тип: а – I; б – II; в – III; г – IV

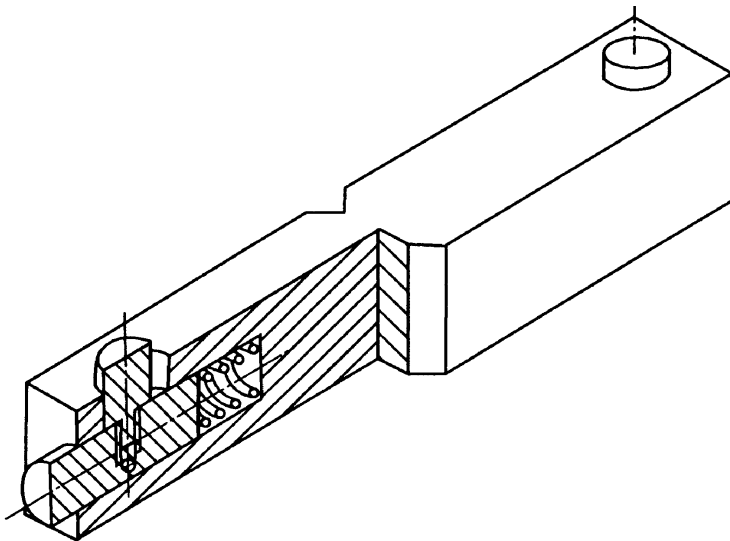


рис 7.2 Схема приспособления для шлифования и полирования образцов больших размеров

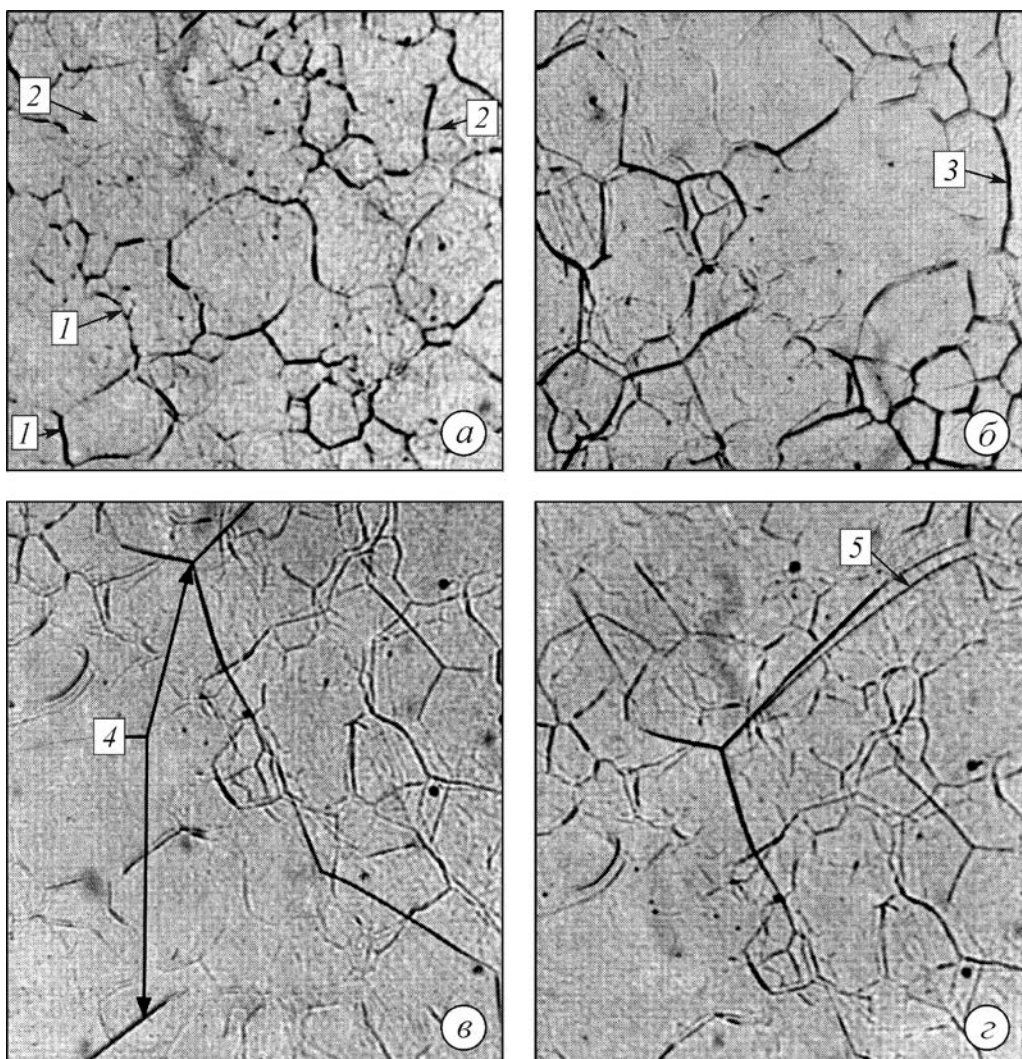


рис 7.5 Кинетика формирования термического микрорельефа в катаной Cr - Ni - Mo стали (один и тот же участок):
а – г – при нагреве; д – к – при охлаждении (x 100, при печати x4).
1 – границы действительного исходного зерна аустенита;
2 – границы мелких вновь образовавшихся зерен аустенита;
3 – границы рекристаллизованных зерен аустенита;
4 – прямолинейные границы зерен;
5 – миграция границ зерен;
6,7 – участки, иллюстрирующие характерную эволюцию микрорельефа при фазовом превращении;
8 – включения, тормозящие рост кристаллов новой фазы

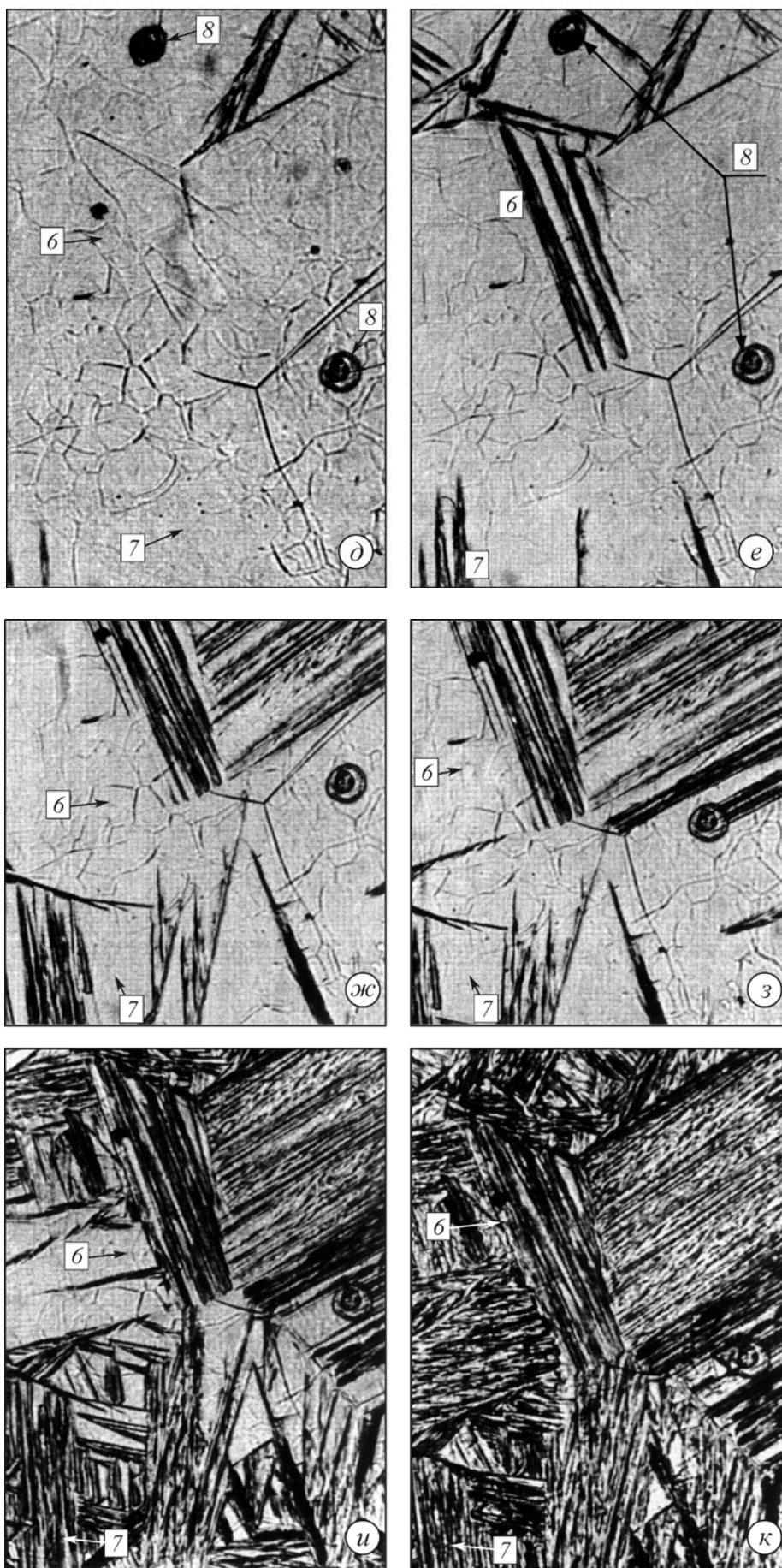


рис 7.5 (продолжение)

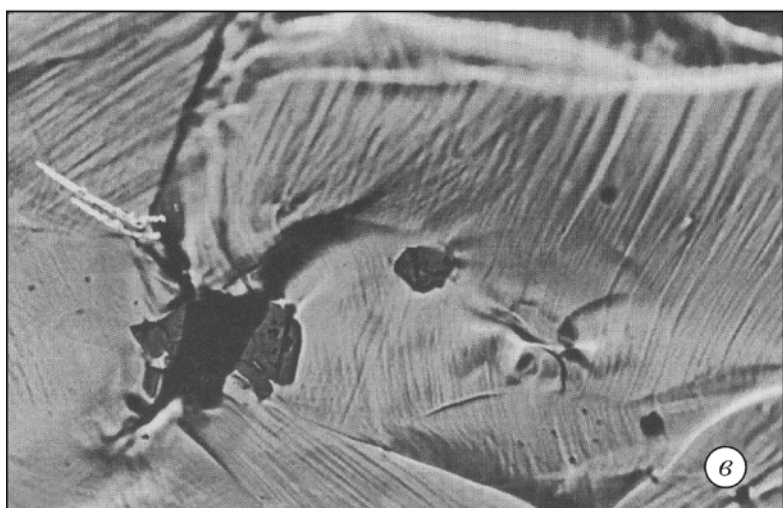
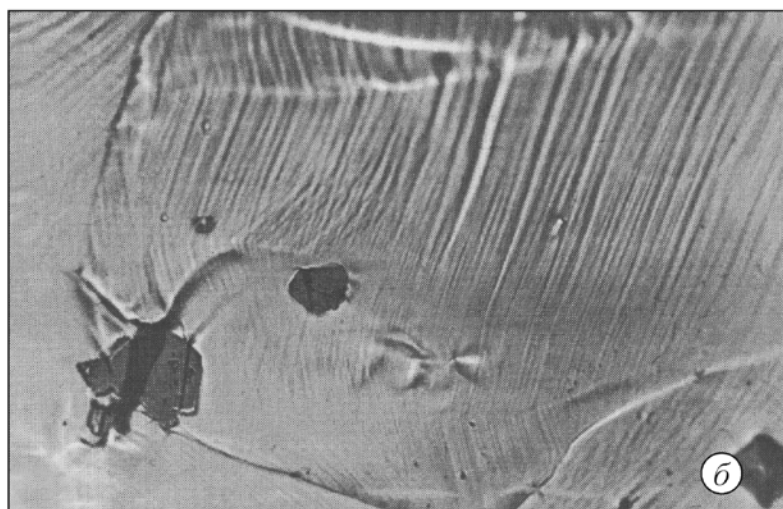
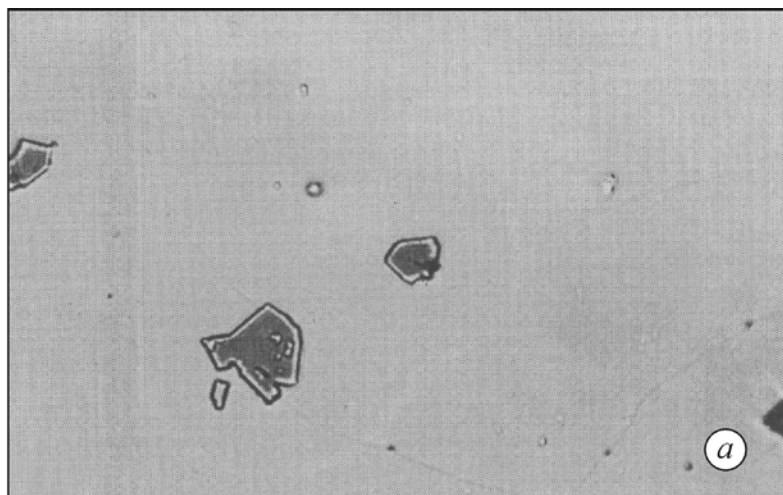


рис 7.6 Кинетика зарождения трещин в интерметаллиде Al_5Mo при растяжении при 300 °C (a) $\times 500$
 а – исходная структура; б - $\epsilon_{\text{ср}} = 5 \%$; в - $\epsilon_{\text{ср}} = 10 \%$.

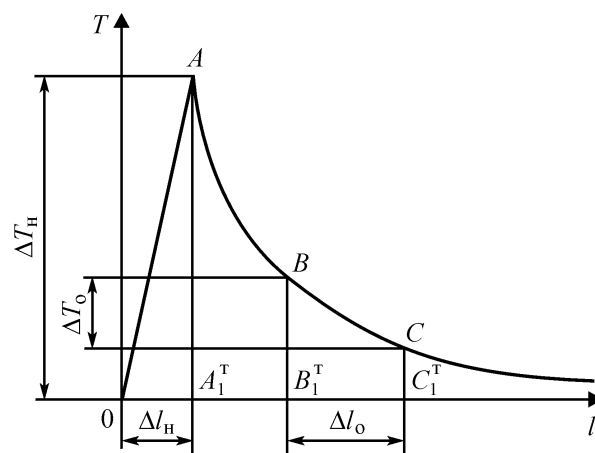


рис 7.7 Пример записи изменения температуры образца в процессе испытания

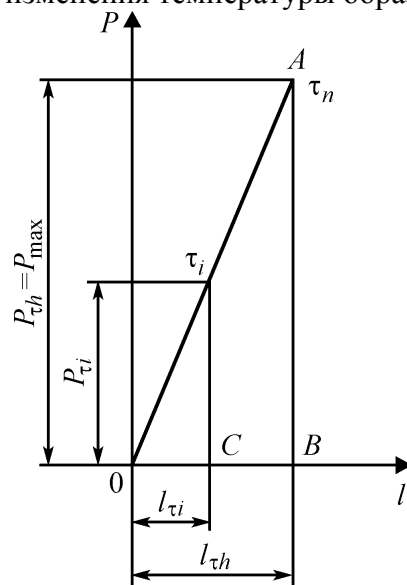


рис 7.8 Диаграмма нагрузок и деформаций