

ВАЛЕНТИН ВОЛОГДИН

Член-корреспондент Академии Наук СССР,
лауреат Сталинской премии

ПОВЕРХНОСТНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ЗАКАЛКА

*Метод лаборатории профессора В. П. Вологодина
при Ленинградском электротехническом институте
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

ОБОРОНГИЗ

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ АВИАЦИОННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1947

Труд проф. В. П. Вологодина посвящен изложению общих оснований метода поверхностной индукционной закалки, разработанного лабораторией автора в Ленинградском электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина).

В книге даны теоретические соотношения и формулы для тепловых и электрических явлений, наблюдаемых при поверхностном нагреве, с учетом влияния кривизны закаливаемой поверхности и толщины стенки. Также освещены вопросы зависимости между временем и температурой закалки. В элементарной форме даны описания и расчеты электрических закалочных устройств. Помимо теоретических вопросов, в книге приведены опытные материалы по закалке самых разнообразных деталей.

Книга предназначена для инженеров-производственников и студентов ВТУЗов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Метод индукционной поверхностной закалки, предложенный и разработанный лабораторией автора, получил в настоящее время всеобщее признание, став основным методом термообработки на заводах с массовым выпуском продукции.

Еще не так давно высказывалось мнение о неполноценности этого метода, особенно в связи с понижением прочности, главным образом усталостной, при применении этого метода. Практика автозаводов и успешное применение метода во время Отечественной войны на Кировском заводе в значительной степени рассеяли эти опасения.

Работы в лаборатории автора при Ленинградском электротехническом институте, а также интересное исследование в области напряжений и усталостной прочности, проведенное в 1946 г. НИИ Оргавиапром Министерства авиационной промышленности, внесли значительную ясность в этот вопрос.

В настоящее время можно считать, что при правильном использовании метода, если учитывать распределение температуры в закаливаемом теле к моменту охлаждения, после закалки можно получать не понижение, а повышение усталостной прочности.

В предлагаемой книге собран большой теоретический и практический материал за 10 лет работы. За небольшими исключениями это результат работ лаборатории ЛЭТИ и заводов, связанных с этой лабораторией. В большинстве случаев в книге даны окончательные формулы без их выводов. Поэтому книга носит почти справочный характер.

Автор впервые в данной области широко использовал метод подобия, охватив им тепловую, электрическую и металловедческую стороны поверхностной закалки. Благодаря этому во многих случаях без дорогих опытов становится возможным установить режим закалки деталей таких размеров, над которыми до этого времени работ не производилось.

С металловедческой стороны эта попытка находила возражения, как слишком упрощающая явления. Однако автор взял на себя смелость сохранить ее, представив на суд читателей и наилучшего судьи в такого рода вопросах — заводской практики.

Такому решению способствовало убеждение автора, что металловедение от чистого эксперимента должно переходить к обобщениям с возможно широким использованием математического аппарата, в чем оно значительно отстает от других отраслей техники.

В данной книге автор уделяет значительное внимание форме нагреваемой поверхности и толщине стенки, что в предыдущих его книгах учтено не было. Практика же последних лет выдвигает этот вопрос

на первое место в связи с расширением ассортимента закаливаемых деталей.

Приведенные в книге конструкции станков-автоматов для коленчатых валов ЗИС и ХТЗ относятся к довоенному времени. Однако и сейчас они отвечают последним требованиям техники. Второй вариант станка ЗИС был построен лишь в 1946 г.

Хотя все главы книги, за исключением одной, и написаны автором, однако в них нашел отражение многолетний труд целого коллектива, в котором значительная часть математической работы выполнена кандидатом физико-математических наук Г. А. Разореновым, внесшим ценный вклад в дело теоретического развития метода. Еще большее значение имели работы кандидата технических наук А. А. Фогель, проводившего основные экспериментальные работы с самого зарождения метода.

Участниками разработки метода являются также И. И. Контор, А. Е. Слухоцкий, А. Д. Демичев, В. Л. Сергиевич (умер в 1941 г.), М. М. Вербицкий (умер в 1942 г.) и особенно Д. И. Руденко, который оказал помощь при расчетах и составлении графиков.

Графический материал оформлен художником С. П. Светлицким.

Глава IX написана Всеволодом Вологдиным.

В металлургических вопросах автор пользовался постоянными советами кандидата технических наук М. М. Замятина.

Библиография составлена М. С. Веридарским. Она дана лишь с 1938 г., так как более ранняя помещена в книге автора «Поверхностная закалка индукционным способом» изд. 1939 г.

В вопросах технологии автору помогали советами Ф. И. Крупин и Н. Т. Аносов (умер в 1946 г.), много способствовавшие успешной работе установок ЗИС и ХТЗ.

При этом нельзя не упомянуть директора завода имени Сталина И. А. Лихачева и Д. В. Голяева, которые дали первоначальный толчок развитию метода.

Всем упомянутым лицам автор приносит глубокую благодарность.

Эта книга создавалась, так сказать, *in statu nascendi* метода индукционной закалки, чем и объясняются некоторые отступления от строгой системы в изложении материала. Она была написана в 1940 г., подготовлена к печати в 1941 г., но ее набор погиб во время Отечественной войны.

Автор надеется, что несмотря на значительное время, прошедшее со дня окончания работы над книгой, и лишь небольшие дополнения, внесенные в нее перед печатью, она все же окажет значительную помощь в деле развития применения токов высокой частоты на наших заводах и поможет им в выполнении пятилетнего плана.

Ленинград, Электротехнический институт
им. В. И. Ленина

Октябрь 1946 г.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Греческий алфавит

α — коэффициент конвекции.

$$\alpha = 1 - \frac{\xi}{r_0}.$$

$\alpha'' = \frac{d}{\sqrt{\pi}} \delta$ — в уравнении для увеличения сопротивления проводов от поверхностного эффекта.

$\alpha = \frac{r_0}{R_0}$ — в уравнении близости и кольцевого эффекта.

α_1 — производительность штук/час в уравнении (XIII, 5).

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ — углы.

$\alpha' = \frac{\xi}{x_k}$ — относительная величина активного слоя.

$\alpha_0 = 2\pi \sqrt{\frac{a}{b} f \frac{\mu}{\rho} 10^{-9}} = \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{a}{b} 10^{-9}}$ — в уравнении для провода, окруженного железом.

$$\beta = 1 - \frac{x}{r_0}.$$

β — угол (см. фиг. 58).

γ — удельная плотность.

δ — эквивалентная глубина проникновения тока, см.

δ_1 — глубина проникновения для индуктора, см.

$\delta_{2\text{гор}}, \delta_{2\text{хол}}$ — горячая и холодная глубина проникновения для закаливаемого слоя.

δ_2 — глубина проникновения для горячего металла при $\mu = 1$.

δ' — расстояние между обмотками трансформатора, см.

δ_f — толщина листа железа трансформатора, мм.

ε — отношение просвета между проводами к диаметру проводов:

$$\varepsilon = \frac{R_0 - r_0}{r_0} \text{ (см. фиг. 58).}$$

ζ — переменная интеграция, выпадающая при подстановке пределов, в уравнении (III, 15).

ζ_1 — коэффициент концентрации тока при явлении близости и кольцевом эффекте в уравнениях (V, 52) и (V, 53).

η, η' — к. п. д. термический для одновременного и для последовательного нагрева.

η_1 — к. п. д. электрический (индуктора).

η_2 — к. п. д. закалочного трансформатора.

η_3 — к. п. д. генератора.

η_4 — к. п. д. двигателя.

$\eta_{3,4}$ — к. п. д. агрегата.

η_{11} — к. п. д. лампового генератора.

η_{12} — к. п. д. общий всей установки.

κ — коэффициент, учитывающий кривизну.
 x — переменная интегрирования, выпадающая при подстановке пределов, в уравнении (IV, 3).
 λ — длина волны, м.
 λ — коэффициент удельной теплопроводности.
 λ_1, λ_2 — коэффициент теплопроводности поперек набора железа и вдоль красной меди.
 μ — магнитная проницаемость стали.
 μ_1, μ_2 — магнитная проницаемость первичного и вторичного проводов в уравнении (V, 36).
 ν_n — корни уравнения $J_1(\nu_n) = 0$; ($n = 1, 2, 3 \dots$).
 ν_h, ν_q, ν_s — удельные потери в железе на гистерезис, токи Фуко и суммарные.
 $\pi = 3,14$.
 ρ' — удельное сопротивление, омсм.
 ρ — удельное сопротивление в CGSM.
 ρ_1, ρ_2 — удельное сопротивление.
 ρ_1, ρ_2 — удельное сопротивление индуктора и закаливаемого тела в горячем состоянии, омсм.

$$\rho_2 \approx 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ омсм.}$$

τ — шаг петли индуктора.
 φ — угол.
 φ_2 — угол сдвига между током и напряжением в закаливаемом слое.
 ξ — глубина активного слоя, в котором выделяется тепло.
 $\xi = \frac{h}{\delta}$ — высота провода h , окруженного железной цепью, выраженная в единицах δ , в уравнении (V, 78).
 ω — угловая частота.

A — коэффициент, зависящий от $\alpha = \frac{r_0}{R_0}$, в уравнении (V, 45).

ΔU — падение напряжения.
 ΔP_0 — потери в трансформаторе при режиме холостого хода.
 Δ — расстояние между индуктором и нагреваемой поверхностью.
 Δ — толщина пакета железа трансформатора.
 Δ_2 — толщина медной стенки индуктора, мм.
 ΔP — потери в трансформаторе, вт.
 θ_1, θ_2 — теплоперепад поперек шихтовки железа и вдоль у трансформатора, °C.
 θ_3 — теплоперепад при удалении тепла в воде.
 θ — относительная температура,

$$\theta = (T - T_0), \text{ } ^\circ\text{C.}$$

θ_1 — относительная температура, которую принимает тело через 1 сек. после начала нагрева.
 θ_0 — относительная температура наружного слоя, °C.
 θ'_1 — относительная температура меди индуктора к концу нагрева, °C.
 θ'_2 — относительная температура закаливаемого слоя к концу нагрева, °C.
 θ_v — температура закалочной воды или температура наружной поверхности тела при охлаждении его.
 θ_k — относительная закалочная температура.
 θ_n — относительная температура на глубине x_n .
 $\theta_{t=0}$ — относительная температура в момент времени $t=0$.
 $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ — скорость охлаждения тела при закалке.
 $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{кр}$ — скорость охлаждения тела критическая.
 $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{550}$ — скорость охлаждения тела при температуре 550° C (температура наименьшей устойчивости аустенита).
 Σ — знак суммы.
 Φ — магнитный поток.
 Φ_m — магнитный поток амплитуды.
 $\Phi(z)$ — функция Крампа (интеграл Гаусса) в уравнении (III, 12).
 $\Phi_{1(z)}$ — производная функции Крампа.
 $\frac{\lambda}{a}$ — объемная теплоемкость.

Латинский алфавит

- A — температуро-независимый коэффициент в уравнениях диффузий.
- A_c, A_{c_2}, A_{c_3} — критические точки; A_{c_2} — точка Кюри, при которой μ принимает значение, равное 1.
- A_s, A_j — ампервитки сердечника и ярма трансформатора.
- A_0 — ампервитки в стыках трансформатора.
- B — индукция.
- B_m — индукция амплитуды.
- B_1, B_2, B_3 — индукция в различных сечениях магнитной цепи.
- B_s, B_j — индукция сердечника и ярма, амплитуда, гаус.
- C — концентрация.
- C — постоянная в уравнении для роста зерна.
- C — емкость батареи.
- D — коэффициент диффузии, $см^2/сек$.
- D_1 — коэффициент в уравнении для роста зерна.
- D_1, D_2 — диаметр обмотки трансформатора, первичной, вторичной (добавление букв (в) — для внутреннего и (н) — для наружного диаметров).
- E — напряжение на зажимах генератора и конденсаторов, в.
- E — э. д. с. эффективная, в.
- F — критерий подобия Фурье.
- $F_1(z)$ — функция, выражаемая через функцию Крампа и ее производную, в уравнении (III, 12) и в таблицах.
- G_s, G_j — вес сердечника и ярма трансформатора, кг.
- G' — стоимость трансформатора.
- G — вес.
- H — сила поля.
- H, H_0 — высота обмотки трансформатора; высота сердечника.
- $H_{эф}$ — эффективное значение силы магнитного поля.
- I — сила тока, а.
- I_0 — ток намагничивания трансформатора, эффективный, а.
- I — амплитуда полного тока, проходящего по сечению, а.
- I_1, I_2 — первичный и вторичный ток трансформатора, эффективное значение, а.
- I_m — мнимая часть функции Бесселя.
- I_0 — ток холостого хода трансформатора, а.
- I_k — установившийся ток короткого замыкания трансформатора.
- J_0, J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядка.
- $K = \frac{R}{Q}$ — в уравнении диффузии (VIII, 5).
- L_1, L_2 — коэффициенты самоиндукции первичной и вторичной обмоток трансформатора и индуктора и нагреваемого тела, рассчитанные на 1 см высоты, ом/см.
- L_2' — индуктивность вторичной цепи, пересчитанная на первичную.
- L_{1l}, L_{2l} — индуктивность индуктора.
- M — коэффициент взаимной индукции.
- M — модуль шестерни, мм.
- $N_0(KV_n), N_1(KV_n)$ — функции Неймана нулевого и первого порядка.
- P — промышленная мощность (с учетом потерь при холостом ходе генератора), квт.
- P — полезная мощность, сообщаемая слою, квт.
- P_0 — мощность холостого хода, квт.
- P_1 — мощность генератора, квт.
- P_2 — мощность сети, квт.
- P' — мощность, сообщаемая всему телу, квт.
- P'' — мощность, подводимая к индуктору, квт.
- P_c — кажущаяся мощность емкости, квт.
- Q — величина энергии, которой обладает атом, в уравнении диффузии.
- Q — количество тепла, кал; то же, выделяемое в элементе сердечника, вт.
- Q — полное количество тепла, сообщаемое телу для нагрева на 1 см высоты в уравнении (III, 35), кал/см.
- Q_c — количество тепла, потребное для равномерного нагрева цилиндра по всему его сечению до температуры θ_k на 1 см высоты цилиндра в уравнении (III, 36), кал/см.
- R — сопротивление, ом.
- R_0 — радиус кольца, считая по центру провода (фиг. 58).
- R_1, R_2 — сопротивление провода, имеющего удельное сопротивление ρ_1 и ρ_2 , в уравнении (V, 11), ом.

- R_1, R_2 — сопротивление индуктора и нагреваемого слоя, рассчитанное на 1 см высоты, ом/см.
 R_2' — сопротивление вторичной цепи, пересчитанное на первичную.
 R_{1l}, R_{2l} — сопротивление для индуктора и нагреваемого тела длиной l .
 R_0 — вещественная часть функции Бесселя.
 R_s — длина периферии провода, см.
 R' — сопротивление, приведенное к первичной обмотке трансформатора.
 R_a — активное сопротивление.
 R_0 — сопротивление постоянному току.
 S — расстояние между центрами проводов в уравнении (V, 35) при явлении близости.
 S_0 — площадь круга, описанного вокруг сердечника трансформатора, см².
 S — площадь закаленного слоя, см².
 S — сумма членов ряда при $\xi = 0$ в уравнении (III, 40).
 S_1 — сумма членов ряда при $\xi > 0$ в уравнении (III, 33).
 S_1 — сечение железа сердечника трансформатора, см².
 S_s — сечение железа сердечника трансформатора, активная часть, см².
 S_j — сечение ярма трансформатора, см².
 T_0 — начальная температура, температура окружающей среды 20° С.
 T — постоянная времени трансформатора, сек.
 T_μ — температура, отвечающая точке Кюри.
 T_k — закалочная температура, °С.
 T_k' — абсолютная температура закалки по методу подобия.
 ΔT — перегрев наружного слоя над закалочной температурой на глубине x_k :
 $\theta_0 - \theta_k = \Delta T, ^\circ\text{C}$.
 U_1, U_2 — напряжение индуктора, первичной и вторичной обмоток трансформатора.
 U_1', U_2' — те же значения, но для приведенных величин.
 ΔU — суммарное падение напряжения в трансформаторе.
 V — объем тела, см³.
 V — объем закаленного слоя, см³.
 W — энергия, индуцируемая в теле, рассчитанная на 1 см высоты цилиндра в уравнении (VI, 11).
 W — энергия, сообщаемая телу, квт-сек.
 W_0 — энергия, потребляемая генератором при холостом ходе, квт-ч.
 W_1 — энергия генератора, сообщаемая индуктору, квт-сек.
 W_2' — энергия из сети, квт-ч.
 W_3 — энергия с учетом холостого хода (промышленная), квт-ч.
 X — функция, зависящая от $\frac{\delta}{r_0}$, учитывающая особенности индуцируемого тока в цилиндрическом теле.
 X — реактивное сопротивление от рассеивания, отнесенное к первичной обмотке.
 Z — число зубьев шестерни.
 Z — сопротивление полное.
 $Z_0(x)$ — цилиндрическая функция нулевого порядка.
 $Z_1(x)$ — цилиндрическая функция первого порядка.
 Z_1, Z_2 — полное сопротивление первичной цепи и закаленного слоя, ом.
 Z_2' — общее сопротивление вторичной цепи, пересчитанное на первичную.
 a — коэффициент температуропроводности.
 b — ширина закаливаемой поверхности, см.
 b_1, b_2, b_3 — обозначение выражения в уравнениях (V, 35) и (V, 38).
 c — удельная теплоемкость.
 c_1, c_2 — ширина нагреваемой части закаливаемого слоя, ширина индуктора, см.
 c_1, c_2 — теплоемкость меди индуктора и нагретого слоя закаливаемого тела.
 c_c, c_f — средняя удельная теплоемкость меди и железа трансформатора.
 c_{0f} — средняя удельная теплоемкость между 20 — 900° С, кал/кг.
 d — диаметр тела, индуктора, катушки, см.
 d_1, d_2 — диаметр индуктора и закаливаемого тела.
 $d' = nd$ — диаметр, искомый на основании подобия.
 e — э. д. с., мгновенное значение, в.
 e — основание неперовых логарифмов, $e = 2,71...$
 f — частота, гц.
 g — стоимость 1 ква конденсатора.
 h — толщина закаливаемого плоского или цилиндрического тела.
 h — высота катушки индуктора.
 h_1, h_2 — расстояние по перпендикуляру от какой-либо точки провода до точки на нагреваемой поверхности для одного и другого провода.

h' — высота цилиндрического тела, см.
 i — сила тока, мгновенное значение, а.
 $i = \sqrt{-1}$.
 j — плотность тока на глубине x , а/см².
 j_m — плотность тока, амплитуда, а/см².
 $j_{\max}$ — максимальное значение плотности тока в точке M .
 $j_{1\text{ср}}, j_{2\text{ср}}$ — среднее значение плотности тока первого и второго провода.
 $j_{\text{ср}}$ — среднее значение плотности тока, а/см².
 $j_{\text{эф}}$ — плотность тока, эффективное значение, а/см².
 k — коэффициент мощности в уравнении (V, 5).
 k — коэффициент в формуле Беннета в уравнении (I, 5).
 $k = \frac{r_2}{r_1}$ — отношение наружного большого радиуса цилиндра к внутреннему.
 k — коэффициент загрузки; $k = \frac{\text{время работы с нагрузкой}}{\text{общее время работы}}$.
 k_s — коэффициент заполнения железа трансформатора.
 k_0 — поправочный коэффициент для таблицы x_k , учитывающий кривизну поверхности.
 k_t — коэффициент, учитывающий площадь, занимаемую охлаждающей системой.
 k_1 — коэффициент в уравнении роста зерна.
 k_0 — коэффициент заполнения окна гильзы.
 $k_2 = \frac{A}{k_1}$ — в уравнении (VIII, 14).
 $k = \frac{R}{R_0}$ — коэффициент увеличения сопротивления при поверхностном эффекте.
 l — высота цилиндрического закаливаемого слоя, см.
 l_1, l_2 — длина провода, средняя длина витка обмотки трансформатора.
 l_j — ширина ярма трансформатора.
 l — длина катушки.
 l_1, l_2, l_3 — длины отдельных частей магнитной цепи.
 l — половина наибольшей ширины сердечника трансформатора.
 m — общее число слоев для проводов, окруженных железом, в уравнении (V, 74).
 m_2 — коэффициент.
 n — число витков катушки индуктора.
 n — число оборотов машины.
 n — коэффициент подобия.
 n_1, n_2 — число витков первичной и вторичной обмотки трансформатора.
 n_t, n_a, n_x, n_D — коэффициент пропорциональности для t, a, x и D в критерии подобия.
 p — удельная мощность, квт/см².
 p — порядковый номер слоя для проводов, окруженных железом, в уравнении (V, 72).
 p_c — удельная мощность, необходимая для равномерного нагрева цилиндра по всему его сечению до температуры θ_k , в уравнении (III, 38), квт/см².
 $p_1' = pr, p_2' = pr_1$ — удельные мощности, искомые на основании подобия.
 p_1 — удельная мощность, сообщаемая всему телу, квт/см².
 p_2 — удельная мощность от сети, квт/см²
 p_3 — удельная мощность генератора, квт/см² } Те же величины со знаком'
на единицу периферии,
квт/см
 q — сечение тела, см².
 q — поток вещества.
 q_0 — тепловой поток, кал/см² сек, $q_0 = 239 p$ в уравнении (III, 2).
 q_1, q_2 — кольцевое сечение индуктора нагреваемого слоя, пересекаемое магнитным потоком.
 r — радиус.
 $r = r_0 - x$, где r_0 — наружный радиус и x — расстояние от поверхности.
 r_0 — радиус провода, кольца, наружный радиус цилиндра.
 r_1, r_2 — внутренний и наружный радиусы цилиндра (фиг. 26), см.
 r_1, r_2 — радиусы первого и второго проводов; значения, заменяющие r_0 при двух цилиндрах 1 и 2.
 r_1, r_2 — радиус внутренний индуктора и внешний нагреваемого тела в формуле расчета индуктора.

- $r_{\min}$ — наименьший радиус, при котором цилиндрическую поверхность можно принимать за плоскую.
 r_2' — наружный радиус индуктора при закалке внутренних поверхностей.
 s — длина периферии провода, см.
 t — время, сек.
 t_1 — время нагрева тела (прохождения тока), сек. или час.
 $t' = nt$ — время закалки, искомое на основании подобия.
 t_k — время нагрева под закалку, сек.
 t_1, t_2 — время и пауза работы трансформатора.
 v — скорость закалки или скорость перемещения индуктора.
 v_2 — стоимость 1 кВт-ч электроэнергии, коп.
 $v_{3,4}$ — стоимость 1 кВт-ч генератора, руб.
 w — потери на 1 см² стали трансформатора, Вт/см².
 w — объемная плотность мощности, кВт/см³.
 w_2 — удельная энергия от сети на 1 см² поверхности закаленного слоя.
 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ — расстояния от поверхности до слоя с температурой $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$.
 $x' = nx$ — глубина закаленного слоя, искомая на основании подобия.
 x_k — глубина закаленного слоя, см.
 z — аргумент функции Гаусса, $z = \frac{x}{2\sqrt{at}}$ в уравнении (III, 14).

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

1. Преимущества индукционного метода и вопросы, связанные с ним

Закаленный поверхностный слой можно получить, нагревая всю подлежащую закалке деталь и затем достаточно быстро охлаждая лишь поверхностный слой, а также нагревая лишь поверхностный слой и его охлаждая. Последний способ имеет некоторые преимущества, так как при нем внутренним, незакаливаемым частям детали возможно с помощью предыдущей термической обработки придать желаемую структуру, причем эта структура не изменяется при нагреве под закалку наружной поверхности.

Благодаря этому посредством комбинированной термической обработки возможно придать детали, обладающей высокой сопротивляемостью изгибающим и даже ударным усилиям, достаточно высокую твердость на поверхности, обеспечивающую малый износ.

При этих условиях, изготавливая даже весьма ответственные детали, легированную сталь часто можно заменять углеродистой.

Помимо этого преимущества поверхностной закалки, применение здесь индукционного метода, предложенного и разработанного лабораторией автора, имеет еще некоторые другие. Среди них можно упомянуть малый расход энергии, идущей на нагрев, легкость получения совершенно однородного результата и, что самое главное, возможность производить нагрев под закалку вместо многих минут и даже часов в течение нескольких секунд, а иногда даже долей секунд, вместе с возможностью точно регулировать процесс. Такой метод расширяет применение закалочных автоматов, устанавливаемых в потоке.

Все перечисленные преимущества метода могут быть, однако, в полной мере использованы лишь в том случае, если имеется точное представление о тех зависимостях, которым подчиняется не только метод в целом, но и в отдельных его частях.

Эти зависимости должны быть выражены в простой и удобной математической форме, дающей достаточное приближение.

Так как индукционный метод построен на базе широкого использования некоторых явлений, относящихся к различным отраслям физики, то в первых главах книги даны основные физические закономерности в такой форме, которая допускает непосредственное применение приведенных формул, графиков и таблиц к решению практических задач индукционной закалки.

Прежде всего надо упомянуть о вопросах из области теплотехники, охватывающих явления нагревания и охлаждения тела. Здесь нас будет интересовать распределение температур при нагреве и охлаждении, связанный с ним перегрев, требуемые мощности и к. п. д. и, наконец, скорость охлаждения $\frac{\partial \theta}{\partial t}$, играющая важную роль в процессе закалки.

Необходимо заметить, что в дальнейшем изложении даны не только зависимости, относящиеся к нагреву тела тепловым потоком, сообщаемым поверхности тела, но также и нагрев тела при помощи тепла, выделяемого в поверхностном слое некоторой конечной толщины, равной или вообще соизмеримой с глубиной закаливаемого слоя.

Если в первом случае решение всех задач достаточно просто вытекает из хорошо известного уравнения теплопроводности без правой части

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0, \quad (I, 1)$$

то в особенно интересующем нас случае выделения тепла в «активном» слое конечной толщины $\xi > 0$ (глубинный нагрев) решение задач вытекает из того же уравнения теплопроводности, но с правой частью

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{a}{\lambda} w. \quad (I, 2)$$

Однако здесь имеются значительные трудности ввиду наличия величины w , которая является функцией, задающей распределение источников тепла по глубине x и времени t , т. е.

$$w = \varphi(x, t). \quad (I, 3)$$

Решение этой задачи приводит к нелинейным уравнениям, поэтому в дальнейшем для получения достаточно простых выражений, пригодных для практики, приняты некоторые упрощения. Так, в большинстве случаев предполагается, что независимо от изменений величины a тепло выделяется равномерно в некотором активном слое толщиной ξ .

Необходимо отметить, что рассмотрение случая выделения тепла не на поверхности, а в некотором активном слое ξ (глубинный нагрев) необходимо потому, что как раз такой способ нагрева создает основные преимущества индукционного метода закалки, предложенного лабораторией автора. Лишь в этом случае возможно при значительной глубине закаленного слоя достигать быстрого нагрева в течение немногих секунд без вредного перегрева. Если такой нагрев представляет указанные преимущества с тепловой и металлургической стороны, то электрическая сторона метода позволяет реализовать его достаточно совершенно.

При нагреве тел большую роль играет кривизна нагреваемой поверхности и толщина тела. При индукционном методе эти величины влияют не только на тепловые явления, но также и на электрическую сторону. Поэтому при рассмотрении распределения температур и тока, созданного посредством индукции, даны зависимости их от кривизны поверхности и толщины или диаметра нагреваемого тела.

Так как необходимое для нагрева поверхностного слоя выделение тепла производят в данном методе, создавая в поверхностном слое электрический ток, который дает джоулево тепло ($I^2 R$), то в первых главах даны основные законы, относящиеся к индукции токов, а также зависимости, освещающие особенности прохождения тока в толстых проводниках или при высоких частотах.

Необходимость поместить этот материал вытекает, во-первых, из того, что в данном методе как раз использованы особенности, связанные с токами высокой частоты, и, во-вторых, в технической литературе нет источников, в которых была бы дана в удобной для пользования форме систематическая сводка всех особенностей, на которых основан метод.

В основном здесь даны выражения для распределения в толстых проводах плотности тока в том случае, когда, вследствие больших размеров провода или вследствие высокой частоты, плотность тока в различных частях провода весьма различна. Эти явления в простейшем случае носят название *поверхностного эффекта*.

Хотя физически сущность явления во всех случаях поверхностного эффекта одна и та же, однако формы, в которых это явление осуществляется, весьма различны и многообразны. Поэтому нельзя довольствоваться выражением для поверхностного эффекта, данным в общем виде или для одного частного случая.

Ввиду этого распределению плотности тока посвящена отдельная глава, где для некоторых случаев поверхностного эффекта приведены удобные для пользования выражения.

Если для полного ознакомления с вопросом прохождения тока в частях закалочного устройства необходим материал, помещенный в главе V, где описан поверхностный эффект, то

для общего ознакомления с методом индукционной закалки достаточно дать упрощенное представление об особенностях при прохождении переменного тока для тех случаев, когда этот эффект обнаруживается.

Ранее было уже упомянуто, что поверхностный эффект сказывается при высоких частотах или при любых частотах, если размеры провода достаточно велики.

В этих случаях плотность тока распределяется весьма неравномерно по сечению провода. Однако для простоты можно представить, что ток сосредоточен лишь в поверхностном слое, считая здесь плотность постоянной, допуская, что в других внутренних частях провода ток полностью отсутствует (фиг. 1).

Толщина слоя, по которому идет ток, носит название *глубины проникновения* и обозначается δ . Толщина зависит от частоты тока и параметров, связанных с материалом провода, и может быть выражена следующим образом:

$$\delta = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (I, 4)$$

где ρ — в *омсм*.

Если ρ выражено в системе CGSM, то выражение (I, 4) примет хорошо известный вид

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad \text{или} \quad \delta = \sqrt{\frac{\rho}{2\pi\mu\omega}} \text{ см.} \quad (I, 4a)$$



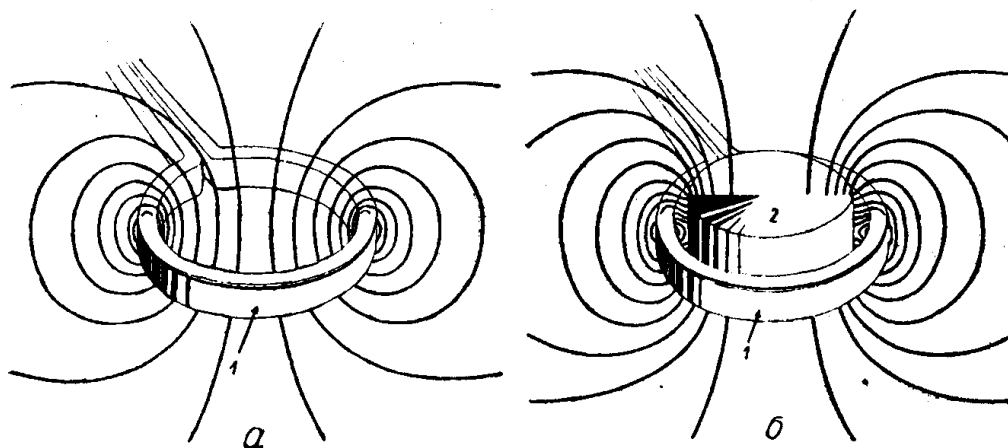
Фиг. 1. Распределение тока в проводе при поверхностном эффекте.

Из уравнения (1, 4) нетрудно понять, что, меняя частоту, можно в широких пределах менять и глубину проникновения, а значит, и толщину слоя, по которому идет ток, вызывающий нагревание поверхностного слоя.

Более подробно это освещено в главе V. Прибавим лишь, что поверхностный эффект существует и для тока и для магнитного поля.

2. Краткое описание процесса закалки

Возьмем кольцевой медный провод 1 (фиг. 2,а). Если по этому проводу идет переменный электрический ток, то внутри кольца существует магнитное поле, которое распределено, хотя и неравномерно, по всей площади, охватываемой кольцом. Поле существует и вблизи провода и в центральных частях площади, охваченной кольцом.



Фиг. 2. Распределение магнитного поля в кольце с током высокой частоты. а—при отсутствии проводящего тела; б—при наличии внутри его проводящего стального тела.

Если внутри кольца поместим сплошное проводящее тело 2 (фиг. 2,б), то при достаточно высокой частоте тока распределение магнитного поля резко изменится. Вследствие поверхностного эффекта магнитное поле сосредоточится главным образом по узкой кольцевой поверхности тела и будет индуцировать ток, который вызовет нагрев поверхностных слоев проводящего тела 2.

Если сила тока в кольце 2 достаточно велика, то будет создано магнитное поле также достаточной силы, в результате чего ток 1, индуцируемый в поверхностных слоях тела 2, будет столь велик, что джоулево тепло I^2R , созданное этим током, будет достаточно, чтобы в течение 3—4 сек. нагреть поверхностный слой тела 2 до закалочной температуры.

Так как магнитное поле (см. главу V) проникает лишь на небольшую глубину, то и ток будет иметь значительную плотность также лишь на небольшой глубине, где и сосредоточится нагрев. Остальная часть тела останется холодной. Так как необходимым условием проведения процесса является применение столь больших токов в кольце 1, чтобы весь процесс нагрева осуществлялся в течение 3—4 сек., то теплопроводность не успеет создать нагрева всего тела, и нагрев останется сосредоточенным в слое такой толщины, которая близка к требуемой толщине закаленного слоя. Такое применение весьма быстрого нагрева, а значит и использование больших токов и мощностей, является основным для данного метода. Применение по предложению

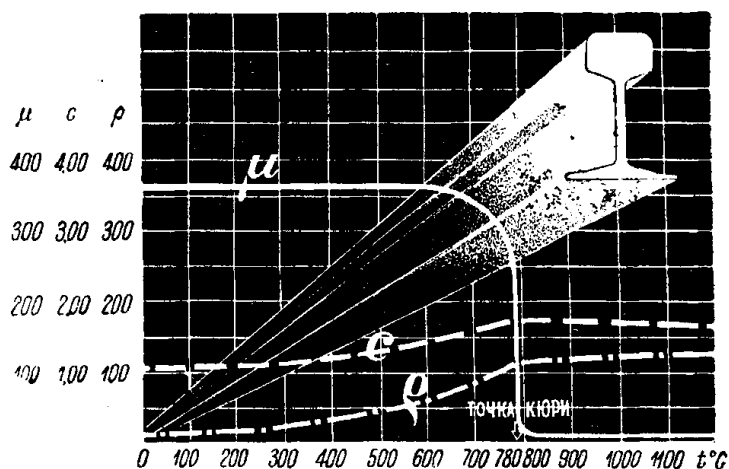
автора больших мощностей, или, вернее, больших удельных мощностей и плотностей тока, дало не только количественный, но и качественный эффект, допустив, например, возможность применять для закалики низкие частоты. Ввиду этого при определении режима закалики на ту или другую глубину одним из важнейших параметров всегда является плотность мощности, подводимой к закаливаемой поверхности (мощность на 1 см^3), или удельная мощность (мощность на 1 см^2 поверхности).

Нагретая указанным способом поверхность охлаждается чаще всего струями воды, что и производит закалику слоя.

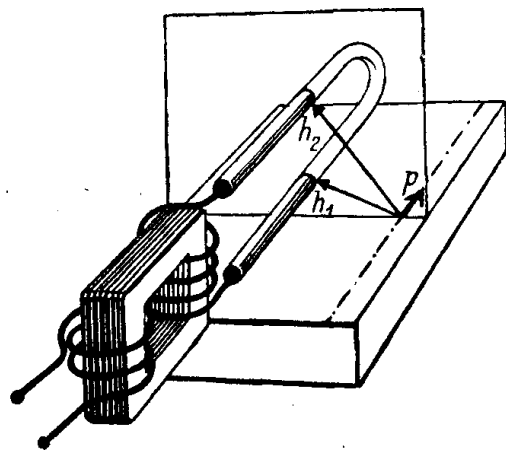
Здесь был описан процесс нагрева в упрощенном виде. В действительности процесс идет значительно сложнее ввиду изменения параметров нагреваемого тела. Так, магнитная проницаемость тела при нагреве до температуры, превышающей температуру точки Кюри (около 780°), падает от 300—500 до 1. Точно так же, хотя и не в такой степени, испытывает изменения удельное сопротивление ρ и теплоемкость c (фиг. 3).

Рассматривая только что описанную схему нагрева цилиндрической поверхности под закалику (см. фиг. 2,б), нетрудно видеть, что в данном случае мы имеем по существу устройство, подобное статическому электрическому трансформатору, в котором проводящее ток кольцо **1** (индуктор) является первичной обмоткой трансформатора, а поверхностный слой цилиндра **2** представляет вторичную обмотку трансформатора. Ввиду этого ниже (в главе X) более подробно рассмотрено данное устройство как трансформатор.

Так как у тех деталей, которые подлежат поверхностной заалке, помимо цилиндрических поверхностей, часто имеются и плоские поверхности, то необходимо рассмотреть, как осуществляется процесс заалки также и в этом случае. Можно, конечно, здесь использовать ту же схему, которая приведена на фиг. 2 для цилиндрической поверхности, взяв для радиуса цилиндра r значение $r = \infty$. Однако удобнее исходить из процесса нагрева, производимого петлями (фиг. 4), так как в этом случае нет замкнутого кольца, как в случае цилиндра, а, помимо прямого активного провода, имеется еще обратный провод, действие которого часто вредно. Ввиду этого при определении индуктируемой на закаливаемой



Фиг. 3. Изменение магнитной проницаемости μ , удельного сопротивления ρ и теплоемкости c с температурой



Фиг. 4. Схематическое изображение петлеобразного индуктора.

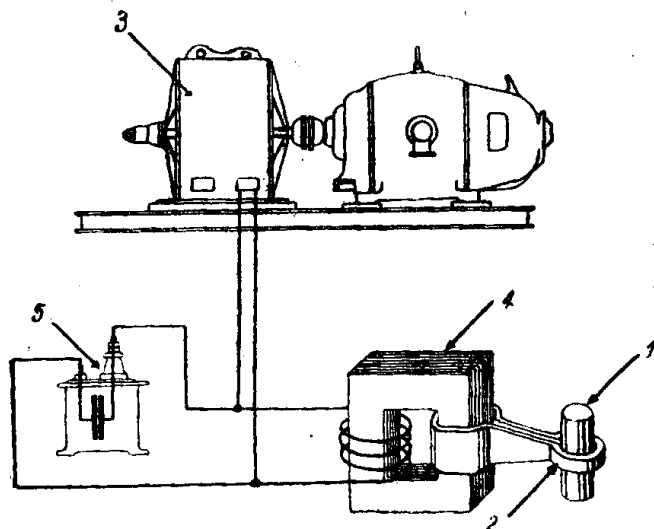
поверхности э. д. с. лучше исходить из выражения, данного Беннетом ¹.

$$E = k_p f \log \frac{h_1}{h_2} \cos 2\pi f t. \quad (I, 5)$$

Влияние обратного провода сказывается тем сильнее, чем меньше отношение $\frac{h_1}{h_2}$.

3. Составные части закалочного устройства

Переходя к осуществлению устройства в целом или его общей схеме, рассмотрим фиг. 5, где показано устройство с машинным агрегатом, состоящее из генератора (чаще всего индукторного типа) и электромотора.



Фиг. 5. Схема закалочного устройства с машинным генератором для одновременной закалки цилиндрических предметов.

1—закаливаемое тело; 2—индуктор; 3—генератор;
4—трансформатор; 5—конденсаторы.

Частота, даваемая таким генератором, обычно составляет 2000 гц, хотя в некоторых случаях она достигает 15 000 гц.

При тех громадных силах тока, которые неизбежны в индукторе 2 с одним витком, имеющим весьма низкое напряжение (примерно 20—50 в), изготовление генератора, а главное канализация тока высокой или повышенной частоты встречают большие затруднения. Поэтому обычно в схеме закалочного устройства применяют трансформатор 4, понижающий напряжение с 750—1500 в, на которое строят генераторы, до 20—50 в.

Так как индуктор и нагреваемое тело всегда обладают большой индуктивностью, обуславливающей низкий $\cos \phi$ закалочного устройства, никогда не превышающий 0,7, а генератор 3 можно хорошо использовать лишь при $\cos \phi = 1$ или даже опережающем $\cos \phi \approx 0,7—0,8$, то всегда применяют компенсацию индуктивной составляющей тока, включая в цепь батарею конденсаторов 5. Эту батарею также обычно строят на сравнительно высокие напряжения (примерно 750—1500 в); поэтому трансформатор также необходим.

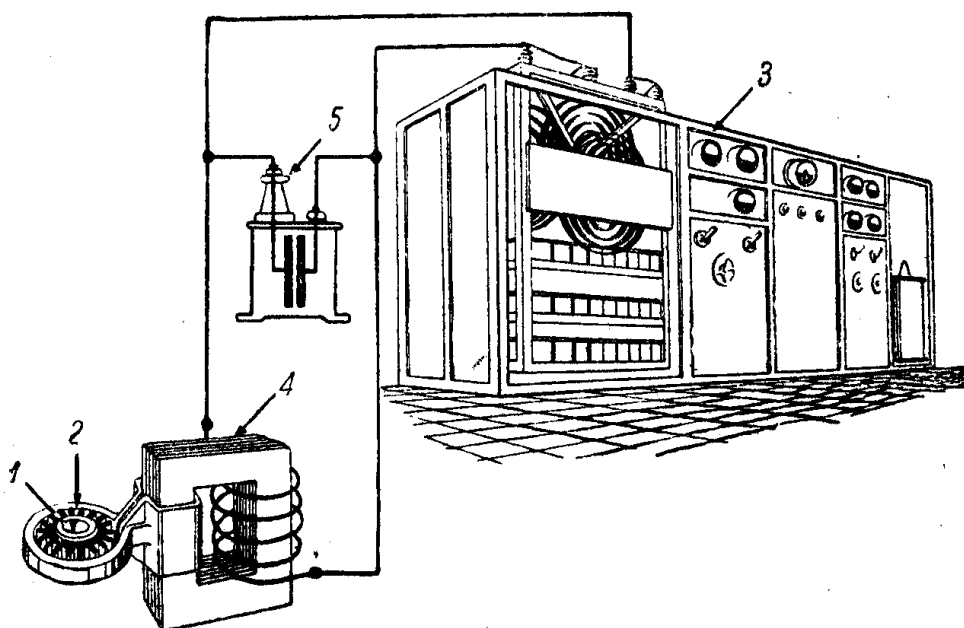
Если для закалки целесообразно использовать токи радиочастот (15 000—10⁶ гц), то вместо машинного генератора применяют ламповый генератор 3 (фиг. 6). Остальные составные части устройства будут те же, что и в случае машинного генератора, но трансформатор в этом случае почти всегда делают с воздушной магнитной цепью.

При ламповом генераторе в некоторых случаях схему всего устройства упрощают так, что трансформатор закалочного устройства, а иногда и индуктор одновременно служат частью контура лампового генератора (фиг. 7). Такое упрощение в свою очередь вносит некото-

¹ E. d. Bennett, El. Heating by the Proximity Effect, The Welding Journal, Oct. 1936.

рые отрицательные стороны в работу всего устройства; поэтому его нельзя рекомендовать во всех случаях.

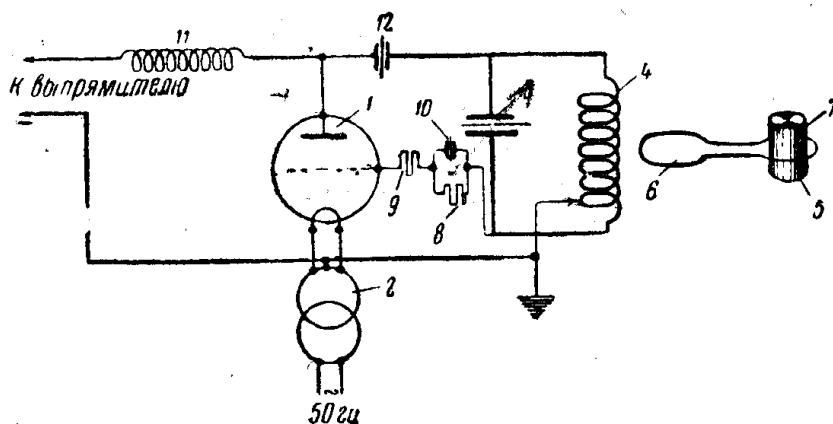
Так как из изложенного следует, что трансформатор представляет почти неотъемлемую часть каждой закалочной установки, то расчету трансформатора посвящена глава IX.



Фиг. 6. Схема устройства с питанием от лампового генератора.

1—закаливается тело; 2—индуктор; 3—ламповый генератор; 4—трансформатор; 5—конденсатор.

Выше были рассмотрены основные составные части закалочного устройства и показано в общих чертах, как идет нагрев под закалку. Однако, помимо чисто тепловой и электрической сторон, с этим мето-



Фиг. 7. Схема лампового генератора с самовозбуждением без промежуточного контура.

1—генераторная лампа; 2—трансформатор накала лампы; 3—конденсатор колебательного контура; 4—индуктивность колебательного контура; 5—индуктор; 6—связь между контуром 3—4 и индуктором 5; 7—нагреваемое тело; 8—гридлик; 9—антипаразитное сопротивление; 10—конденсатор гридлика; 11—защитная индуктивность; 12—конденсатор.

дом связаны и некоторые вопросы, относящиеся к превращениям в металле при нагреве и при охлаждении, к получению той или другой структуры и твердости и других свойств закаленного слоя. Поэтому в главах II, IV, IX и XIII затронуты также чисто металловедческие

вопросы, вытекающие из особенностей данного метода. Чтобы металловедческая сторона гармонировала с трактовкой тепловой и электрической части метода, автор сделал попытку применить математический анализ, в частности, метод подобия, хотя представляет некоторый риск чрезмерно упростить физическую картину процесса.

4. Особенности, характеризующие индукционный метод заковки

Преимущества метода в целом: 1) однородность заковки различных деталей; 2) высокая отдача; 3) отсутствие нагрева незакаленной части; 4) возможность получать при наибольшей вязкости сердцевины большую твердость поверхности; 5) возможность поточного производства; 6) большая производительность устройства; 7) малое время нагрева; 8) легкость осуществления точного контроля над процессом; 9) использование автоматики.

Тепловая сторона нагрева: 1) выделение тепла не передачей поверхностному слою, а в некотором слое любой заданной глубины (глубинный нагрев); 2) вытекающая отсюда возможность нагрева в любое заданное время без перегрева, а также получение малого нагрева сердцевины тела и высокого термического к. п. д.; 3) использование для нагрева поверхностного слоя на ту или другую глубину в некоторых случаях явлений распространения теплового потока и распределения температур, связанных с кривизной поверхности (глава VI); 4) независимость от распространения тепла теплопередачей; 5) возможность получать с большой точностью требуемые температуры и желаемое распределение температур по глубине нагреваемого слоя.

Электрическая сторона метода нагрева: 1) передача энергии индукцией, что исключает влияние контактов, состояния поверхности и т. д.; 2) возможность путем подбора частоты менять глубину, на которой сосредоточен ток, а значит, и менять характер распределения тепла по глубине; 3) возможность путем изменения плотности мощности получать то или другое магнитное насыщение в зоне прохождения тока и вытекающая отсюда возможность приближения к равномерному распределению плотности тока в нагреваемом слое по глубине (заквадративание кривой тока); 4) возможность, увеличивая частоту, достигать весьма большой концентрации энергии в слое любой глубины, откуда вытекает легкость осуществления необходимой быстроты проведения процесса нагрева; 5) легкость регулирования и дозировки энергии; 6) возможность распределять плотность тока по требуемому закону как на поверхности закаливаемого тела, так и по глубине, используя поверхностный эффект, явления близости и явлений, создаваемых расчлененными магнитными экранами; 7) возможность использовать зависимость распределения плотности тока от кривизны поверхности для получения требуемой глубины закаленного слоя в телах сложной конфигурации, особенно с комбинированным использованием зависимости теплопередачи от кривизны поверхности (глава VI).

Металловедческая сторона: 1) возможность вести процесс нагрева без перегрева отдельных частей; 2) возможность, подбирая температуру и время, получать требуемую структуру при полном растворении и при отсутствии крупной зернистости; 3) возможность более быстрого охлаждения глубоколежащих слоев ввиду отсутствия нагрева внутренней части тела и наличия теплопередачи при заковке также и к внутренним частям металла; 4) отсутствие нагрева внутренних частей, что дает более благоприятное распределение напряжения внутри закаливаемого

тела; 5) получение большей твердости ввиду отсутствия перегрева, равномерности нагрева и отсутствия нагрева внутренней части; 6) возможность точно подбирать время нагрева и температуры, независимо от формы тела и глубины закаленного слоя, обусловленных глубинным выделением тепла; 7) использование высоких температур для получения полного растворения при коротком времени нагрева.

5. Основные закономерности, использованные лабораторией автора при разработке метода

В области термии: 1) закон теплопередачи при нагреве поверхности, уравнение (I, 1); 2) выделение тепла в глубинных слоях и связанное с этим достижение быстрого нагрева без перегрева; закон теплопередачи с внутренними источниками тепла, уравнение (I, 2); 3) зависимость распределения температур в поверхностных слоях тела при поверхностном и глубинном нагреве от кривизны поверхности, уравнения (III, 32), (III, 39), (III, 43), (III, 46), (III, 48) и (III, 50).

В области электротехники: 1) закон индукции и, в частности, возможность концентрации энергии при увеличении частоты, уравнения (V, 1), (V, 5), закон Джоуля; 2) поверхностный эффект (скин-эффект) и зависимость его от частоты, уравнение (V, 22); 3) явление близости, уравнения (V, 28) и (V, 34); 4) катушечный эффект, уравнение (V, 44); 5) явления вытеснения тока при наличии железных расщепленных экранов, численно выражаемые уравнением Фильда, уравнение (V, 58).

В области, связывающей электротехнику и тепловые явления: 1) изменение магнитной проницаемости μ до 1 в точке Кюри, влекущее за собой при переходе через эту точку большое изменение глубины проникновения; 2) изменение электрических параметров ρ и μ и тепловых при нагреве и, в частности, при переходе через точку Кюри.

6. Содержание отдельных глав

Главы III, IV и V посвящены перечислению закономерностей, послуживших основой индукционного метода. В главах XIII, XIV и XV описано закалочное устройство и его составные части, а также приведен опытный материал по применению данного метода.

Вопросу определения основных параметров посвящена глава XI. Здесь возможно было бы дать ход расчета одной из установок, однако опыт лабораторной работы показал, что такой расчет хотя и полезен, но не всегда дает лабораторным и заводским работникам ясное представление о тех физических зависимостях, которым подчиняется закалочная установка, что необходимо в случае применения индукционного метода для закалки детали новой формы. Иногда необходимо хотя бы ориентировочно определить потребную мощность и размеры индуктора и других деталей, не прибегая к расчету, требующему много времени.

Ввиду этого в главе VII дано достаточно известное изложение общих принципов метода подобия. Пользуясь этим методом, возможно без громоздких подсчетов, исходя из опытных данных или из имеющихся уже расчетов, определить основные параметры всего закалочного устройства, индуктора и трансформатора. В тех случаях, когда сложность детали не позволяет найти решение посредством подсчета и приходится обратиться к опыту, применение подобия сокращает число необходимых опытов или позволяет произвести их не на громоздких и дорогих изделиях, а на малых моделях.

В этой работе автор сделал попытку использовать метод подобия во всех областях физики, охваченных методом индукционной закалки, начиная от электрической части устройства в виде закалочного трансформатора, индуктора; далее он применил метод подобия для тепловой задачи нагрева тела. Наконец, автор сделал попытку применить подобие в чисто металловедческой области.

Любопытно отметить, что величины, связывающие электрические параметры с тепловыми, а именно: плотность мощности (мощность на 1 см^3) и удельная мощность (мощность на 1 см^2 поверхности), получают одни и те же коэффициенты подобия при изменении линейных размеров системы как в электрической, так и тепловой задаче. Поэтому при изменении линейных размеров системы в n раз из одной таблицы можно сразу получить и электрические и тепловые параметры. Так же точно автор сделал попытку, пользуясь коэффициентами подобия, привести в виде одного графика данные закалочного трансформатора для любых мощностей.

ГЛАВА II

НАГРЕВ ПОД ПОВЕРХНОСТНУЮ ЗАКАЛКУ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ. ТИПЫ НАГРЕВА. ЧАСТОТА И СВЯЗЬ ЕЕ С ТИПАМИ НАГРЕВА

1. Требования, предъявляемые к методу

При решении каждой технической задачи надо выполнять ряд требований. Некоторые из этих требований являются общими почти для всех задач техники. Техническая наука должна уметь давать ответ на все эти требования и рассматривать все явления исключительно с точки зрения этих требований; все ее построение должно быть направлено в эту сторону. Совершенно естественно, что другие науки, например, близкая к технической — физическая, должны рассматривать те же явления с другой точки зрения, удовлетворяя другим требованиям. Здесь может быть известное разногласие.

Необходимо отметить, что высказанное положение не всегда выполняется. Те требования, которые органически связаны с той или другой задачей, как технической, часто упускают из виду. Это приводит к неправильному выбору пути для решения данной технической задачи, следствием чего является неправильность самого решения.

При разработке индукционного метода в ряде случаев не избежали ошибок, вытекающих из недостаточно четкого представления о том, какие требования связаны с каждой технической задачей. Поэтому развитие применения данного метода задержалось, несмотря на благоприятные перспективы.

Вследствие этого приведем возможно более четкий перечень требований, стоящих перед методом индукционной закалки, как одним из методов техники. В основном эти требования сводятся к следующему:

- 1) наиболее широкое выполнение всех требований, поставленных физикой процесса;
- 2) возможно большая экономичность этого процесса с точки зрения расхода энергии, амортизации и рабочей силы;
- 3) наибольшее соответствие процесса производственным требованиям, в том числе осуществление процесса в наиболее короткое время, при возможно меньших площадях для устройства и минимальном использовании внутризаводского транспорта.

Прежде всего остановимся на первом требовании, которое в числе других элементов содержит качество продукции, даваемой данным методом. При поверхностной закалке прежде всего представляет интерес термическая сторона, а затем уже энергетическая.

Чтобы внести наибольшую ясность в это, рассмотрим термическую сторону, не останавливаясь пока на том, при помощи каких электрических устройств осуществляется здесь нагрев.

В качестве исходных пунктов надо принять те основные требования, которые предъявляют к данному процессу, как к одному из процессов термической обработки. Эти требования устанавливают металловеды в зависимости от марки металла, предшествовавшей термической обработке, требуемой твердости, глубины закаленного слоя, отсутствия напряжений, поводки и пр.

На основе всех этих сложных металловедческих требований выберем лишь те параметры, которые дадут возможность упростить рассмотрение процесса и точно учесть условия его ведения. Это не значит, что всегда лишь перечисленные ниже параметры могут быть учтены при рассмотрении вопроса.

Вводя новые параметры, возможно также обусловить выполнение некоторых дополнительных требований. Однако это вызовет усложнение, и вопрос в значительной степени утратит ясность. Поэтому надо ограничиться лишь основными металловедческими параметрами.

2. Основные параметры, определяющие метод

Температура закалки T_k . Температурой закалки будем считать ту температуру, при достижении которой в заданное время нагрева t_k слоя, отвечающего глубине x_k , произойдут необходимые для получения требуемой структуры превращения. Здесь, как и ниже, буквой T с тем или другим знаком будем обозначать температуру в градусах Цельсия. Превышение же температуры T над окружающей $T_0 \approx 20^\circ$ будем обозначать через θ , т. е.

$$\theta = T - T_0.$$

Перегрев наружного слоя ΔT . Под перегревом будем разумеать превышение температуры наружного закаливаемого слоя $T_{x=0}$ над закалочной температурой T_k , которая бывает на глубине x_k в конце нагрева, т. е.

$$\Delta T = T_{x=0} - T_k = \theta_0 - \theta_k.$$

Глубина закаленного слоя x_k принимается равной расстоянию от наружной поверхности до слоя с закалочной температурой T_k .

Время нагрева t_k . Временем нагрева будем называть время, необходимое для повышения температуры слоя на глубине x_k до закалочной температуры T_k при заданном перегреве ΔT .

Минимальное время нагрева t_{min} будет представлять минимальное время, достаточное для осуществления указанных выше превращений. В течение этого времени поверхности тела сообщают необходимый для ее нагрева тепловой поток. Следует отметить, что под минимальным временем нагрева не надо понимать время, в течение которого слой на глубине x_k будет находиться при температуре T_k , а надо считать лишь время, потребное для того, чтобы при нарастании температуры по некоторому закону в слое с глубиной x_k от начальной температуры T_0 до T_k произошли требуемые превращения.

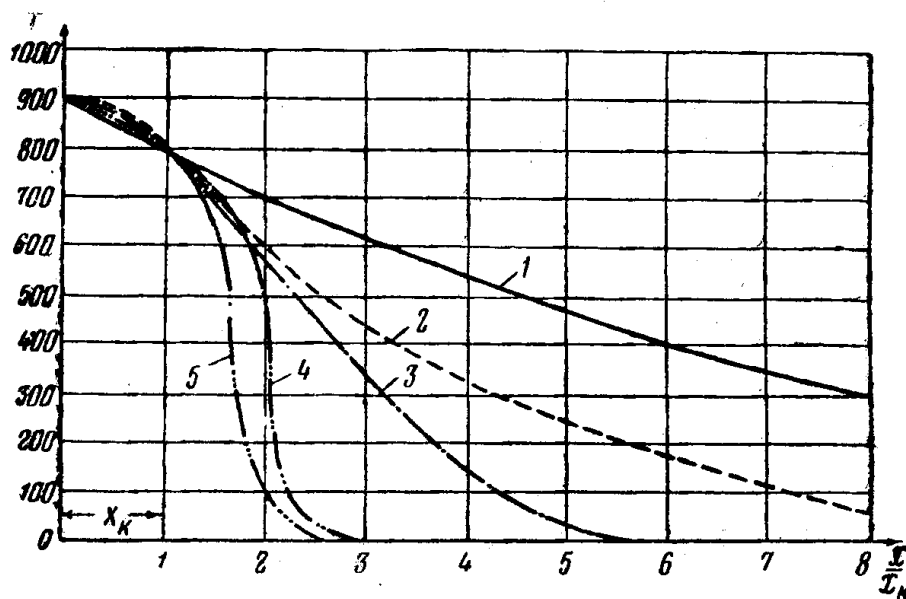
Скорость охлаждения $\frac{d\theta}{dt}$. Эта величина представляет особый интерес при прохождении закаливаемым слоем в процессе его охлаждения температур, отвечающих наименьшей устойчивости

аустенита. Для углеродистой стали здесь идет речь об интервале между $500-600^\circ$ и поэтому в дальнейшем при численных расчетах особое внимание уделим скорости $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ для температуры 550° .

Скорость охлаждения $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ вместе с закалочной температурой T_k определяет глубину закаленного слоя.

Критическая скорость охлаждения представляет наименьшее значение скорости охлаждения $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ при температуре $550-600^\circ$, при которой металл получит закалку до требуемой твердости.

Эта скорость зависит прежде всего от марки стали и от температуры, до которой был нагрет металл. Каких-либо других чисто металлургических параметров в дальнейшем вводить не будем. Та или другая структура, твердость на поверхности и ее распределение по глубине должны быть увязаны с перечисленными параметрами и вытекать из них.



Фиг. 8. Распределение температур в теле при различном характере выделения тепла и к. п. д., p —квт/см².

1—чисто поверхностный нагрев $\xi = 0$; $p = 0,43 \frac{\lambda}{x_k}$; $\eta = 13\%$;

2—глубинный нагрев, $p = 1,0 \frac{\lambda}{x_k}$; $\eta = 24\%$;

3—глубинный нагрев, $p = 3,1 \frac{\lambda}{x_k}$; $\eta = 34\%$;

4—глубинный нагрев, $p = 30,1 \frac{\lambda}{x_k}$; $\eta = 42\%$;

5—глубинный нагрев, осуществляемый при больших удельных мощностях в действительных условиях: η до 60%.

В дополнение к этим параметрам, хорошо известным термистам, лаборатория автора предложила еще один параметр, охватывающий и металлургическую и энергетическую стороны процесса. Этот параметр назовем **термическим к. п. д.** и будем его обозначать буквой η .

Под термическим к. п. д. надо понимать следующее отношение:

$$\eta = \frac{\text{тепло, потребное для нагрева поверхностного слоя} \\ \text{глубиной } x_k \text{ до температуры } T_k}{\text{все тепло, сообщаемое всему телу}}.$$

Термический к. п. д. в значительной степени определяет и перегрев и нагрев остальной, незакаленной, части тела.

Величина η определяется почти исключительно формой кривой распределения температуры в теле к концу нагрева. Поэтому, помимо чисто энергетического значения, влияющего на расход энергии на закалку, эта величина влияет на время закалки, величину переходного слоя, нагрев, часто и на отпуск незакаливаемой внутренней части тела и, наконец, что особенно важно, термический к. п. д. η косвенно отражается на величине внутренних напряжений, т. е. на прочности детали после закалки. Возможность получить в теле то или иное распределение температур, или что то же, тот или другой к. п. д., является особенностью данного метода нагрева и эту возможность надлежит использовать полностью.

На фиг. 8 показаны кривые распределения температуры в теле, как идеальные, так и осуществляемые при данном методе, с указанием относящихся к ним величин термического к. п. д.

3. Закалочная температура T_k

Значение закалочной температуры, как это вытекает из приведенного выше определения, зависит главным образом от материала, подлежащего закалке. В табл. 1 приведены некоторые ориентировочные данные о температурах T_k для сталей различных марок. Эти температуры даны для нагрева как в течение нескольких десятков минут, так и в течение нескольких секунд.

Таблица 1

Температуры закалки для сталей различных марок

Марка стали	Закалочная температура, °C	
	медленный нагрев	нагрев в течение 3—5 сек.
45	815—845	825—860
У-10	760—790	820—840
У-7	790—820	
45-X	820—850	850—880
ШХ-15	835—850	910—930
Литье 0,40% С	—	900—920

При более коротком нагреве, составляющем 3—5 сек., надо брать более высокие значения, необходимые для полного растворения. Это допустимо, так как при коротком времени нагрева не приходится опасаться получить нежелательную структуру, даже если значительно превысить ту температуру, которая установлена опытом для закалки при обычном нагреве. При весьма коротком времени нагрева, неизбежном, например, при закалке тел сложной конфигурации или тел, имеющих тонкую стенку, приходится выбирать еще более высокую температуру.

Приведенные в табл. 1 данные для кратковременного и быстрого нагрева являются лишь ориентировочными, так как до сих пор нет систематизированной литературы, освещающей этот вопрос.

Помимо этого, закалочная температура зависит также от предварительной обработки стали перед поверхностной закалкой. Так, улучшенные стали допускают значительное понижение температуры T_k даже при весьма коротком времени нагрева. С этой точки зрения улучшение часто совершенно необходимо, особенно в тех случаях, когда сложная форма поверхности или тонкая стенка требуют очень короткого времени нагрева.

4. Перегрев наружной поверхности ΔT по отношению к закалочной температуре T_k

Если выбранная закалочная температура T_k является оптимальной, то значительное превышение ее в каких-либо частях закаленного слоя нежелательно. Однако при всех способах нагрева всегда неизбежно некоторое превышение температуры наружного слоя по сравнению с закалочной температурой T_k на глубине x_k . Поэтому основное требование при разработке метода должно состоять в том, чтобы перегрев был наименьшим.

Перегрев тесно связан с получением на поверхности нежелательной структуры, и очень часто лишь один он является препятствием к уменьшению времени нагрева под закалку.

5. Время нагрева под закалку t_k

Так как производительность устройства и использование закалочного станка всецело зависят от времени нагрева t_k , то это время должно быть возможно меньше. Однако индукционный метод дает возможность столь сильно сократить время нагрева, что приходится увеличивать его, так как уменьшение влечет за собой ряд затруднений.

Одно из них то же, что и при обычном нагреве: это увеличение перегрева, связанное с очень коротким временем нагрева при некоторых режимах индукционного метода. Это ограничение легко учитывается уравнениями, приведенными в главе III.

Другое ограничение состоит в том, чтобы время нагрева не было короче минимального времени t_{min} , необходимого для завершения требуемых превращений. Время t_k зависит от выбранной температуры T_k (см. главу VIII).

Обычно при закалке индукционным методом время нагрева под закалку определяют с учетом ряда особенностей метода, охватывающих как его физическую, так и экономическую стороны.

В табл. 2 приведены наиболее часто встречающиеся значения времени нагрева.

Таблица 2

Ориентировочное время нагрева различных деталей под закалку индукционным методом

Название детали	Диаметр или модуль мм	Глубина закален- ного слоя мм	Частота гц	Время нагрева сек.
Шейка коленчатого вала	30—60 70—100	2—4 4—5	2000 2000	3—5 5—8
Шейка поперечного бруса трактора	—	4—6	5000	6—8

Для ограничения уменьшения времени имеется еще одно обстоятельство, свойственное лишь индукционному методу. Это ограничение состоит в увеличении мощности установки, связанной с уменьшением времени нагрева при данном объеме закаленного слоя, что следует из уравнения (XI, 10).

Индукционный метод допускает столь быстрый нагрев, что очень часто приходится замедлять процесс, чтобы снизить производительность, но зато потреблять меньшую мощность согласно уравнению (XI, 10).

Таким образом третье ограничение определяет минимальное время нагрева на основании соображений установленной мощности и производительности в виде уравнения (XIII, 5).

6. Критическая скорость охлаждения $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{кр}$

Значение критической скорости оказывает решающее влияние и на твердость закаленного слоя и на получение при поверхностной закалке той или другой глубины закаленного слоя.

Если при закалке до малых глубин (примерно $x_k = 1-3$ мм) при одновременной закалке почти на всех употребительных марках стали глубина закаленного слоя определяется лишь значением закалочной температуры, которая должна быть осуществлена на глубине x_k , то при больших глубинах это условие соблюдается лишь для сталей с низким значением критической скорости, например, для легированных. При сталях же с высокими критическими скоростями глубина закаленного слоя определяется, помимо условия осуществления на требуемой глубине x_k температуры, равной или превышающей закалочную T_k , еще и наличием на этой глубине x_k скорости охлаждения $\frac{\partial \theta}{\partial t}$, при температурах примерно около 500—600°, не меньшей критической. Более подробно это описано в главе IV.

Критическая скорость, помимо марки стали и ее предварительной обработки, зависит также и от температуры, до которой был нагрет закаливаемый металл¹, что должно быть учтено при определении глубины закаленного слоя.

Для сплошного нагрева и обычных методов закалки в литературе достаточно материала для значений критической скорости, однако для быстрого нагрева в условиях поверхностной индукционной закалки ничего нет. Ввиду этого в табл. 3 приведены некоторые данные для критических скоростей различных марок стали, отвечающих обычной закалке, которыми можно пользоваться при ориентировочных расчетах, пока не будет собран материал, отвечающий условиям закалки индукционным методом.

7. Термический к. п. д.

Процесс нагрева индукционным способом необходимо вести при наиболее высоком термическом к. п. д., так как при этом почти линейно уменьшается стоимость установки и расход энергии на нагрев. Кроме того, высокий к. п. д. обуславливает отсутствие значительного прогрева части тела, не подлежащей закалке. Правда, что при увеличении к. п. д. увеличивается перегрев наружной поверхности.

Несмотря на ряд благоприятных условий, сопровождающих высокий к. п. д., часто приходится идти на его понижение, так как высокий

¹ T. Digges, Influence of austenitic grain size on the critical cooling rate of high-purity iron-carbon alloys, Journal of Research of the Nat. Bureau of Standards, v. 24, 1940, p. 730.

Таблица 3

Критические скорости охлаждения при обычной закалке для различных марок стали

Сталь	Состав, %			Критическая скорость охлаждения °C/сек.	Температура нагрева °C	Источник
	C	Mn	Cr			
Углеродистая	0,46	0,46	—	210—300	930—880 ¹	T. Digges, Journal of Research Nat. Bureau of Standards, 1938, № 5, p. 571—587
	0,57	0,46	—	190—250		
	0,76	0,46	—	130—200		
	1,15	0,46	—	100—538		
Марганцовистая	0,35	2,20	—	8	930—880	H. Esser, W. Eilender u. Majert, Arch. f. d. Eisenhüttenwesen, 7, 1933—1934, H. 6, S. 367—370
	0,4	1,60	—	50		
	0,42	0,55	—	550		
Хромистая	0,48	—	1,11	100	950	
	0,55	—	0,56	400	950	
	0,52	—	1,96	22	950	
	1,09	—	0,53	300	1050	
	1,02	—	1,04	100	1050	
	0,92	—	2	25	—	

к. п. д. во многих случаях можно осуществлять лишь при сравнительно малом времени нагрева; это связано с большой производительностью установок высокой мощности.

Поэтому в случае малой производительности и невозможности полностью использовать установку приходится иногда идти на удлинение времени нагрева и понижение термического к. п. д.

Чтобы легче разобраться в часто противоречивых требованиях, предъявляемых ко всем перечисленным параметрам с точки зрения нагрева под закалку, в табл. 4 приведена сводка этих требований.

Таблица 4

Преимущества и недостатки, связанные с получением высокого термического к. п. д. при поверхностной закалке

Преимущества, создаваемые высоким к. п. д.	Недостатки, вытекающие из высокого к. п. д.
Малый расход энергии на закалку	Большой перегрев наружной поверхности, особенно при чисто поверхностном нагреве
Меньшая стоимость установки при полном использовании производительности	Большая установленная мощность
Малый прогрев незакаленной части. Меньшая поводка. Отсутствие отпуска незакаленной части	Чисто поверхностный нагрев

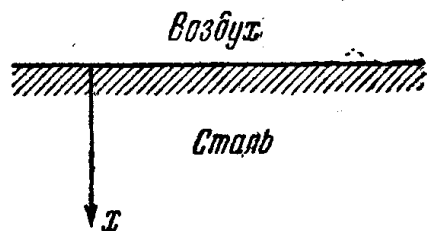
¹ Критическую скорость $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ определяли при 500—600°.

8. Требования, предъявляемые термической стороной процесса к нагреву под закалку

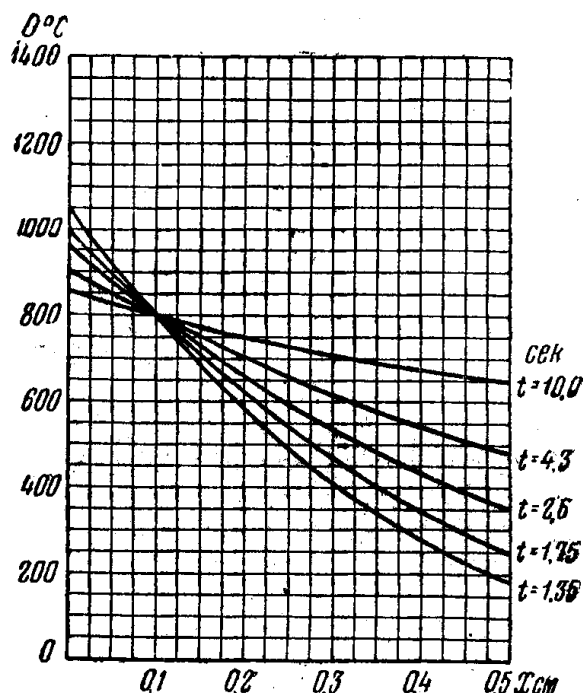
Сопоставим все требования, предъявляемые к выбранным параметрам, определяющим процесс нагрева под закалку, и выясним, каким образом можно удовлетворить этим требованиям.

Для большей простоты возьмем плоскую поверхность тела безграничной глубины (фиг. 9).

Основные требования, предъявляемые термистами к нагреву под поверхностную закалку, сводятся к малому перегреву, достаточно короткому времени нагрева и отсутствию нагрева глубоко лежащих частей металла. Этим требованиям можно удовлетворить в том случае, когда выделение тепла будет происходить не в очень тонком поверхностном слое металла, как при обычном нагреве в печах или нагреве пламенем, а равномерно во всем закаливаемом слое или его части. Слой, в котором выделяется тепло, будем называть «активным слоем» и обозначим его толщину через ξ . Так как выделение тепла внутри закаливаемого слоя представляет одно из самых существенных отличий



Фиг. 9. К нагреву плоской поверхности.



Фиг. 10. Распределение температуры при чисто поверхностном нагреве, при температуре $\theta_k=800^\circ$ на глубине $x_k=0,1$ см, для разных значений времени t ; $\theta=\varphi(x)$.

нашего метода, то остановимся на нем подробно еще раз, сравнив его с выделением тепла на поверхности при $\xi=0$.

Применяемая почти во всех других случаях нагрева передача тепла поверхности тела при всей своей простоте имеет тот недостаток, что при ней мы связаны уравнением теплопроводности (I, 1). Поэтому для распределения температуры имеем лишь одно семейство кривых, отвечающее этому уравнению. Из этих кривых (фиг. 10) могут быть найдены все интересующие нас величины: перегрев, термический к. п. д. и нагрев незакаливаемой части. Поэтому нет никаких средств создать условия вне зависимостей, вытекающих из кривых, приведенных на фиг. 10, и уравнения (I, 1).

В некоторых случаях такой нагрев удовлетворительно решает поставленную задачу. Это будет при весьма малых по сравнению с размерами тела глубинах закаленного слоя, а также при допустимости медленного нагрева и прогрева незакаливаемой части детали.

Однако в большинстве случаев нагрева под закалку такие допущения неприемлемы, так как часто требуется закалка сравнительно тол-

стого слоя металла при большой производительности, а значит, при малом времени нагрева и при отсутствии недопустимого перегрева и нагрева средней, незакаленной, части металла.

9. Нагрев с выделением тепла внутри закаливаемого слоя.

Глубинный нагрев $\xi \approx x_k$.

Единственным решением задачи в этом случае будет предложенный лабораторией автора способ нагрева с выделением тепла внутри закаливаемого слоя. При таком нагреве отпадают ограничения, даваемые уравнением (I, 1) и кривыми, приведенными на фиг. 10.

Кроме того, здесь можно получить любое число вариантов для кривых распределения температуры при одном и том же тепловом потоке, если менять закон распределения тепла в закаливаемом слое, определяемый уравнением (I, 3):

$$w = \varphi(x, t).$$

Ранее при данном тепловом потоке можно было иметь лишь одну кривую распределения температур и выбор теплового потока при заданной глубине x_k и T_k определял все величины и весь характер кривой распределения температуры.

Отсюда следует, что нагрев при выделении тепла внутри закаливаемого слоя имеет большое значение. Поэтому для данного метода примем его за основной и будем стараться использовать, где только возможно. Чисто поверхностный нагрев будет нами охвачен как частный случай, отвечающий значению толщины слоя, в котором выделяется тепло, $\xi = 0$.

Тот процесс нагрева, который существует в действительности при индукционной закалке, несколько отличается, как это будет видно в дальнейшем, от описанного здесь. Однако, для ясности представления остановимся на простейшей схеме, отвечающей нагреву с равномерным выделением тепла в слое толщиной ξ .

10. Типы нагрева

На основании сказанного выше можно ввести упрощенную классификацию нагрева под поверхностную закалку, сведя ее к нескольким типам с определенными особенностями.

Эта классификация должна быть построена таким образом, чтобы она не была связана с теми или другими абсолютными глубинами закалки и размерами тела, а охватывала все случаи. Для этого необходимо либо выбрать в качестве единиц не абсолютные технические единицы, а какие-либо специальные, как об этом сказано в главе VII, п. 3, либо построить классификацию на основе технических единиц так, чтобы можно было использовать для охвата всех случаев закалки закон подобия, описанный в главе VII, п.п. 1 и 2.

В данном случае проще всего дать типы нагрева в зависимости от отношения глубины активного слоя ξ к толщине закаленного слоя x_k .

В табл. 5 приведена классификация, охватывающая основные типы нагрева, с характеристиками и условиями осуществления при индукционном нагреве каждого из них. При этом необходимо оговориться, что в данном случае мы остановились на упрощенном представлении нагрева, когда активный слой ξ , в котором происходит выделение тепла, остается во время нагрева постоянным.

В действительности этот слой, даже и при глубинном нагреве, не постоянен, а растет в процессе нагрева от величины, близкой к $\xi \approx 0$,

до некоторой величины $\xi \approx x_*$. Таким образом данные таблицы можно считать отнесенными к некоторой средней величине ξ , отвечающей упрощенному случаю.

На фиг. 8 приведено распределение температуры в теле, отвечающее всем типам нагрева. Эти кривые поясняют все те свойства отдельных типов нагрева, которые приведены в табл. 5.

Если табл. 5 дает указание термисту для выбора того или другого типа нагрева в зависимости от поставленных требований, то данные главы III позволяют найти численные значения и для распределения температуры внутри закаливаемого слоя и всего тела. Эти же данные позволяют найти значения для перегрева и термического к. н. д. не только для простейшего случая нагрева плоскости безграничной толщины, но и для более сложных форм поверхности, к которым можно свести поверхности, встречающиеся в практике закалки.

Так же точно глава V, дающая основные законы индукции и особенности прохождения токов высокой частоты, или, точнее, прохождения токов при наличии поверхностного эффекта, позволяет решить вторую часть задачи. При этом получают указания и численные значения для электрических параметров, которые необходимы для осуществления вытекающего из табл. 5 и главы III распределения выделяемой в слое и теле тепловой энергии.

В качестве связующего звена между тепловыми и электрическими параметрами будет служить следующее уравнение Джоуля:

$$P = RI^2 \frac{1}{1000}, \quad (\text{II}, 1)$$

а также

$$Q = 0,239RI^2t, \quad (\text{II}, 2)$$

где P — в *квт*; R — в *ом*; I — в *а*; t — в *сек*; Q — в *гкал*.

При этом результат прохождения тока будет определяться параметром p и w (p — удельная мощность в *квт/см²* и w — объемная плотность мощности в *квт/см³*). Эти же параметры будут фигурировать и при учете чисто тепловых явлений, как мощности, необходимые для осуществления того или другого распределения температуры в теле при его нагреве в течение времени t , общей мощности P *квт* или общего количества тепла Q *гкал*.

11. Осуществление требуемого типа нагрева и зависимость от частоты

В предыдущем параграфе были даны основные положения, отвечающие термическим требованиям, и указаны пути осуществления этих требований. При этом даны ссылки на основные тепловые закономерности, которые здесь могут быть использованы.

Перейдем к электрической стороне, которая должна заключать в себе ответ на вопрос, каким образом возможно создать условия, при которых могут быть осуществлены в нагреваемом теле токи, способные дать найденные из рассмотрения тепловой задачи плотности, мощности p и w , связывающие тепловую и электрическую задачи. При этом для величины w нас будет интересовать также возможность осуществления требуемого термистами распределения мощности w по глубине x и по времени t , т. е. создания тока, дающего требуемую зависимость $w = f(x, t)$.

Как видно из самого названия метода, необходимые для нагрева токи возможно осуществить посредством индукции. Для этого при нагреве цилиндрической поверхности ее окружают проводом с током и

Таблица 5

Классификация основных типов нагрева

Условия	1	Т и п н а г р е в а	3
Выделение тепла при нагреве тела	На поверхности $\xi = 0$	Частично на поверхности $0 < \xi < x_k$	Главным образом внутри закаливаемого слоя, равномерно $\xi \approx x_k$
Распределение температуры в теле	По закону теплопередачи; фиг. 8, кривая 1, уравнение (1,1)	Промежуточное между типами 1 и 3	Приближается к прямоугольнику, фиг. 8, кривая 5, уравнение (1,2)
Перегрев наружной поверхности	При быстром нагреве значителен	Промежуточный	Может быть малым даже при быстром нагреве
Нагрев внутренней, незакаливаемой, части тела	Значителен	Промежуточный	Может быть сделан малым
Время нагрева	Значительно, особенно при малом перегреве и больших глубинах (примерно несколько минут)	Промежуточное	Мало даже и при малом перегреве и больших глубинах (2—5 сек.)
Производительность	Мала	Промежуточная	Высока даже и при малом перегреве
Полезное использование тепла, передаваемого телу (термический к. п. д.)	Малое при $\Delta T = 100^\circ$ $\eta = 13\%$ $\Delta T = 150^\circ$ $\eta = 17\%$	Промежуточное	Высокое при $\Delta T = 150^\circ$ $\eta \approx 50\%$
Условия получения нагрева того или другого типа (частота, ω)	$f > \frac{400 \cdot 10^4}{x_k^2}$	$\frac{40 \cdot 10^4}{x_k^2} < f < \frac{400 \cdot 10^4}{x_k^2}$	$\frac{10^4}{x_k^2} < f < \frac{40 \cdot 10^4}{x_k^2}$
Удельная мощность, передаваемая телу p_1 , квт/см^2	При любой мощности	где x_k — глубина закаленного слоя, мм $p_1 > 0,1$	$p_1 > 0,5$ обычно около 1—2
Область применения	Закалка при малой производительности	Промежуточная	Массовая закалка с большой производительностью

пропускают по проводу ток той или иной частоты. Так как при этом выбирается достаточно высокая частота, то даже в теле небольших размеров нетрудно получить токи такой силы, при которой выделение тепла, согласно уравнению (I, 3), создаст любую требуемую поверхностную и объемную мощность, достаточную для нагрева закаливаемого слоя до температуры T_k в течение нескольких секунд.

Выбор достаточно высокой частоты, помимо достижения большой концентрации тока, обуславливается также и тем, что ток должен проходить не по всему сечению тела, но главным образом сосредотачиваться в поверхностном слое вследствие поверхностного эффекта, описанного в главе V.

Самое распределение плотности тока, от которой зависит в значительной степени тип нагрева (табл. 5), будет определяться для выбранных параметров тела частотой тока, как это указано для различных случаев в главе V.

Если теперь возвратиться к тем требованиям, которые ставит чисто термическая задача, и в частности к осуществлению выделения тепла для различных типов нагрева с активным слоем ξ различной глубины, то нетрудно убедиться в том, что уравнение (I, 4) указывает на возможность получить распределение тока, отвечающее упомянутым требованиям.

Рассмотрим с этой точки зрения прежде всего первый тип нагрева, при котором активный слой $\xi = 0$.

Для получения плотности тока, сосредоточенного практически на поверхности, достаточно выбрать столь высокую частоту, чтобы величина δ по уравнению (I, 4) была мала по сравнению с глубиной закаливаемого слоя x_k . Практически достаточно принять $\delta < 0,3 x_k$. Тогда, принимая приближенно, что в большинстве случаев допустимо $\rho = 0,2 \cdot 10^{-4}$ омсм и $\mu \approx 50$, получим указанное в табл. 5 условие для выбора частоты тока, обуславливающее нагрев первого типа:

$$f > \frac{400 \cdot 10^4}{x_k^2}, \quad (\text{II, 3})$$

где x_k — в мм.

Переходя к нагреву третьего типа, для которого тепло должно выделяться в активном слое $\xi \approx x_k$, найдем, что ток, отвечающий выделению тепла в слое глубиной x_k , может быть получен при такой частоте, при которой $\delta \approx x_k$. Если возьмем $x_k > \delta > 0,3 x_k$, то из уравнения (I, 4) для частоты тока при тех же предположениях, которые были приняты для первого случая, получим

$$\frac{10^4}{x_k^2} < f < \frac{40 \cdot 10^4}{x_k^2}. \quad (\text{II, 4})$$

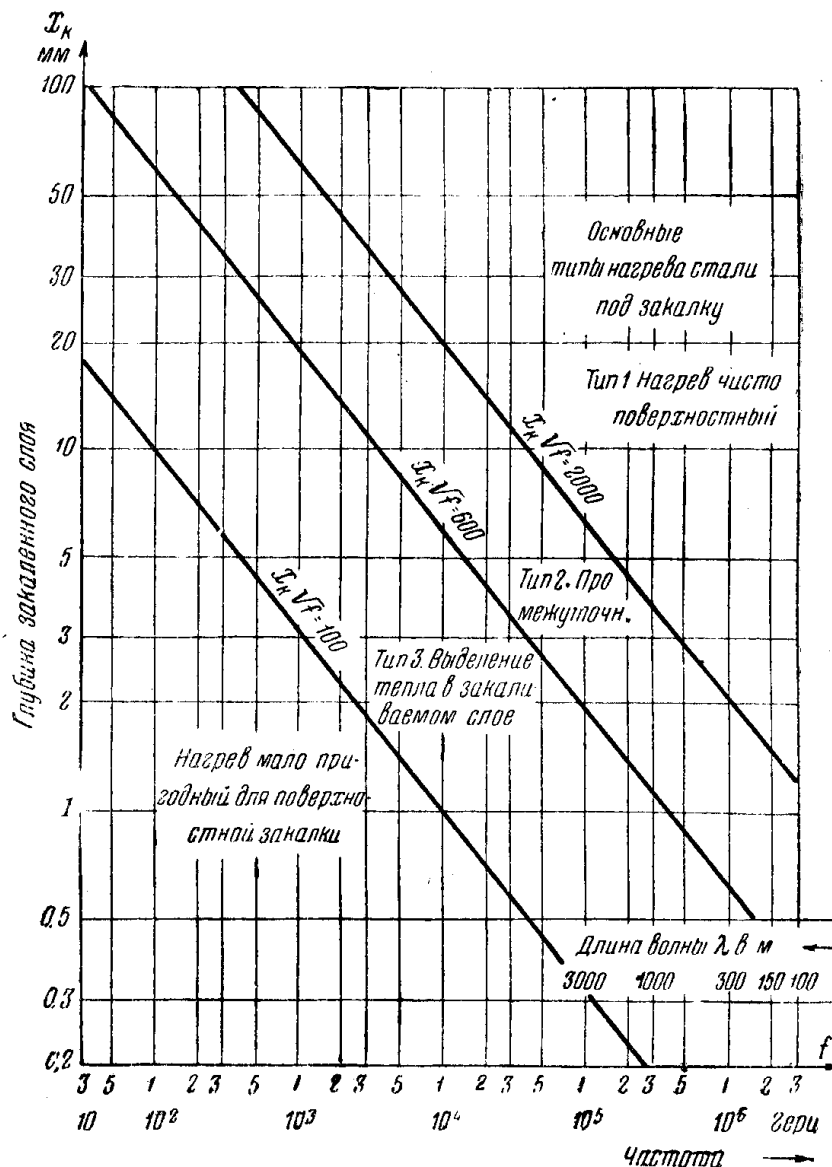
Здесь мы приняли для частоты f два ограничения, из которых первое осуществляет условие, заключающееся в том, чтобы величина δ , а значит, и ξ была больше $0,3 x_k$; второе ограничение состоит в том, чтобы величина δ или ξ не была меньше x_k .

Что касается нагрева второго типа, являющегося промежуточным, то для него подобными же рассуждениями можно получить следующее условие:

$$\frac{40 \cdot 10^4}{x_k^2} < f < \frac{400 \cdot 10^4}{x_k^2}. \quad (\text{II, 5})$$

Эти условия, как выведенные из соотношений для распределения тока при поверхностном эффекте в случае плоской поверхности или цилиндра значительного радиуса по сравнению с глубиной x_k , должны

быть отнесены лишь к этим случаям. При малых значениях радиуса цилиндра по отношению к x_k надо ввести поправки, исходящие из зависимости (для распределения тока) от радиуса кривизны, данные уравнением (V, 22). Однако, так как условия уравнений (II, 3), (II, 4), (II, 5) и данные табл. 5 являются лишь ориентировочными, то в большинстве случаев вводить поправки на кривизну не имеет смысла и можно пользоваться и для плоской задачи и для нагрева цилиндра условиями уравнений (II, 3), (II, 4), (II, 5) и табл. 5.



Фиг. 11. Зависимость частоты от глубины закаленного слоя для различных типов нагрева.

Лишь в тех случаях когда $\frac{x_k}{r} > 0,25$ и особенно в случае закалки фасонных поверхностей с различными радиусами кривизны, сильно отличающимися один от другого, для определения типа нагрева необходимо вводить поправку на кривизну и брать вместе x_k в неравенствах (II, 3), (II, 4), (II, 5):

$$x'_k = k_0 x_k,$$

где k_0 — поправочный коэффициент, зависящий от отношения $\frac{x_k}{r}$.

Изложенное выше указывает на возможность, создавая индукционные токи, достигнуть в закаливаемой поверхности такого распреде-

ния плотности токов, при котором будет получено требуемое выделение тепла и на поверхности и в слое такой глубины, какая будет задана условиями нагрева выбранного типа.

На основе сказанного для наиболее употребительных марок стали можно начертить график, позволяющий для каждого из выбранных типов нагрева определить частоту тока, питающего индуктор (фиг. 11).

На этом графике по оси абсцисс отложены в логарифмическом масштабе необходимые частоты тока, индуктируемого в закаливаемом слое, а по оси ординат (также в логарифмическом масштабе) — глубины закаленного слоя x_k . Точки пространства, ограниченного наклонными прямыми, отвечают тому или другому типу нагрева.

Для пояснения того, как нужно пользоваться этим графиком, в качестве примера зададимся закалкой на глубину $x_k = 3$ мм. Взяв эту величину на ординате и идя по горизонтали, дойдем до ее пересечения с наклонной линией $x_k \sqrt{f} = 100$.

Взяв для точки пересечения отсчет на оси абсцисс, получим 1000 гц. Это указывает, что частоты, более низкие чем 1000 гц, мало пригодны для закалки, так как при них тепло выделяется не только в закаленном слое, но и в значительной мере в более глубоких слоях, что нежелательно. Начиная же от 1000 гц, выделение тепла идет главным образом в закаливаемом слое. Поэтому эти частоты создают нагрев третьего типа, особенно благоприятный для процесса закалки.

Продолжая движение по горизонтали, мы пересечем наклонную прямую $x_k \sqrt{f} = 600$ в точке, дающей отсчет по оси абсцисс, равный $f = 40\,000$ гц. На основании этого можно сказать, что диапазон частот от 1000 до 40 000 гц для толщины закаленного слоя в 3 мм создаст нагрев третьего типа.

Подобным же образом по графику видим, что при дальнейшем увеличении частоты будет осуществляться промежуточный тип нагрева, пока линия, отвечающая $x_k = 3$ мм, не пересечет наклонной $x_k \sqrt{f} = 2000$. Точка пересечения дает частоту 500 000 гц или волну $\lambda = 600$ м. Начиная от этой точки, нагрев приобретает чисто поверхностный характер первого типа, практически не отличающийся от того нагрева, который происходит при использовании автогена или нагрева в печи лучистой теплотой.

Хотя на этом графике и дано резкое разграничение типов нагрева наклонными линиями, однако в действительности таких резких границ нет, и один тип нагрева плавно переходит в другой.

Приведенный здесь график неоднократно вызывал возражения, состоящие в том, что здесь не учитываются индивидуальные свойства стали в смысле самого процесса ведения закалки. Ввиду этого необходимо прибавить к сказанному ранее, что этот график не дает указаний о закалке на той или другой частоте, а лишь позволяет легко определить, какой тип нагрева или, иначе, какое распределение выделяемого в теле тепла создает та или другая частота. Для определения же частоты, наиболее благоприятной для закалки, необходимо еще учитывать ряд других обстоятельств, приводимых в главе XI, п. 1.

Несмотря на эту оговорку, можно сказать, что в огромном большинстве случаев приведенный график дает исчерпывающие указания для выбора частоты, особенно если принять во внимание данные табл. 5.

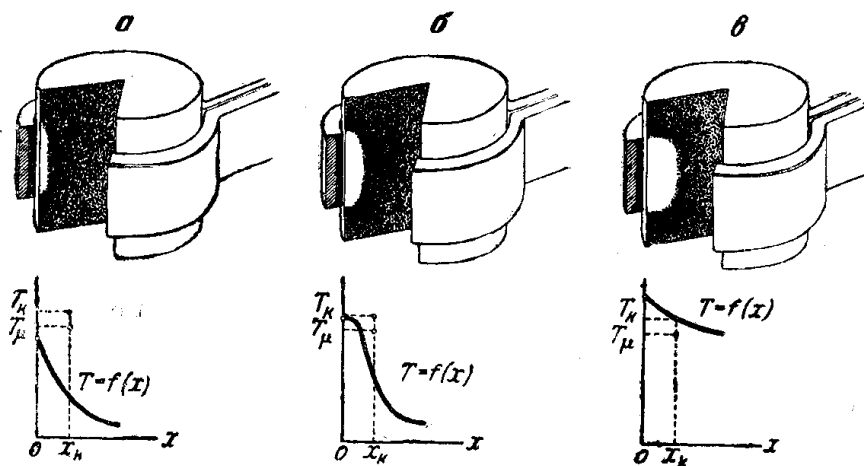
12. Прохождение процесса нагрева в действительных условиях без допущенных ранее упрощений

Во всех предыдущих случаях предполагалось, что и распределение плотности тока в поверхностном слое и отвечающее ему распределение выделяемого тепла и величина активного слоя ξ не зависят от вре-

мени, и функция объемной плотности тока w [уравнение (I, 3)] также не зависит от времени.

Хотя эти предположения и могут быть в большинстве случаев приняты для расчетов времени нагрева, потребной мощности и перегрева, однако иногда необходимо более точно рассмотреть процесс нагрева.

Для этого проанализируем процесс прохождения тока и повышения температуры не в отдельности, а в их взаимной зависимости, причем рассмотрим процесс с начальных стадий нагрева. При этом в дальнейшем ограничимся лишь описанием процесса нагрева, не давая расчетных формул ввиду значительной сложности вопроса.



Фиг. 12. Различные стадии нагрева цилиндрического тела.

а) наружный слой имеет температуру более высокую, чем T_μ ;

б) $T_s > T_\mu > T_{x_k}$; в) $T_s > T_{x_k} > T_\mu$.

Попытка дать этому процессу точный математический анализ была сделана Г. А. Разореновым по поручению автора (интересующиеся могут ознакомиться более подробно по его работам¹⁾).

Для более ясного представления об этом процессе обратимся к фиг. 12, где изображено нагреваемое тело цилиндрической формы с диаметром $d=50$ мм. Индуктор имеет вид кольца, по которому проходит ток высокой или повышенной частоты. Так как нас будет интересовать процесс нагрева, отвечающий третьему типу (глубинный нагрев), то в этом случае

$$\frac{10^4}{x_k^2} < f < \frac{40 \cdot 10^4}{x_k^2}.$$

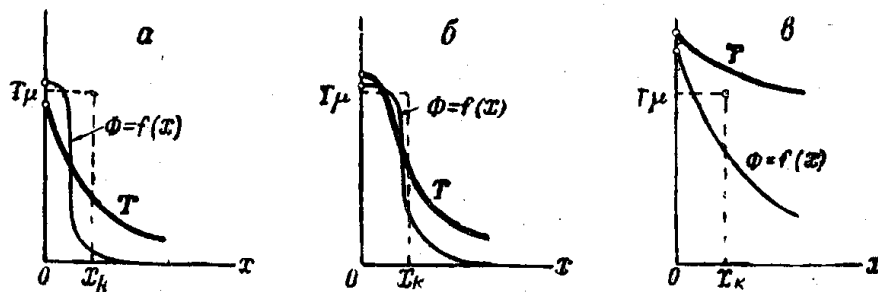
Поэтому примем частоту 2000 гц.

В момент включения, при $t=0$, индуктируемый в цилиндре ток будет сосредоточен почти исключительно на поверхности цилиндра, спадая приблизительно по экспоненте, согласно уравнению (V, 14), как это показано на фиг. 12, а; поэтому его можно считать проходящим по тонкому наружному слою глубиной $\delta=0,05$ см.

Уравнение (I, 4) даст малое значение δ , так как в начальный момент времени закаливаемая поверхность будет иметь низкую температуру, лежащую ниже точки A_{c2} . Поэтому магнитная проницаемость тела, определяющая по уравнению (I, 4) значение δ , будет примерно $\mu=10 \div 50$.

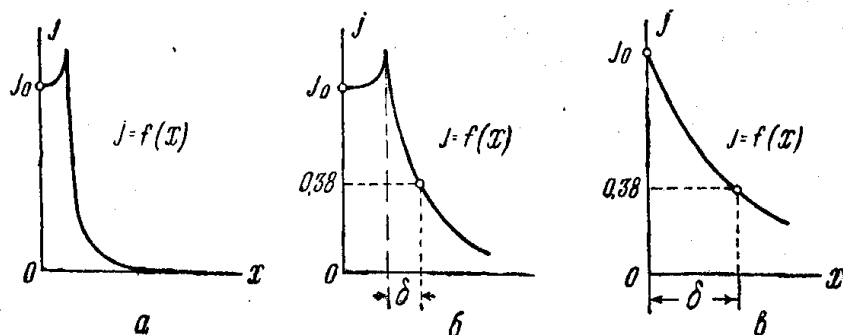
¹ Г. А. Разоренов, О распространении тепла при нагревании стального тела индукционным током, Журнал Технической Физики, 1939, т. IX, вып. 10, стр. 4 или В. П. Вологдин, Поверхностная закалка индукционным способом, ч. I, гл. II, стр. 44—66.

Некоторое отклонение спадающего тока от экспоненты происходит оттого, что в тонком слое толщиной δ имеет место значительная индукция, которая вызывает большое изменение величины μ на поверхности. Вследствие этого в наружных слоях тела магнитное поле примет форму, изображенную на фиг. 13. В этом случае ток, согласно уравнению (V, 24), примет, в свою очередь, форму, близкую к показанной на фиг. 14а.



Фиг. 13. Распределение магнитного поля при нагреве индукционным методом в случае значительного магнитного насыщения.
а) наружный слой имеет температуру $T_0 < T_\mu$; б) $T_0 > T_\mu > T_{x_k}$; в) $T_{x_k} > T_\mu$.

Такое отступление от экспоненты дает еще большее основание принимать в этом случае ток сосредоточенным равномерно в некотором тонком наружном слое толщиной δ .



Фиг. 14. Распределение плотности тока высокой частоты.
а) распределение плотности тока при значительном насыщении при $T_0 < T_\mu$ (фиг. 13, а); б) плотность тока при $T_0 > T_\mu > T_{x_k}$ (фиг. 13, б); в) $T_{x_k} > T_\mu$.

После нескольких секунд, а иногда и десятых долей секунды, температура наружного слоя превысит температуру T_μ , отвечающую точке A_{c2} , причем проницаемость в слое с температурой $T > T_\mu$ примет значение $\mu = 1$, тогда как остальная масса тела сохранит для проницаемости μ значение $\mu > 1$.

Кривая распределения индукции примет форму, изображенную на фиг. 13, б, что будет способствовать равномерному нагреву всего слоя с температурой $T > T_\mu$. Вследствие теплопроводности и большой плотности тока на границе, где сталь имеет температуру T_μ , весьма быстро будут нагреваться более глубокие слои поверхности без значительного перегрева наружного слоя. Слой с температурой $T > T_\mu$ будет как бы расширяться, продвигаясь по направлению к внутренним слоям тела. Такой процесс можно прекратить в любой момент, выключая ток и охлаждая поверхность. В этом случае получится закалка тонкого слоя x_k , часто значительно меньшего, чем глубина проникновения δ для горячей стали, когда $\mu = 1$ и δ_r из уравнения (I, 4) при 2000 гц получает значение около $\delta_r = 1,45$ см.

Такой процесс дает возможность применять сравнительно низкие частоты для закалки даже на небольшие глубины. Необходимо лишь, чтобы при этом процесс шел быстро и теплопроводность не играла решающей роли. Если процесс не останавливать тогда, когда прогреет до температуры T_μ значительно более тонкий слой x по сравнению с x_k , а продолжать нагрев, то после нагрева до $T > T_\mu$ на глубину $x > \delta_r$ распределение тока и потока в поверхностном слое примет форму экспоненты (фиг. 12, в, 13, в, 14, в). Но на этот раз ввиду наличия на большой глубине $\mu = 1$, явления насыщения не будут играть роли, и равномерный нагрев наружного слоя будет быстро утрачиваться вследствие образования перегрева. Этот случай будет иметь все признаки и свойства нагрева первого типа (чисто поверхностный нагрев). Это будет при 2000 гц и нагреве до глубины $x > 1,4$ см.

Сказанное выше свидетельствует о том, что при осуществлении нагрева третьего типа в самом ходе процесса заложены причины стабилизации температуры и отсутствия перегрева, а также получения высокого к. п. д.

Все это дает возможность с достаточной для практики точностью заменять описанный процесс, весьма трудный для анализа, более простым, при котором предполагается сосредоточение выделяемого тока и тепла равномерно в некотором активном слое ξ , считая ξ не зависящим от времени.

Практика лаборатории автора полностью подтвердила возможность принять это упрощение.

В случае достаточно быстрого нагрева при третьем типе изменяется форма кривой поля и кривой распределения температуры; это приближает такие кривые к прямоугольнику, в отличие от кривых температуры, близких для первого типа к треугольнику или, вернее, к экспоненте. Происходит, как принято говорить в лаборатории автора, «за-квадрачивание» нагрева.

Для получения распределения температур этой формы необходимо, таким образом, соблюдать следующие условия:

1. Горячая глубина проникновения δ_r должна быть больше x_k . Для этой частоты должно быть выполнено условие

$$f < \frac{40 \cdot 10^4}{x_k^2}.$$

2. Процесс надо вести быстро, чтобы теплопроводность не была решающим фактором для распределения температур.

Для выполнения второго условия удельная плотность мощности должна быть достаточно велика:

$$p > 0,5 \text{ квт/см}^2.$$

Изложенное в этой главе дает некоторое представление о методе в целом. Уточнить все затронутое здесь можно лишь на основе детального анализа отдельных частей процесса. Поэтому в дальнейших главах приведены материалы, касающиеся и тепловой и электрической сторон метода.

ГЛАВА III

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКЕ

1. Распределение температур и термический к. п. д. при нагреве тела бесконечной толщины с плоской поверхностью.

Чисто поверхностный нагрев, $\xi=0$

Успех развития индукционной закалки требует возможно более точно учитывать все явления, на которых этот метод основан. Из этих явлений прежде всего надо обратить внимание на нагрев тела посредством теплопередачи с его поверхности. Начнем с простейших случаев, а затем перейдем к более сложным¹.

Рассмотрим сперва нагрев плоского тела, имеющего весьма значительную глубину (см. фиг. 9). Здесь нас интересует распределение температур в рассматриваемом плоском теле в различные моменты времени t , в частности значение температуры на поверхности тела. Кроме того, нас интересует перегрев ΔT , т. е. разность между температурой наружного слоя и температурой на глубине закаленного слоя x_k . Наконец, рассмотрим, какая часть сообщаемого телу тепла будет полезно использована для его закалки. Для определения всех этих величин в качестве исходного уравнения возьмем приведенное ранее уравнение нестационарного теплового поля без источников тепла, так называемое уравнение теплопроводности — уравнение (I, 1):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2},$$

где $\theta = T - T_0$ — разность между температурой T в момент t и постоянной начальной температурой T_0 , которая существовала в начале нагрева в момент времени $t=0$;

x — глубина, измеренная от поверхности тела (см. фиг. 9);

a — коэффициент температуропроводности:

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}. \quad (\text{III, 1})$$

¹ Выражения для температуры θ и к. п. д. (глава III), также и выводы настоящего параграфа принадлежат Г. А. Разоренову, который разработал их по поручению автора. Частично изложенные здесь материалы уже были опубликованы ранее (см. Г. А. Разоренов, Ж. Т. Ф., т. IX, вып. 10, стр. 901; проф. В. П. Вологдин, Поверхностная закалка индукционным методом и т. д., ч. I, гл. 1 и 2. Г. А. Разоренов, О высокочастотной закалке шестерен, Известия Ленинградского электротехнического института, 1940).

Коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость c и удельный вес γ , а значит, и a изменяются с температурой. Мы примем для a и λ значения, отвечающие их средней величине в интервале между $20-850^\circ$, и будем выражать их в следующих единицах: *см*, *сек.*, *гкал*, $^\circ\text{C}$.

Для стали в среднем можно принять значения $\lambda=0,1$; $a=0,06$.

Кроме того, предположим, что нагревание тела будет производиться сообщением тепла наружному поверхностному слою. Тепловой поток или количество тепла, сообщаемого единице поверхности (1 см^2) в секунду, обозначим через q_0 .

Тепловой поток q_0 , который выражается в *гкал/см²сек*, для всех дальнейших подсчетов нам будет удобнее заменить подводимой к поверхности тела удельной мощностью p , выраженной в *квт/см²*. Так как $1 \text{ квт}=239 \text{ г}\cdot\text{кал/сек}$, то между q_0 и p можно написать соотношение

$$q_0=239p. \quad (\text{III}, 2)$$

В общем случае p может изменяться в процессе нагрева, т. е. может быть некоторой функцией времени:

$$p=\varphi(t). \quad (\text{III}, 3)$$

Полное количество тепла, сообщаемое единице поверхности за время t , будет

$$Q=239 \int_0^t p dt. \quad (\text{III}, 4)$$

Относительная температура Θ может быть представлена в виде

$$\Theta = \frac{239}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\vartheta}} e^{-\frac{x^2}{4a(t-\vartheta)}} \varphi(\vartheta) d\vartheta, \quad (\text{III}, 5)$$

где e — основание натуральных логарифмов; $e = 2,718...$

Из уравнения (III, 5) можно определить температуру на поверхности тела, если положить $x=0$:

$$\Theta_0 = \frac{239}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\vartheta}} \varphi(\vartheta) d\vartheta. \quad (\text{III}, 6)$$

В наиболее простом случае, часто отвечающем практике, удельную мощность можно принять постоянной, т. е.

$$p=\text{const.}$$

В этом случае общее количество тепла Q пропорционально времени:

$$Q=239pt, \quad (\text{III}, 7)$$

а температура поверхности тела Θ_0 , согласно формуле (III, 6), будет расти пропорционально корню квадратному из времени:

$$\Theta_0=239 \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} pt. \quad (\text{III}, 8)$$

Из уравнения (III, 8) видно, что через 1 сек. ($t=1 \text{ сек.}$) температура поверхности тела примет значение

$$\Theta_1=239 \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} p. \quad (\text{III}, 9)$$

Если принять для стали указанные выше приближенные значения λ , a , то формула (III, 9) дает

$$\Theta_1 = 660p.$$

Исходя из уравнений (III, 8) и (III, 9), мы можем выразить температуру поверхности тела Θ_0 в зависимости от температуры Θ_1 , которую примет поверхность через 1 сек., и времени t :

$$\Theta_0 = \Theta_1 \sqrt{t}. \quad (\text{III, 10})$$

Уравнение (III, 5) при $p = \text{const}$ дает следующее значение температуры Θ на расстоянии от поверхности x в момент времени t :

$$\Theta = 239 \frac{p}{\lambda} x \left[F_1 \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right) - 1 \right]. \quad (\text{III, 11})$$

Функция $F_1(z)$ может быть выражена через функцию Крампа (интеграл Гаусса) $\Phi(z)$ и ее производную $\Phi_1(z)$:

$$F_1(z) = \frac{1}{2z} \Phi_1(z) + \Phi(z). \quad (\text{III, 12})$$

В конце книги приложена таблица значений этой функции, составленная инж. А. М. Мартыновым. При малых значениях z приближенно

$$F_1(z) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{z} + z \right),$$

при больших значениях z приближенно

$$F_1(z) \approx 1.$$

Если заменить в формуле (III, 11) p на Θ с помощью равенства (III, 9), то, принимая во внимание (III, 12), получим

$$\Theta = \Theta_1 \sqrt{\pi t} \left\{ \frac{1}{2} \Phi_1(z) - z [1 - \Phi(z)] \right\}, \quad (\text{III, 13})$$

где

$$z = \frac{x}{2 \sqrt{at}}. \quad (\text{III, 14})$$

В уравнениях (III, 12) и (III, 13) функция Крампа (интеграл Гаусса) и первая производная этой функции имеют следующие значения:

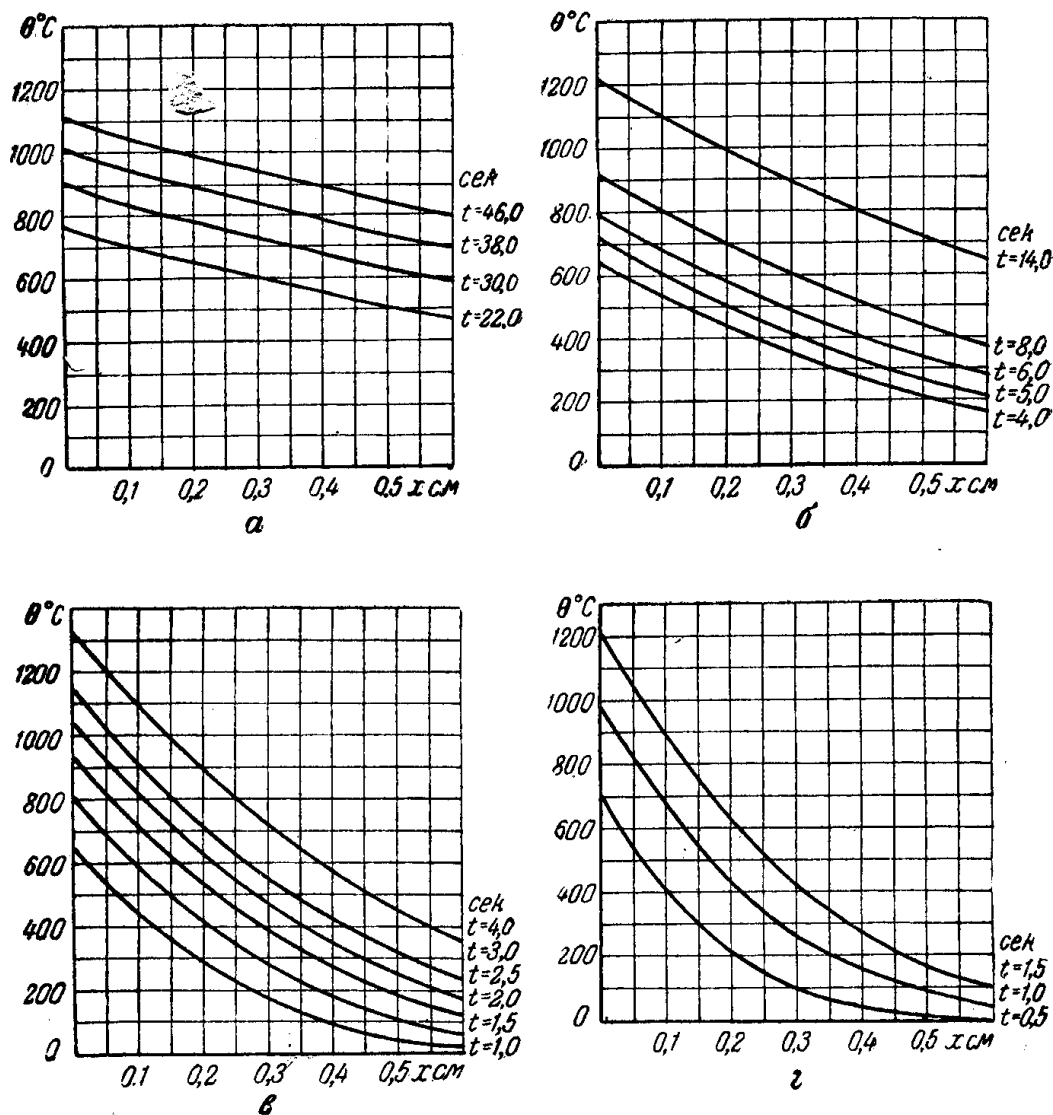
$$\left. \begin{aligned} \Phi(z) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\zeta^2} d\zeta \\ \Phi_1(z) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III, 15})$$

Эти функции могут быть найдены по таблицам¹. Уравнение (III, 11) дает возможность представить распределение температур по глубине тела, начиная от поверхности, для разных времен нагрева, если мы зададимся значениями температуропроводности, которая зависит, согласно уравнению (III, 1), от коэффициента теплопроводности λ и коэффициента теплоемкости c .

¹ Я. Н. Шпильрейн, Таблицы специальных функций, ч. I, 1933, стр. 19. Справочное руководство по машиностроению, т. I, Математика, Харьков, 1937, стр. 616.

Ниже приведены результаты числовых расчетов, проведенных по формуле (III, 11) при указанных выше средних значениях коэффициентов λ , α .

На фиг. 15 представлено распределение температуры в теле в зависимости от расстояния x от поверхности в различные моменты времени t , а на фиг. 16 показано распределение тех же температур, если



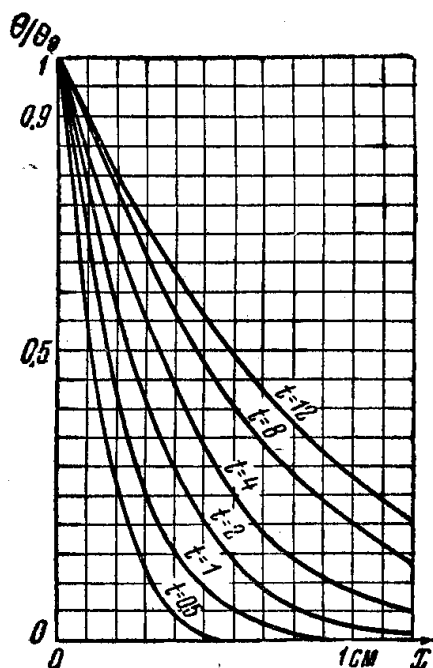
Фиг. 15. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности в различные моменты времени t ; $\Theta = \varphi(x)$. Плоское тело бесконечной толщины. Чисто поверхностный нагрев, $\xi=0$, $p=\text{const}$.

а) $p = 0,25 \text{ квт/см}^2$; б) $p = 0,50 \text{ квт/см}^2$; в) $p = 1,0 \text{ квт/см}^2$; г) $p = 1,5 \text{ квт/см}^2$.

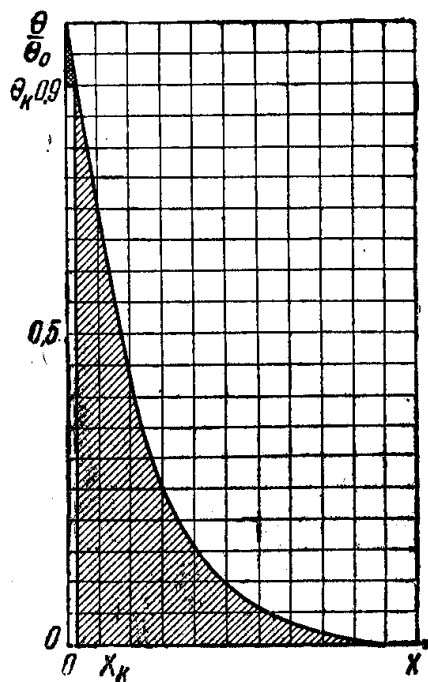
принять температуру наружного слоя для всех случаев $\Theta_0 = 1$. В этом случае каждая из кривых будет отвечать различным удельным мощностям.

Рассматривая кривые, приведенные на фиг. 15 и 16, можно видеть, что при передаче тепла наружной поверхности температуры падают при переходе к более глубоким слоям тем быстрее, чем меньше время нагрева t . Если исходить из нагрева наружного слоя до некоторой постоянной температуры Θ_0 , то, согласно уравнению (III, 8), при быстром нагреве потребуется большая удельная мощность p . Наоборот, при медленном нагреве, когда t значительно, удельная мощность p невелика, а температуры спадают медленно. Определив ход темпера-

турной кривой внутри нагреваемого тела, можно найти для рассматриваемого случая, т. е. для нагрева поверхности плоского тела постоянной удельной мощностью p , другие интересующие нас величины. Для этой цели зададимся каким-нибудь временем нагрева $t = \text{const}$ и начертим для этого времени, как это показано на фиг. 17, кривую распределения температур, начиная от наружного слоя и переходя к внутренним. Если задаться, кроме того, какой-либо глубиной закаливаемого слоя, например, равной x_k , и отложить эту величину на фиг. 17 по оси абсцисс, то эта глубина пересечет кривую температур в некоторой точке. Эта точка к моменту окончания нагрева должна отвечать температуре закалки Θ_k .



Фиг. 16. Зависимость отношения температуры на глубине x к температуре на наружной поверхности от глубины x ; $\frac{\Theta}{\Theta_0} = \varphi(x)$. Плоское тело бесконечной толщины. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$.



Фиг. 17. Зависимость отношения температуры на глубине x к температуре на наружной поверхности от глубины x ; $\frac{\Theta}{\Theta_0} = \varphi(x)$ при $t = \text{const}$. Температура Θ_k на глубине x_k . Плоское тело бесконечной толщины. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$. Заштрихованная часть отвечает бесполезному теплу, переданному телу.

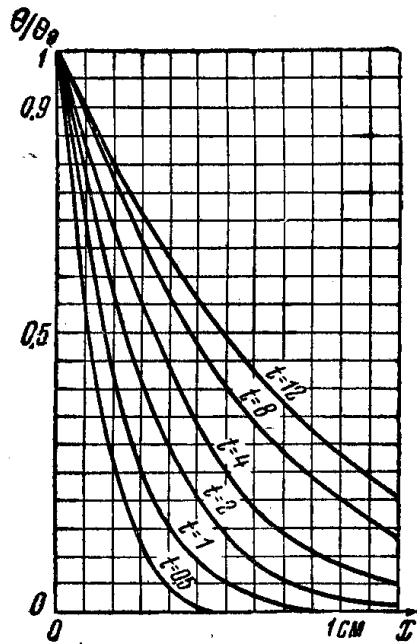
Таким образом с помощью фиг. 17 легко найти, какую долю от наружной температуры составляет температура на глубине x_k . Если к моменту окончания нагрева на глубине x_k температура составляет 0,9 от наружной температуры и если для закалочной температуры принять значение $\Theta_k = 800^\circ$, то из уравнения $\Theta_k = 0,9\Theta_0$ можно легко определить значение температуры наружного слоя:

$$\Theta_0 = \frac{800^\circ}{0,9} = 890^\circ.$$

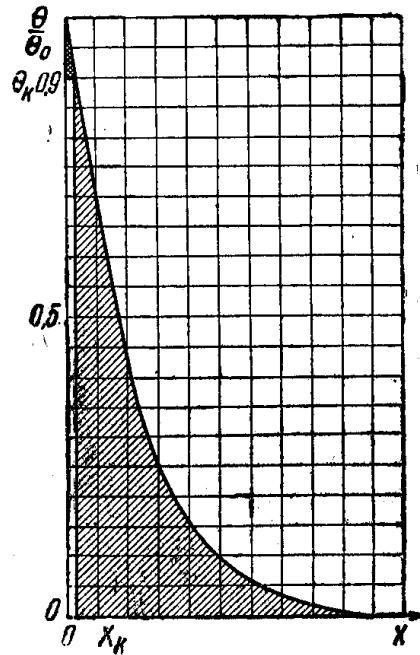
Разность $\Theta_0 - \Theta_k = \Delta T$ представляет перегрев наружного слоя по отношению к закалочной температуре Θ_k , значение которого для процесса закалки хорошо известно термистам.

По фиг. 17 можно также видеть, какая часть тепловой энергии затрачена полезно и какая вредно. Площадь, отвечающая глубине за-

турной кривой внутри нагреваемого тела, можно найти для рассматриваемого случая, т. е. для нагрева поверхности плоского тела постоянной удельной мощностью p , другие интересующие нас величины. Для этой цели зададимся каким-нибудь временем нагрева $t = \text{const}$ и начертим для этого времени, как это показано на фиг. 17, кривую распределения температур, начиная от наружного слоя и переходя к внутренним. Если задаться, кроме того, какой-либо глубиной закаливаемого слоя, например, равной x_k , и отложить эту величину на фиг. 17 по оси абсцисс, то эта глубина пересечет кривую температур в некоторой точке. Эта точка к моменту окончания нагрева должна отвечать температуре закалки Θ_k .



Фиг. 16. Зависимость отношения температуры на глубине x к температуре на наружной поверхности от глубины x ; $\frac{\Theta}{\Theta_0} = \varphi(x)$. Плоское тело бесконечной толщины. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$.



Фиг. 17. Зависимость отношения температуры на глубине x к температуре на наружной поверхности от глубины x ; $\frac{\Theta}{\Theta_0} = \varphi(x)$ при $t = \text{const}$. Температура Θ_k на глубине x_k . Плоское тело бесконечной толщины. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$. Заштрихованная часть отвечает бесполезному теплу, переданному телу.

Таким образом с помощью фиг. 17 легко найти, какую долю от наружной температуры составляет температура на глубине x_k . Если к моменту окончания нагрева на глубине x_k температура составляет 0,9 от наружной температуры и если для закалочной температуры принять значение $\Theta_k = 800^\circ$, то из уравнения $\Theta_k = 0,9\Theta_0$ можно легко определить значение температуры наружного слоя:

$$\Theta_0 = \frac{800^\circ}{0,9} = 890^\circ.$$

Разность $\Theta_0 - \Theta_k = \Delta T$ представляет перегрев наружного слоя по отношению к закалочной температуре Θ_k , значение которого для процесса закалки хорошо известно термистам.

По фиг. 17 можно также видеть, какая часть тепловой энергии затрачена полезно и какая вредно. Площадь, отвечающая глубине за-

каленного слоя x_k (без штриховки), отвечает энергии, полезно затрачиваемой на нагрев закаливаемого слоя; площадь, заштрихованная в клетку, отвечает энергии, затрачиваемой на перегрев закаливаемого слоя; площадь, заштрихованная наклонно, отвечает энергии, затраченной на нагрев внутренних незакаливаемых частей тела¹.

Выше (в главе II) термическим к. п. д. была названа величина

$$\eta = \frac{\text{полезно затраченная энергия}}{\text{вся энергия, сообщенная телу}}.$$

На фиг. 17 энергия, сообщаемая телу, представляет величину, пропорциональную площади, ограниченной осью абсцисс и осью ординат, а также кривой распределения температур. Полезно затраченная энергия пропорциональна площади незаштрихованного прямоугольника. Аналитически выражение для термического к. п. д. может быть представлено в следующем виде:

$$\eta = \frac{Q_k}{Q}, \quad (\text{III, 16})$$

где

$$Q_k = c\gamma\Theta_k x_k = \frac{\lambda}{a} \Theta_k x_k. \quad (\text{III, 17})$$

x_k — глубина закаливаемого слоя, тогда как полное количество тепла Q определяется уравнением (III, 7):

$$Q = 239pt_k,$$

где t_k — время нагрева под закалку.

Подставляя эти значения в уравнение (III, 16) для термического к. п. д. при $p = \text{const}$, найдем

$$\eta = 0,00418 \frac{\lambda}{a} \frac{\Theta_k}{p} \frac{x_k}{t_k}. \quad (\text{III, 18})$$

Рассматривая выражение для к. п. д., данное уравнением (III, 18), нетрудно убедиться в том, что обе интересующие нас величины (перегрев ΔT и термический к. п. д. η) зависимы одна от другой; задавшись перегревом, получаем определенный к. п. д. и, наоборот, выбрав к. п. д., тем самым устанавливаем и перегрев. Чтобы убедиться в этом, подставим в уравнение (III, 18) вместо величины p ее значение из уравнения (III, 8). Получим

$$\eta = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{\Theta_k}{\Theta_0} z, \quad (\text{III, 19})$$

где величину z можно определить из уравнения

$$z [F_1(z) - 1] = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Theta_k}{\Theta_0}, \quad (\text{III, 20})$$

полученного из уравнений (III, 8) и (III, 11) при $x = x_k$, $t = t_k$.

¹ Некоторые авторы указывают, что нагрев внутренних незакаливаемых частей тела играет положительную роль, способствуя образованию переходного слоя между закаленной и незакаленной частями тела и уменьшая внутренние напряжения в металле. В действительности, даже при наиболее форсированных режимах нагрева, распределение температур имеет характер плавной и довольно пологой кривой, так что образование переходного слоя всегда обеспечено. Поэтому всякое дальнейшее увеличение нагрева внутренних частей тела сопряжено с совершенно непроизводительным расходом энергии. Как показали опыты последнего времени, нагрев этих частей увеличивает внутренние напряжения.

Из уравнения (III, 19) видно, что z является функцией только отношения $\frac{\theta_k}{\theta_0}$; значит, и к. п. д. η является функцией той же величины и не зависит от других переменных. Величины η , вычисленные по формулам (III, 19) и (III, 20), изображены графически на фиг. 18. Преобразуем уравнение (III, 20), разложив левую часть его в ряд. При значениях $\frac{\theta_k}{\theta_0}$, близких к 1, получим

$$z = \frac{1}{\pi \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{\theta_k}{\theta_0}\right) \left(\pi + 1 - \frac{\theta_k}{\theta_0}\right), \quad (\text{III, 21})$$

откуда по формуле (III, 19) получим

$$\eta = \frac{4}{\pi^2} \frac{\theta_k}{\theta_0} \left(1 - \frac{\theta_k}{\theta_0}\right) \left(\pi + 1 - \frac{\theta_k}{\theta_0}\right). \quad (\text{III, 22})$$

Так как $\frac{\theta_k}{\theta_0}$ близко к 1, то уравнение (III, 22) может быть написано в приближенном виде:

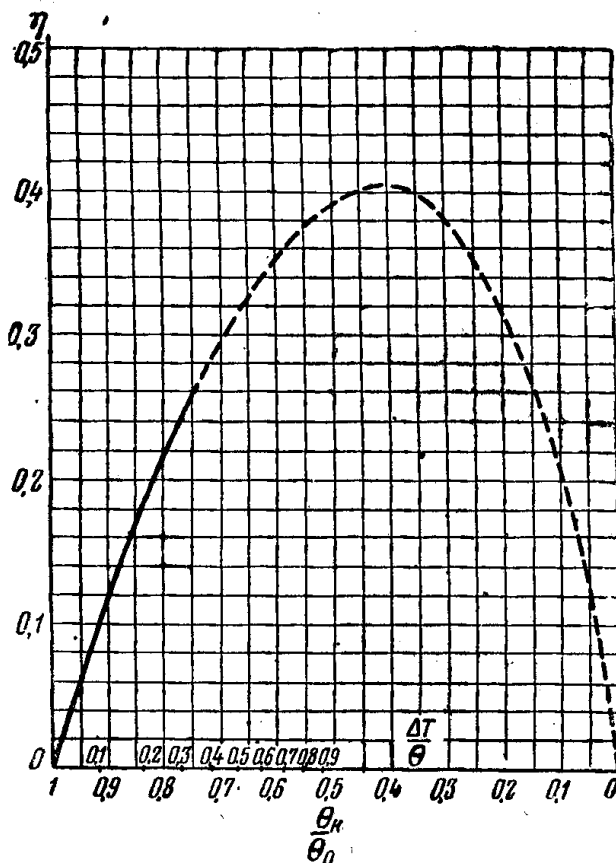
$$\eta \approx \frac{4}{\pi} \left(1 - \frac{\theta_k}{\theta_0}\right) \approx 1,25 \frac{\Delta T}{\theta_0}, \quad (\text{III, 23})$$

где $\Delta T = \theta_0 - \theta_k$ — перегрев наружной поверхности по отношению к закалочной температуре θ_k .

Уравнение (III, 22) с точностью до 1% справедливо при значениях

$$1 > \frac{\theta_k}{\theta_0} > 0,7.$$

Так как допустимый перегрев никогда не превосходит 30% от закалочной температуры, то во всех случаях чисто поверхностного нагрева можно пользоваться графиком (фиг. 18) и уравнением (III, 23), которые дают линейную зависимость между к. п. д. и перегревом. В табл. 20 (глава XI) даны значения к. п. д. для случая чисто поверхностного нагрева при разных перегревах. На фиг. 18 и из табл. 20 видно, что при чисто поверхностном нагреве плоского тела, если толщина его значительна, невозможно получить высокий к. п. д., так как связанный с высоким к. п. д. перегрев недопустим. Описанные выше зависимости справедливы также и в том случае, если будем иметь не плоскую поверхность,



Фиг. 18. Термический к. п. д. в зависимости от перегрева ΔT ; $\eta = \varphi(\Delta T)$. Плоское тело бесконечной толщины. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$.

а поверхность с кривизной значительного радиуса по сравнению с глубиной закаливаемого слоя. В этом случае, если принять за толщину нагреваемого слоя такую, на которой температура составляет 10% от

температуры поверхности, и если считать эту толщину малой по сравнению с радиусом кривизны, например, когда она составляет 10% от радиуса, то уравнение (III, 24), даст те минимальные радиусы кривизны, при которых выведенные выше уравнения для плоской поверхности остаются практически справедливыми:

$$r_{\min} = 10x_k \frac{z(0,1)}{z\left(\frac{\theta_k}{\theta_0}\right)} = 9,7 \frac{x_k}{z\left(\frac{\theta_k}{\theta_0}\right)}. \quad (\text{III}, 24)$$

Здесь z находится по значению $\frac{\theta_k}{\theta_0}$ по фиг. 17 или по формуле (III, 20).

В табл. 6 приведены значения минимального радиуса, при котором можно пользоваться всеми выводами, полученными для плоской поверхности.

Таблица 6

Значения минимального радиуса кривизны $r_{\min}$, при которых возможно рассматривать поверхность как плоскую, при различных значениях глубины x_k , перегрева ΔT и $\theta_k = 830^\circ$

$\Delta T \backslash x_k$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	Значение $z\left(\frac{\theta_k}{\theta_0}\right)$
50	15	30	61	91	120	150	240	0,032
100	7,7	15	31	46	62	77	120	0,063
150	5,5	11	22	33	44	55	88	0,090

2. Нагрев тела бесконечной толщины с плоской поверхностью при выделении тепла в активном слое глубиной $\xi > 0$

При нагреве стального тела под закалку глубина проникновения тока возрастает благодаря увеличению удельного сопротивления с температурой и, главным образом, вследствие падения магнитной проницаемости при нагреве стали выше точки Кюри (около 800° , что соответствует значению относительной температуры θ около 780°).

Обозначим глубину проникновения тока в холодной стали через δ и в горячей стали через δ_1 . Значение δ_1 в 20 и более раз превосходит значение δ .

Если $\delta_1 \ll x_k$, то с достаточной точностью можно считать $\delta_1 = \delta = 0$ и применять выводы предыдущего параграфа. Если же δ_1 того же порядка, что x_k , то необходимо учесть, что тепло выделяется в слое некоторой конечной глубины. Здесь следует различать два случая:

1) $\delta_1 < x_k$. В этом случае приблизительно можно принять глубину активного слоя ξ , т. е. глубину слоя, в котором выделяется тепло, равную δ_1 , так как нагрев на глубину δ_1 протекает сравнительно быстро и основная часть энергии затрачивается при передаче тепла от глубины δ_1 до желаемой глубины x_k , т. е.

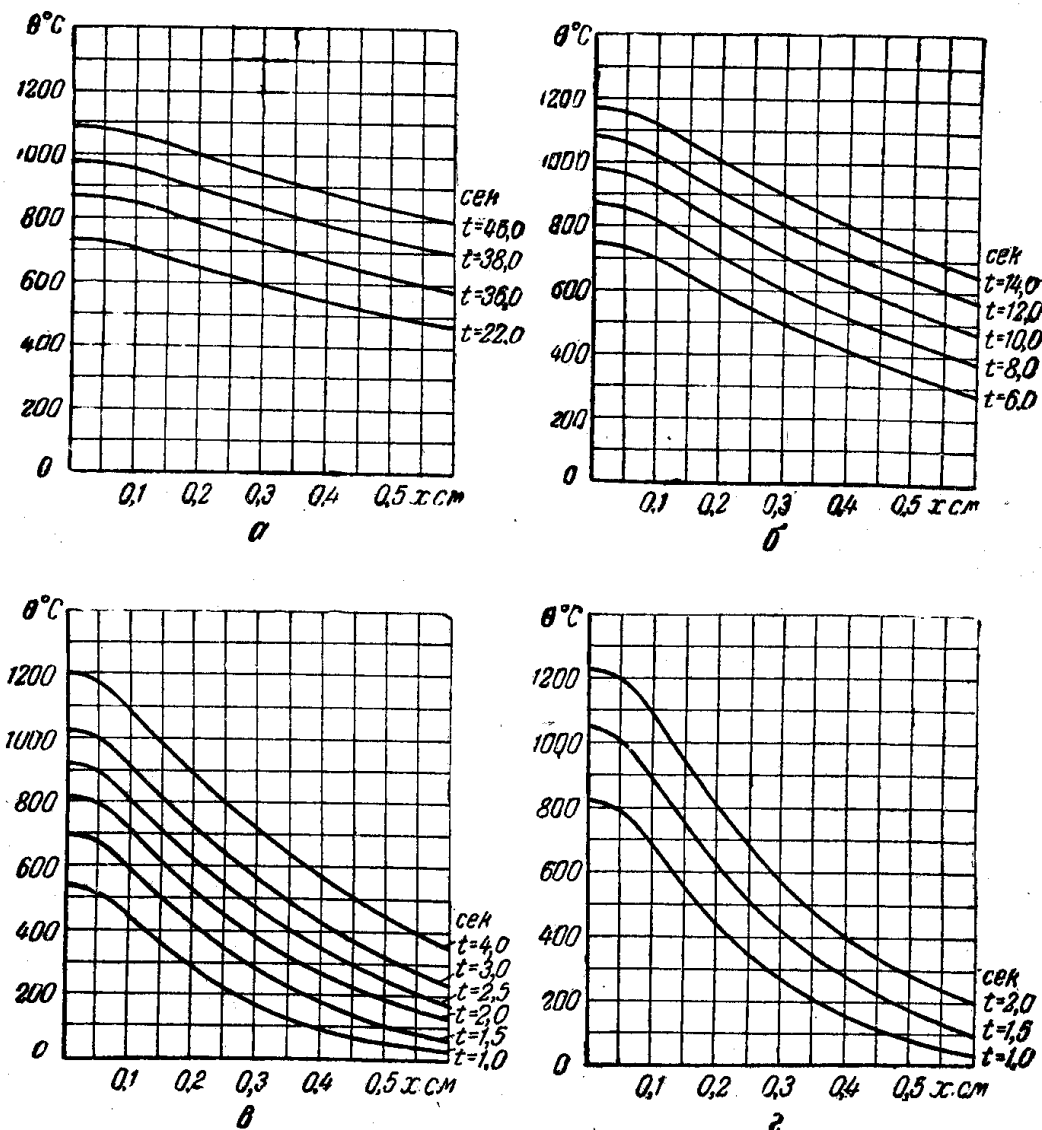
$$\xi = \delta_1; \quad (\text{III}, 25)$$

2) $\delta_1 > x_k$. В этом случае глубина активного слоя возрастает приблизительно до значения x_k и на этом значении процесс нагрева останавливается, так как весьма близко к этому моменту времени до-

стигается закалочная температура на потребной глубине x_k . Сравнение с более точным расчетом показывает, что в этом случае ориентировочно можно положить

$$\xi = x_k + \delta. \quad (\text{III}, 26)$$

Более точный результат можно получить, если учесть возрастание ξ в процессе нагрева, однако для ориентировочных подсчетов вполне приемлемо считать ξ постоянной, согласно указанному выше.



Фиг. 19. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности в различные моменты времени t ; $\theta = \varphi(x)$. Плоское тело бесконечной толщины. Глубинный нагрев; выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см; $p = \text{const}$.

а) $p = 0,25$ квт/см²; б) $p = 0,50$ квт/см²; в) $p = 1,0$ квт/см²; г) $p = 1,50$ квт/см².

В случае $\delta_1 < x_k$ некоторое увеличение точности расчета можно получить, если учесть, что плотность тока распределена по экспоненте. Здесь для упрощения задачи принимаем, что внутри активного слоя тепло выделяется равномерно. При $\delta_1 > x_k$ это предположение весьма близко к действительности, при $\delta_1 < x_k$ оно вносит сравнительно небольшую погрешность.

Если удельная мощность постоянна ($p = \text{const}$), то для случая плоской поверхности тела температура на глубине x в момент времени t может быть определена из уравнения (III, 27), которое является ре-

шением приведенного ранее уравнения теплопроводности (I, 2) с внутренними источниками тепла. Здесь не приводим вывода, а даем лишь окончательную формулу

$$\Theta = 239 \frac{p}{4\lambda\xi} \left\{ (x+\xi)^2 \left[F\left(\frac{x+\xi}{2\sqrt{at}}\right) - 1 \right] - (x-\xi)^2 \left[F\left(\frac{x-\xi}{2\sqrt{at}}\right) - \varepsilon \right] \right\}, \quad (\text{III}, 27)$$

где $\varepsilon = +1$, если $x > \xi$ и $\varepsilon = -1$, если $x < \xi$.

Функция $F(z)$ может быть выражена через функцию Крампа $\Phi(z)$ и ее производную $\Phi_1(z)$ [см. формулы (III, 15)]. Имеем

$$F(z) = \left(1 + \frac{1}{2z^2}\right) \Phi(z) + \frac{1}{2z} \Phi_1(z). \quad (\text{III}, 28)$$

В конце книги приложена таблица значений функций $F(z)$, составленная инж. А. М. Мартыновым.

При малых значениях z приближенно

$$F(z) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{z} + \frac{1}{3} z \right).$$

При больших значениях z приближенно

$$F(z) \approx 1 + \frac{1}{2z^2}.$$

Из формулы (III, 27) при $\xi = 0$ может быть получено приведенное выше уравнение (III, 11), относящееся к чисто поверхностному нагреву.

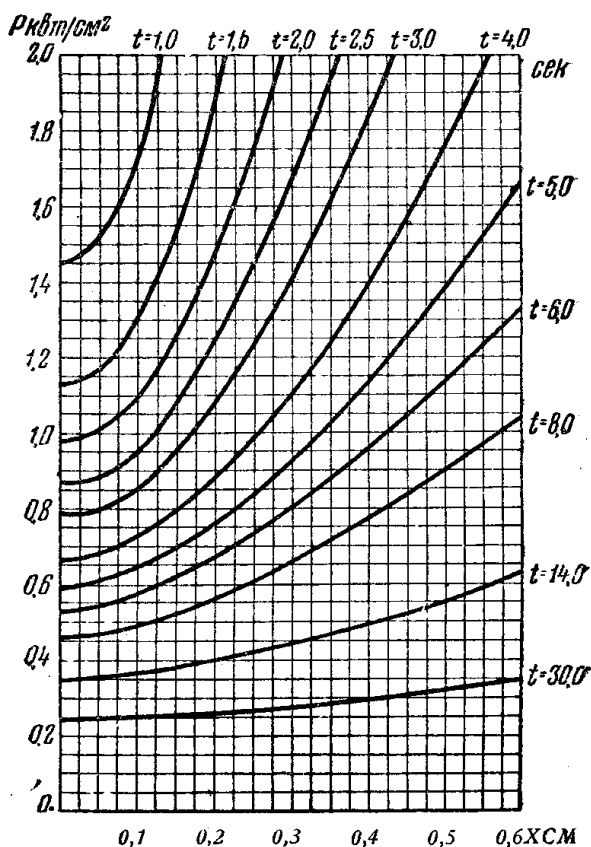
На фиг. 19 дано распределение температур в зависимости от расстояния от поверхности x для различных удельных мощностей p .

Для определения тех же кривых для других значений удельной мощности p с успехом можно использовать метод подобия, изложенный в главе VII.

На фиг. 20 дана зависимость $p = \varphi(x)$ при $\Theta_k = 800^\circ$ на глубине x см.

Нагрев с выделением тепла главным образом внутри закаленного слоя при активном слое $\xi > 0$ имеет для поверхностной закалки большое значение, так как только в этом случае могут быть использованы все те преимущества, которые дает метод индукционного нагрева, а именно: малый перегрев, быстрый нагрев, большая производительность и высокий к. п. д.

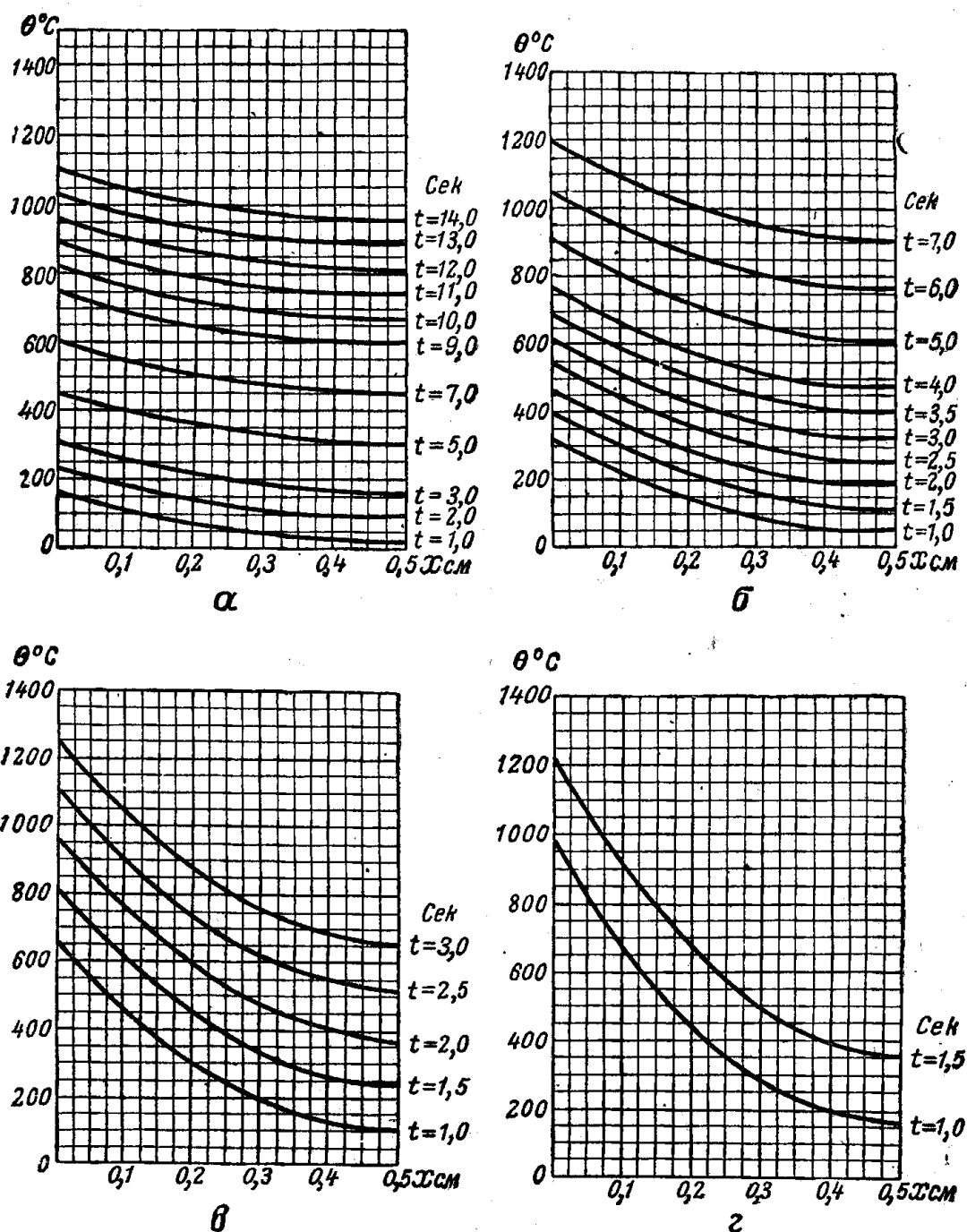
До сих пор мы рассматривали распределение температуры при нагреве неограниченного тела с плоской поверхностью. Рассмотрим теперь часто встречающийся на практике случай плоской плиты с конечной толщиной h .



Фиг. 20. Удельная мощность, необходимая для нагрева тела до 800° на глубину x ; $p = \varphi(x)$. Плоское тело бесконечной толщины. Глубинный нагрев, выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см.

3. Тело конечной толщины с плоской поверхностью. Поверхностный нагрев, $\xi = 0$

В этом случае уравнение теплопроводности (I, 1) даст для распределения температур несколько иной результат.



Фиг. 21. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности в различные моменты времени t ; $\theta = \varphi(x)$. Плоское тело конечной толщины $h = 0.5$ см. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$, $p = \text{const}$.

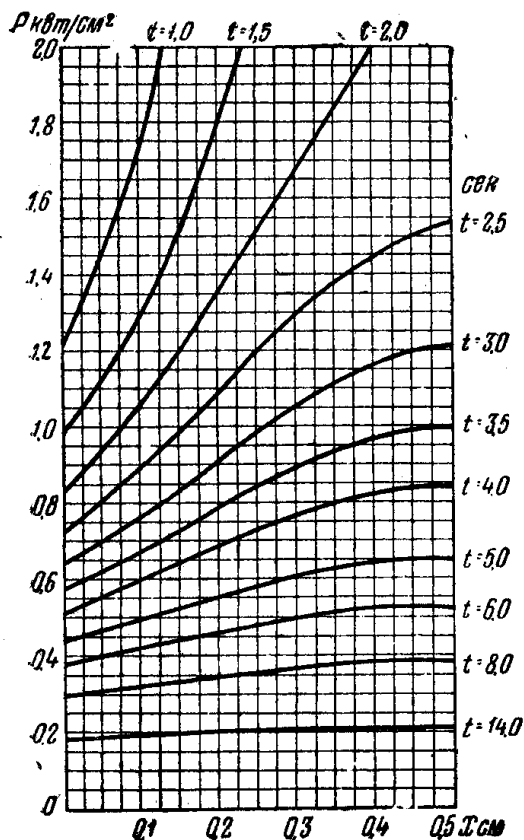
а) $p = 0.25$ квт/см²; б) $p = 0.50$ квт/см²; в) $p = 1.0$ квт/см²; г) $p = 1.5$ квт/см².

При чисто поверхностном нагреве ($\xi = 0$) и при постоянной удельной мощности ($p = \text{const}$) распределение температур в плоской плите можно определить из следующего уравнения:

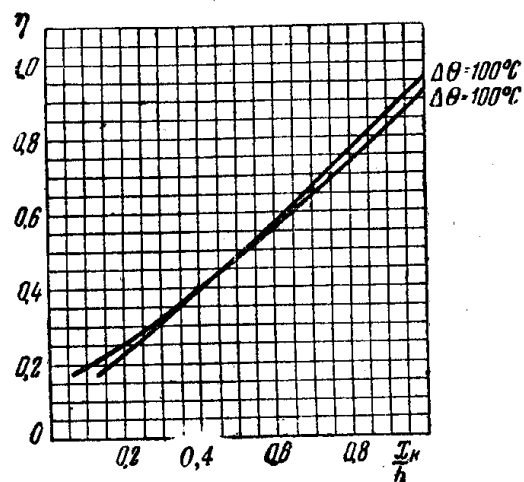
$$\theta = 239 \frac{2p}{\lambda h} \left\{ \frac{at}{2} + \frac{h^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos \left(\frac{n\pi}{h} x \right) \left(1 - e^{-\frac{n^2 \pi^2}{h^2} at} \right) \right\}. \quad (\text{III}, 29)$$

На фиг. 21 дано распределение температур для этого случая при различных значениях p и $h=0,5$ см, в зависимости от расстояния x , для разного времени t . Этот график аналогичен графикам, приведенным на фиг. 15 и 19, отвечающим телу большой толщины ($h=\infty$). Сопоставляя их, нетрудно видеть, что ограничение толщины дает более пологое спадание температуры вследствие подпора, который здесь имеется. Рассматривая график (фиг. 21), нетрудно видеть, что и здесь возможно перейти к другим удельным мощностям, пользуясь методом подобия. Если на этом графике отложить глубину закаленного слоя x_k

или закалочную температуру Θ_k , то график сохранит свою действительность, если при изменении p по закону подобия сохранится постоянным отношение $\frac{x_k}{h}$.



Фиг. 22. Удельная мощность, необходимая для нагрева до 800° тела на глубину x , $p = \varphi(x)$. Плоское тело конечной толщины $h = 0,5$ см. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$.



Фиг. 23. Термический к. п. д. в зависимости от отношения $\frac{x_k}{h}$ при постоянном перегреве ΔT , $\eta = \varphi\left(\frac{x_k}{h}\right)$. Плоское тело конечной толщины $h = 0,5$ см. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$, нижняя кривая при малых $\frac{x_k}{h}$. При $\xi > 0$, верхняя кривая так же при малых $\frac{x_k}{h}$.

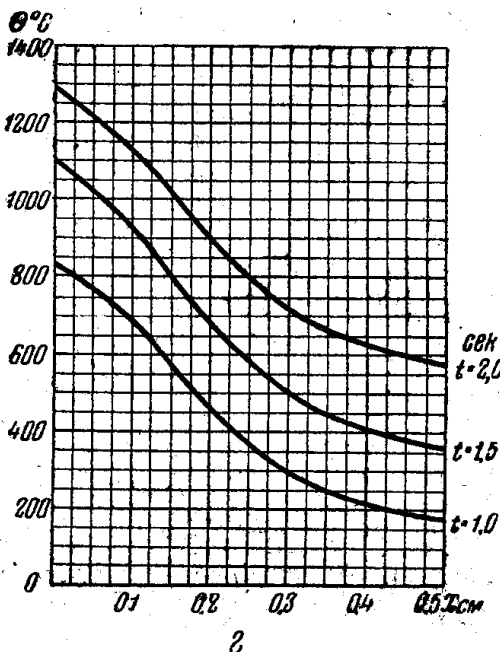
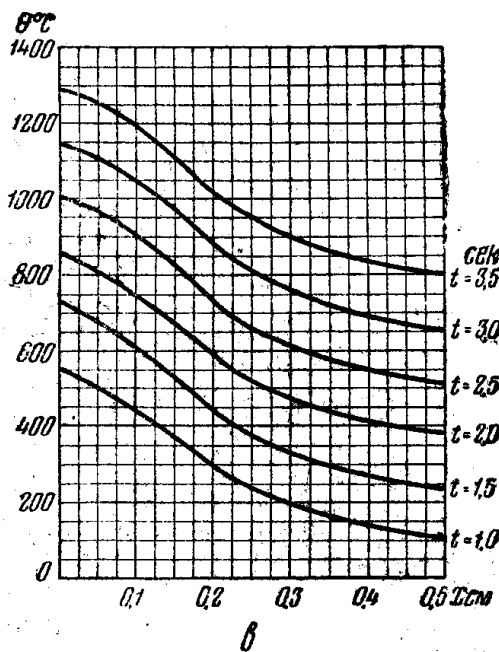
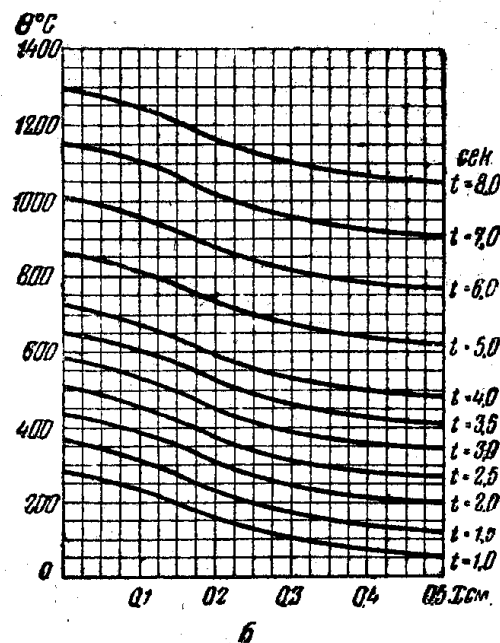
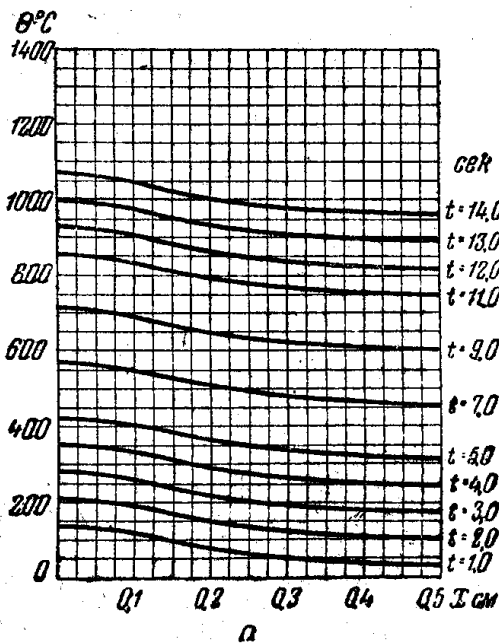
Коэффициент полезного действия при $\xi = 0$ определяется формулой (III, 30), идентичной с уравнением (III, 18):

$$\eta = \frac{1}{239} \frac{\lambda}{a} \frac{\Theta_k}{p} \frac{x_k}{t_k}. \quad (\text{III, 30})$$

Здесь Θ_k определяется по графику (фиг. 21) из условий, что при $x = x_k$ $t = t_k$ должно быть $\Theta = \Theta_k$.

На фиг. 22 дана зависимость $p = \varphi(x)$ для нагрева до температуры $\Theta_k = 800^\circ$ для слоя глубиной x , а на фиг. 23 — зависимость η от отношения $\frac{x_k}{h}$ для перегрева $\Delta T = 100^\circ$.

По этим кривым видно, что с уменьшением $\frac{x_k}{h}$ к. п. д. падает, приближаясь к значению при $h = \infty$, данному в табл. 20.



Фиг. 24. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности в различные моменты времени t ; $\Theta = \varphi(x)$. Плоское тело конечной толщины, $h = 0,5$ см. Глубинный нагрев: выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см, $p = \text{const}$.

а) $p = 0,25$ квт/см²; б) $p = 0,50$ квт/см²; в) $p = 1,0$ квт/см²; г) $p = 1,5$ квт/см².

При закалке тел небольшой толщины получаем более высокий к. п. д.; однако при этом как недостаток надо отметить большую поводку поверхности вследствие более значительного прогрева глубоко лежащих слоев, вызываемого тепловым подпором.

4. Тело конечной толщины с плоской поверхностью. Глубинный нагрев, $\xi > 0$

В случае выделения тепла внутри нагреваемого слоя при $\xi > 0$ и в частном случае при $\xi = x_k$, если постоянная удельная мощность $p = \text{const}$, распределение температуры в теле можно найти из уравнения

$$\Theta = 239 \frac{2p}{\lambda h} \left\{ \frac{at}{2} + \frac{h^3}{\pi^3 \xi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cos \left(\frac{n\pi}{h} x \right) \sin \left(\frac{n\pi}{h} \xi \right) \times \right. \\ \left. \times (1 - e^{-\frac{h^2 \pi^2}{h^2} at}) \right\}. \quad (\text{III}, 31)$$

На фиг. 24 представлены кривые распределения температур, построенные при разных значениях p . При $h = 0,5$ см и $\xi = x_k = 0,1$ см в зависимости от расстояния от поверхности x , отвечающие различным моментам времени.

На фиг. 25 даны кривые зависимости удельной мощности p от глубины x , $p = \varphi(x)$ при нагреве до температуры 800° слоя на глубине x см.

Из этих кривых нетрудно получить, задаваясь толщиной закаленного слоя x_k и выбирая допустимый перегрев, время нагрева t_k и определить глубину закаленного слоя, получающуюся после нагрева в течение времени t_k .

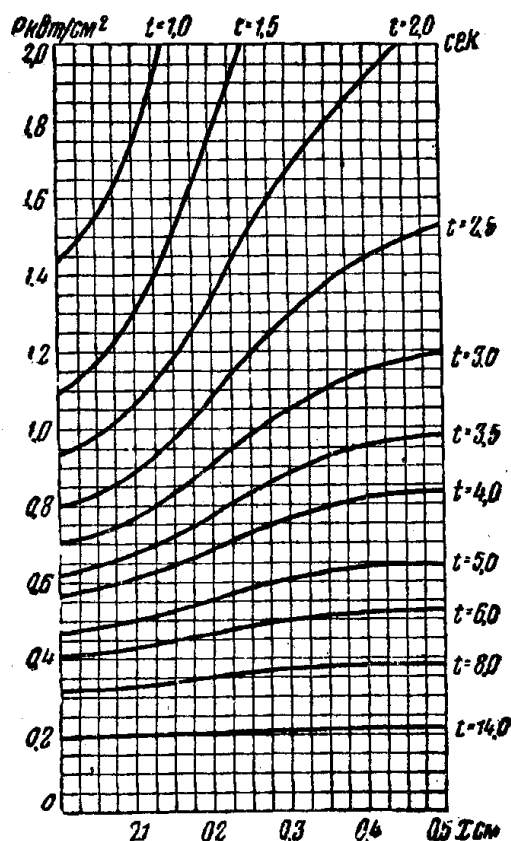
Если пользоваться методом подобия (глава VII, п. 2), то кривые фиг. 24 дают возможность получить те же данные для другого значения толщины h , как это было указано в предыдущем параграфе.

Коэффициент полезного действия в случае нагрева поверхности тела ограниченной толщины, равной h , может быть определен, как и раньше, из уравнения (III, 30):

$$\eta = \frac{1}{239} \frac{\lambda}{a} \frac{\Theta_k}{p} \frac{x_k}{t_k},$$

где t_k определяют по графику (см. фиг. 24), построенному по уравнению (III, 31), исходя из условий, что при $x = x_k$, $t = t_k$ должно быть $\Theta = \Theta_k$.

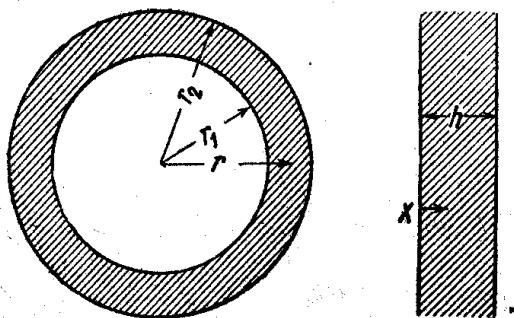
Сравнивая эти данные, нетрудно видеть, что при закалке плоского тела ограниченной толщины при том же перегреве получается более высокий к. п. д. по сравнению с телом бесконечной толщины.



Фиг. 25. Удельная мощность, необходимая для нагрева до 800° тела на глубину x ; $p = \varphi(x)$. Плоское тело конечной толщины $h = 0,5$ см. Глубинный нагрев: выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см.

5. Влияние кривизны поверхности на распределение температуры и величину к. п. д.

Если радиус кривизны поверхности меньше, чем это указано уравнением (III, 24) или табл. 6, то выражения, приведенные в п. п. 1, 2, 3, 4, и кривые фиг. 20, 21, 22 и 23 дают столь большие ошибки, что уже не могут быть использованы. В этом случае необходимо пользоваться выражениями, учитывающими кривизну поверхности тела. Как и в предыдущем случае тел с плоской поверхностью, здесь нас интересуют прежде всего сплошные тела, а также стенки (если толщина последних h недостаточно велика по сравнению с глубиной закаливаемого



Фиг. 26. К нагреву цилиндрических тел. Обозначения.

слоя x_k , чтобы их можно было рассматривать как сплошные тела); для наиболее часто встречающихся при высокочастотной закалке времен нагрева стенку можно заменять сплошным телом, если $\frac{x_k}{h} < 0,1$.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением цилиндрических тел — сплошного и полого цилиндра, — являющихся наиболее простыми и характерными случаями тел с изогнутой поверхностью.

Расчеты ведутся на 1 см высоты цилиндров. На фиг. 26 приведен этот случай нагрева и даны обозначения, использованные во всех следующих параграфах.

6. Сплошное цилиндрическое тело. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$

Для распределения температур $\Theta = T_1 - T_0$ в этом случае имеем уравнение

$$\Theta = 239 \frac{2r_0 p}{\lambda} \left(\frac{at}{r_0^2} + S_1 \right), \quad (\text{III, 32})$$

где

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(v_n \beta) (1 - e^{-v_n^2 \tau})}{v_n^2 J_0(v_n)}, \quad (\text{III, 33})$$

p — удельная мощность в квт/см^2 ;

$$\beta = 1 - \frac{x}{r_0}; \quad \tau = \frac{at}{r_0^2};$$

J_0 — функция Бесселя нулевого порядка;

v_n — корни уравнения $J_1(v_n) = 0$; ($n = 1, 2, \dots$).

Ниже формула (III, 32) написана в раскрытом виде для десяти членов:

$$\begin{aligned} S_1 = & -0,1692 J_0(3,8317\beta) (1 - e^{-14,7\tau}) + \\ & + 0,0677 J_0(7,0156\beta) (1 - e^{-49,2\tau}) - \\ & - 0,0387 J_0(10,1735\beta) (1 - e^{-103\tau}) + \\ & + 0,0254 J_0(13,3237\beta) (1 - e^{-177\tau}) - \\ & - 0,0189 J_0(16,4706\beta) (1 - e^{-272\tau}) + \\ & + 0,0145 J_0(19,6159\beta) (1 - e^{-384\tau}) - \\ & - 0,0115 J_0(22,7601\beta) (1 - e^{-518\tau}) + \\ & + 0,0095 J_0(25,9037\beta) (1 - e^{-671\tau}) - \\ & - 0,0080 J_0(29,0468\beta) (1 - e^{-843\tau}) + \\ & + 0,00648 J_0(32,1897\beta) (1 - e^{-1037\tau}) - \\ & - \dots \end{aligned} \quad (\text{III, 34})$$

ства сообщенного телу тепла Q на 1 см высоты цилиндра (в *кал/см*) и удельной мощности p (в *квт/см²*).

$$Q = \frac{Q_c}{1 + \frac{r_0^2}{at} S_1}, \quad (\text{III}, 35)$$

где Q_c — количество тепла, потребное для равномерного нагревания цилиндра по всему его сечению до температуры Θ_k (на 1 см высоты цилиндра):

$$Q_c = \pi r_0^2 \frac{\lambda}{a} \Theta_k, \quad (\text{III}, 36)$$

где πr_0^2 — объем цилиндра;

$\frac{\lambda}{a}$ — объемная теплоемкость, т. е. теплоемкость 1 *см³*.

S_1 в формулах (III, 34) и (III, 35) имеет прежнее значение (III, 33).

Аналогично

$$p = \frac{p_c}{1 + \frac{r_0^2}{at} S_1}, \quad (\text{III}, 37)$$

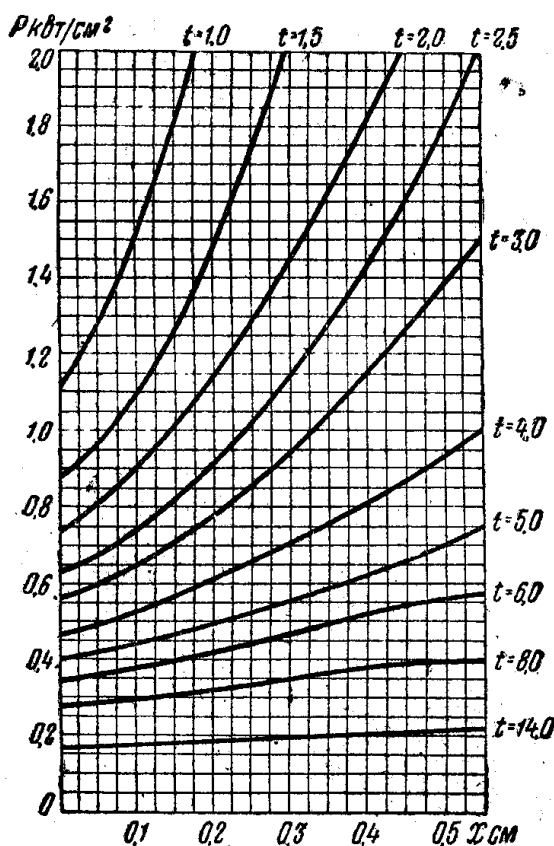
где p_c — удельная мощность, потребная для равномерного нагревания цилиндра по всему его сечению до температуры Θ_k :

$$p_c = \frac{Q_c}{239 \cdot 2\pi r_0 t} = \frac{r_0 \frac{\lambda}{a} \Theta_k}{478t}. \quad (\text{III}, 38)$$

Здесь p — удельная мощность на 1 *см²* в *квт/см²*.

На фиг. 28 дана зависимость $p = \varphi(x)$ для различных моментов времени, при которых температура на глубине x достигает значения $\Theta_k = 800^\circ$.

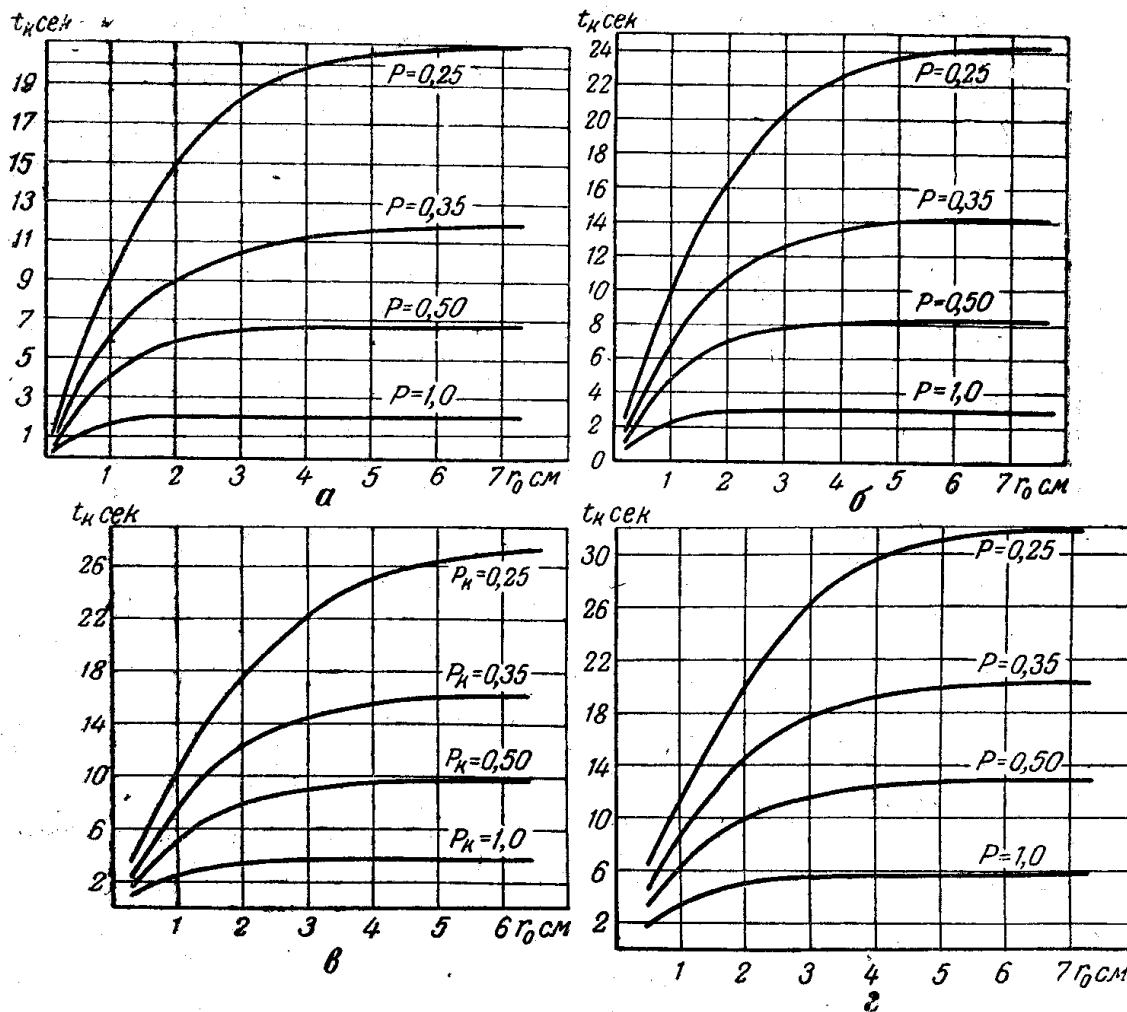
Из уравнений (III, 35) и (III, 36) можно определить величину Q или удельную мощность p при выбранных соотношениях $\frac{t_k}{r_0^2}$. Из найденных таким способом кривых, начерченных для различных $\frac{t_k}{r_0^2}$, гра-



Фиг. 28. Удельная мощность, необходимая для нагрева до 800° тела на глубину x , $p = \varphi(x)$. Сплошное цилиндрическое тело, $r_0 = 1$ см. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$.

фически определим интересующие нас зависимости как мощности p , так и времени t от радиуса r_0 . При этом предполагается, что на глубине x_k Θ_k имеет значение 800° .

На фиг. 29 приведены кривые, построенные описанным выше способом, для глубин $x_k = 0,1, 0,2, 0,3$ и $0,5$ см.



Фиг. 29. Зависимость времени нагрева t_k от радиуса кривизны r_0 , $t = \varphi(r_0)$, для различных удельных мощностей p при нагреве до температуры 800° на глубине x_k . Сплошное цилиндрическое тело. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$.
а) $x_k = 0,1$ см; б) $x_k = 0,2$ см; в) $x_k = 0,3$ см; г) $x_k = 0,5$ см.

Термический к. п. д. для цилиндрических поверхностей при чисто поверхностном нагреве может быть найден, как и раньше, из уравнения (III, 30):

$$\eta = \frac{1}{239} \frac{\lambda}{a} \frac{\theta_k}{p} \frac{x_k}{t_k} \left(1 - \frac{x_k}{2r_0}\right).$$

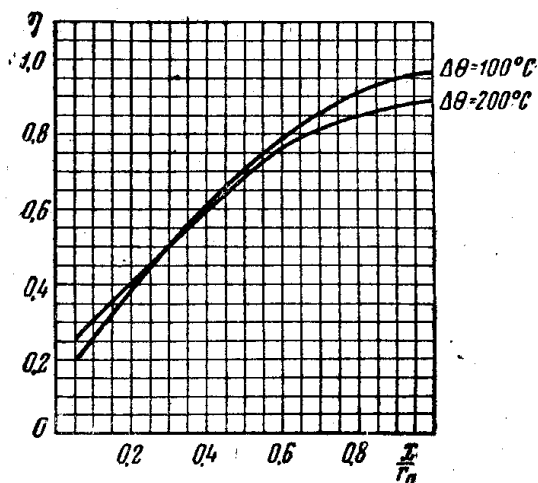
Здесь величина t_k должна быть определена по графику (фиг. 27), построенному по уравнению (III, 32), при условии, что при $x = x_k$ $t = t_k$ должно быть $\theta = \theta_k$.

Значения к. п. д. в зависимости от $\frac{x}{r_0}$ даны на фиг. 30.

7. Сплошной цилиндр. Глубинный нагрев, $\xi > 0$

Для распределения температуры $\theta = T - T_0$ в этом случае имеем выражение

$$\theta = 239 \frac{2pr_0}{\lambda} \left\{ \frac{at}{r_0^2} + S \right\}, \quad (\text{III, 39})$$



Фиг. 30. Термический к. п. д. в зависимости от $\frac{x}{r_0}$. Цилиндрическое тело.

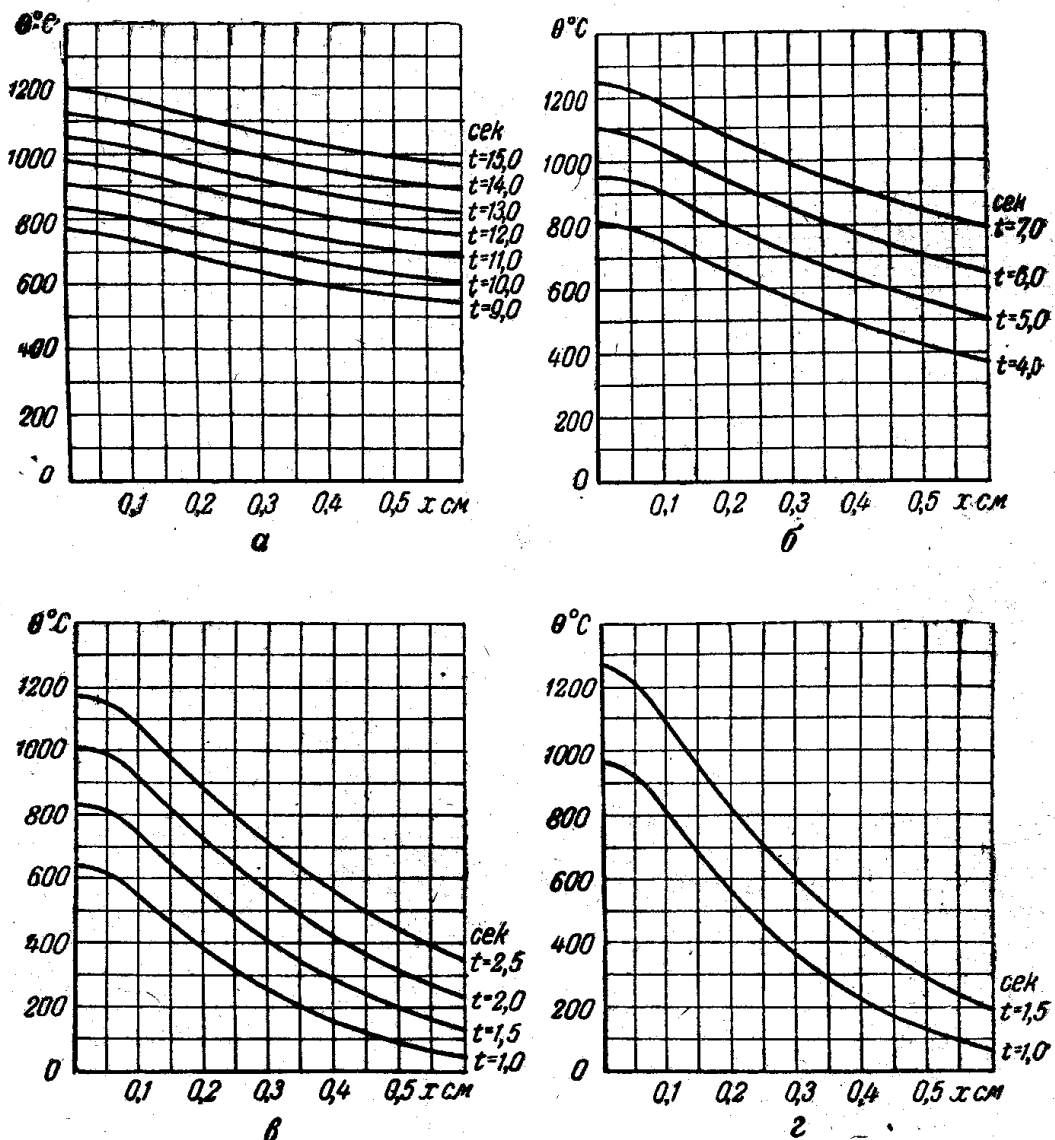
$\eta = \varphi\left(\frac{x}{r_0}\right)$. Перегрев $\Delta T = 100^\circ$. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$.

где

$$S = - \frac{2r_0}{\xi} \frac{1 - \frac{\xi}{r_0}}{2 - \frac{\xi}{r_0}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\nu_n \alpha) J_0(\nu_n \beta) (1 - e^{-\frac{\nu_n^2 \tau}{\alpha}})}{\nu_n^3 [J_0(\nu_n)]^2}, \quad (\text{III}, 40)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\xi}{r_0}; \quad \beta = 1 - \frac{x_k}{r_0},$$

где J_0, J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядка;
 ν_n — корни уравнения $J_1(\nu_n) = 0$;
 r_0 — радиус цилиндра.



Фиг. 31. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности в различные моменты времени t ; $\theta = \varphi(x)$. Сплошное цилиндрическое тело, $r_0 = 1$ см. Глубинный нагрев: выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см, $p = \text{const}$.

а) $p = 0,25$ квт/см²; б) $p = 0,50$ квт/см²; в) $p = 1,0$ квт/см²; г) $p = 1,5$ квт/см².

Уравнение (III, 39) можно написать в раскрытом виде, если ограничиться десятью членами:

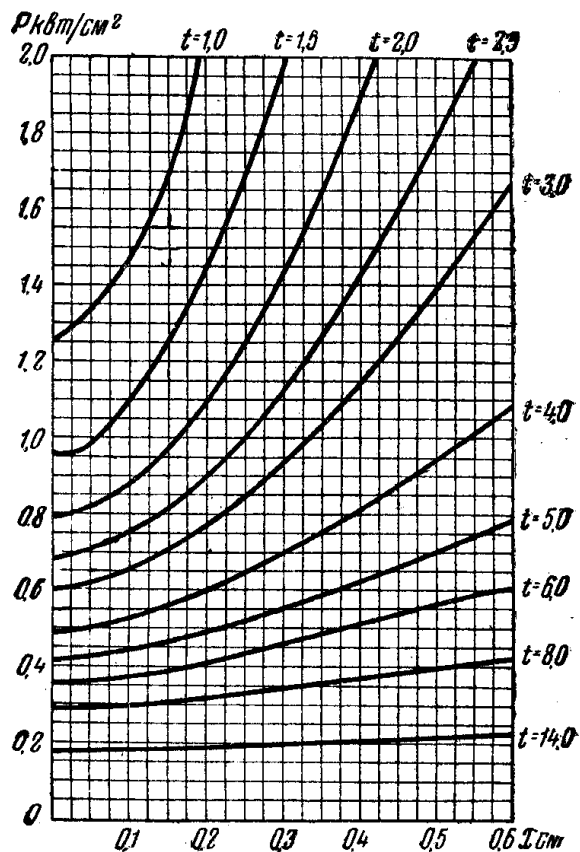
$$\begin{aligned}
 S = & 0,2198J_1(3,8317\alpha)J_0(3,8317\beta)(1 - e^{-14,7\tau}) + \\
 & + 0,0643J_1(7,0156\alpha)J_0(7,0156\beta)(1 - e^{-49,2\tau}) + \\
 & + 0,0310J_1(10,1735\alpha)J_0(10,1735\beta)(1 - e^{-103\tau}) + \\
 & + 0,0178J_1(13,3237\alpha)J_0(13,3237\beta)(1 - e^{-177\tau}) + \\
 & + 0,0117J_1(16,4706\alpha)J_0(16,4706\beta)(1 - e^{-272\tau}) + \\
 & + 0,0082J_1(19,6159\alpha)J_0(19,6159\beta)(1 - e^{-384\tau}) + \\
 & + 0,00604J_1(22,7601\alpha)J_0(22,7601\beta)(1 - e^{-518\tau}) + \\
 & + 0,00468J_1(25,9037\alpha)J_0(25,9037\beta)(1 - e^{-671\tau}) + \\
 & + 0,00372J_1(29,0468\alpha)J_0(29,0468\beta)(1 - e^{-843\tau}) + \\
 & + 0,00302J_1(32,1897\alpha)J_0(32,1897\beta)(1 - e^{-1037\tau}) + \\
 & + \dots \dots \dots
 \end{aligned}
 \tag{III, 41}$$

На фиг. 31 показано распределение температур в цилиндрическом теле в зависимости от расстояния x для радиуса $r_0 = 1$ см, различных значений удельной мощности p и разного времени нагрева t при $\xi = 0,1$.

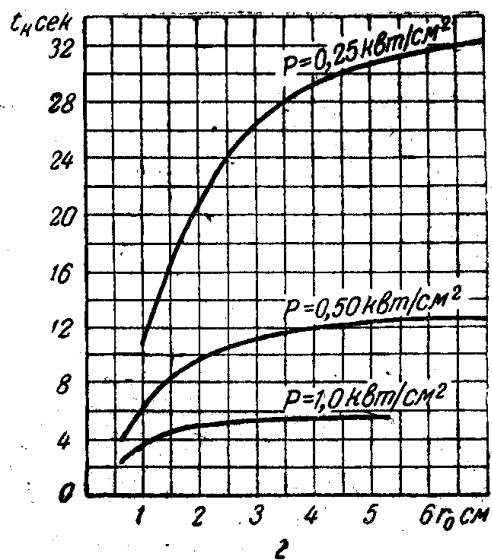
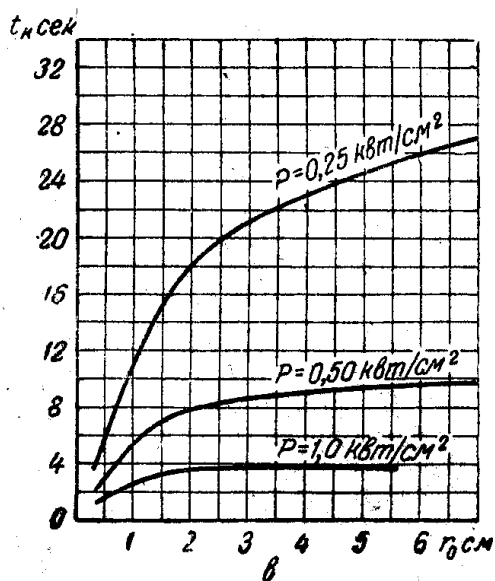
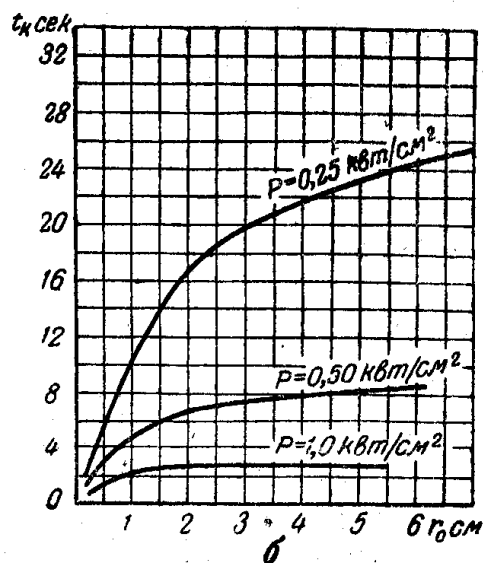
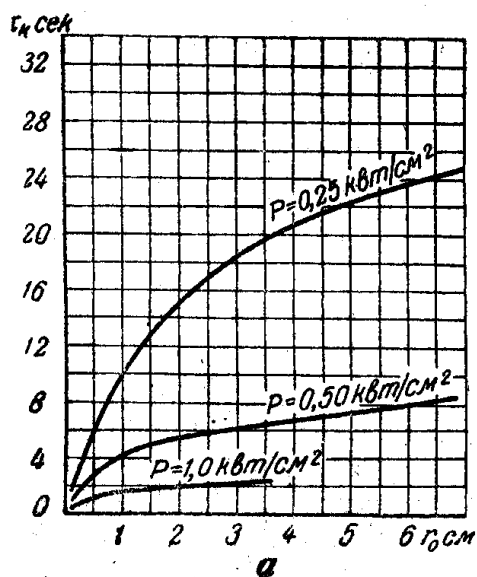
Как видно по этим кривым, кривая температуры в случае кривизны закаливаемой поверхности имеет менее крутое падение по сравнению со случаем плоской поверхности, которая является частным случаем изогнутой поверхности при бесконечном радиусе кривизны.

Перейдем к нагреву слоя толщиной x_k до закалочной температуры Θ_k и определим аналогично случаю $\xi = 0$ время нагрева t_k , а также необходимую удельную мощность p в зависимости от расстояния x при $r = 1$ см (фиг. 32) и от радиуса цилиндра r_0 . В последнем случае можно использовать те же уравнения (III, 37) и (III, 38) с той лишь разницей, что вместо величины S_1 из уравнения (III, 36) необходимо подставить в уравнение (III, 37) величину S , определяемую из уравнения (III, 40).

Зависимости t от радиуса цилиндра для различных значений удельной мощности p , найденные тем же способом, как и в случае $\xi = 0$, приведены на фиг. 33 для глубин $x_k = 0,1; 0,2; 0,3$ и $0,5$ см.

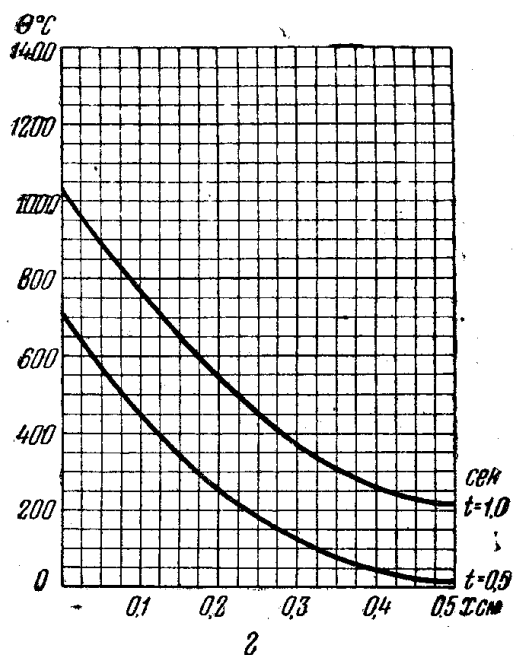
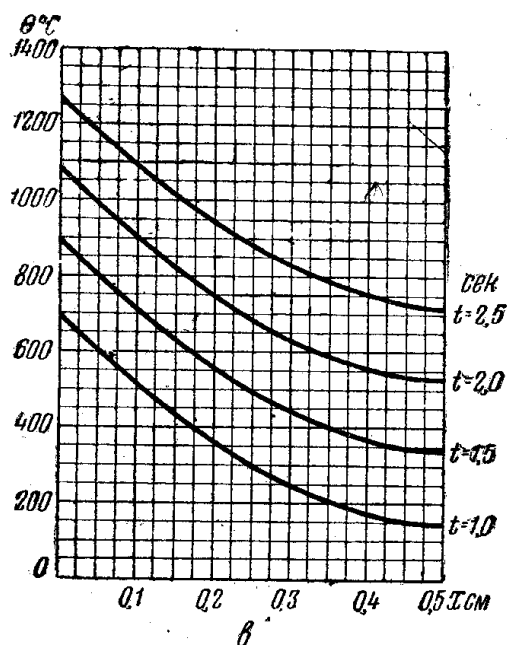
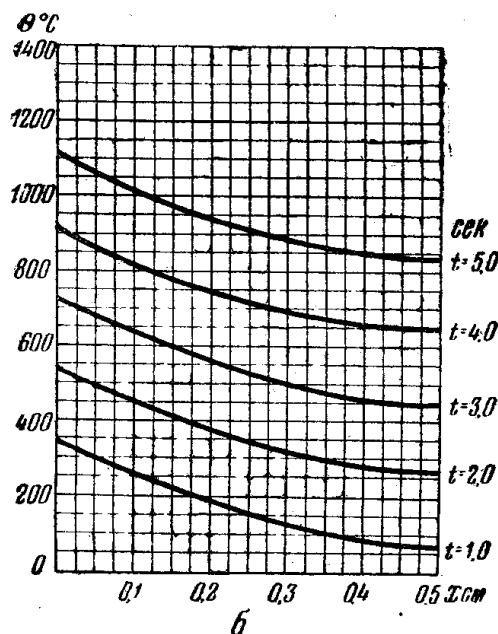
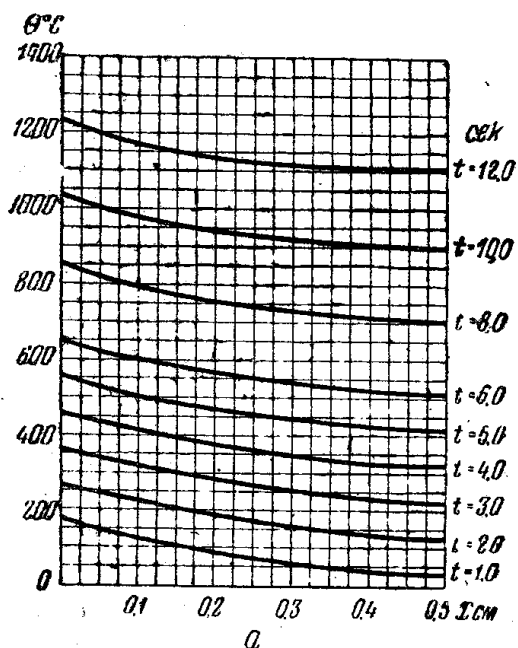


Фиг. 32. Удельная мощность, необходимая для нагрева тела до 800° на глубину x , $p = \varphi(x)$. Сплошное цилиндрическое тело, $r_0 = 1$ см. Глубинный нагрев: выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см.



Фиг. 33. Зависимость времени нагрева t_k от радиуса кривизны r , $t_k = \varphi(r_0)$, для различных удельных мощностей p при нагреве до температуры 800° на глубине x_k . Сплошное цилиндрическое тело. Глубинный нагрев: выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,05$ см.

а) $x_k = 0,1$ см; б) $x_k = 0,2$ см; в) $x_k = 0,3$ см; г) $x_k = 0,5$ см.

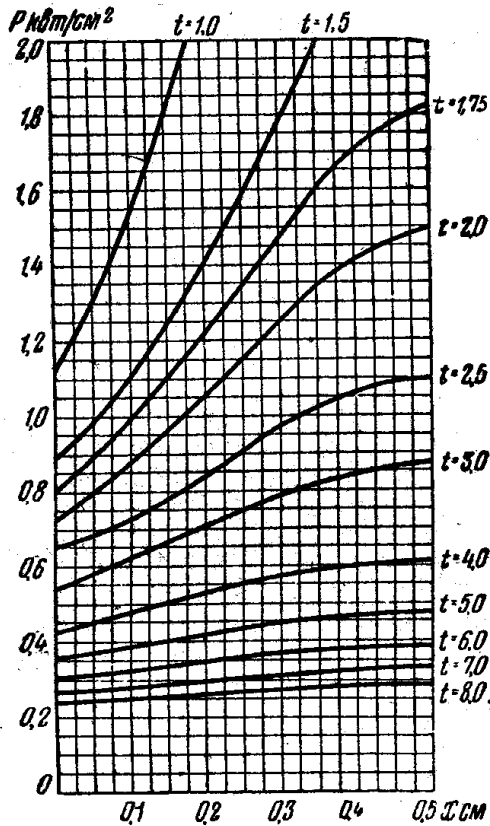


Фиг. 34. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности тела в различные моменты времени t ; $\Theta = \varphi(x)$. Полый цилиндр, $r_1 = 0,5$ см, $r_2 = 1$ см, $k = \frac{r_2}{r_1} = 2$. Чисто поверхностный нагрев наружной поверхности, $\xi = 0$, $p = \text{const}$.

а) $p = 0,25$ квт/см²; б) $p = 0,50$ квт/см²; в) $p = 1,0$ квт/см²; г) $p = 1,5$ квт/см².

Термический к. п. д. в случае сплошного цилиндра может быть определен из уравнения (III, 42):

$$\eta = \frac{1}{239} \frac{\lambda}{a} \frac{\theta_k}{p} \frac{x_k}{t_k} \left(1 - \frac{\xi}{2r_0}\right). \quad (\text{III, 42})$$



Фиг. 35. Удельная мощность, необходимая для нагрева тела до 800° на глубину x , $p = \varphi(x)$. Полый цилиндр, $r_1 = 0,5$ см, $r_2 = 1$ см, $k = \frac{r_2}{r_1} = 2$. Чисто поверхностный нагрев наружной поверхности, $\xi = 0$.

Здесь t_k определяется по графику (фиг. 31), построенному по уравнению (III, 39) из условия, что при $x = x_k$ $t = t_k$ должно быть $\theta = \theta_k$.

В случае сплошного цилиндрического тела к. п. д. ниже, чем в случае плоскости бесконечной толщины (см. фиг. 42а).

8. Полый цилиндр. Нагрев внешней поверхности

Толщину стенки $r_2 - r_1$ обозначим через h .

Этот случай аналогичен случаю плоской плиты, толщина которой соизмерима с глубиной закаленного слоя. На фиг. 26 был дан чертеж с принятыми ниже обозначениями. Чисто поверхностный нагрев. Активный слой $\xi = 0$. Нагрев при постоянной мощности $p = \text{const}$.

Распределение температур для этого случая может быть написано в виде следующего уравнения:

$$\theta = \frac{478p}{\lambda} \left\{ \frac{k}{k^2 - 1} \frac{at}{r_1} + \frac{-\nu_n^2 \frac{at}{r_1^2}}{k^2 [z_0(k\nu_n)]^2 - [z_0(\nu_n)]^2} \right\} + r_2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z_0\left(\nu_n \frac{r}{r_1}\right) z_0(k\nu_n) \left(1 - e^{-\nu_n^2 \frac{at}{r_1^2}}\right)}{\nu_n^2 \left\{ k^2 [z_0(k\nu_n)]^2 - [z_0(\nu_n)]^2 \right\}}. \quad (\text{III, 43})$$

Здесь p в кВт/см^2 ;

$$k = \frac{r_2}{r_1}; \quad x = r_2 - r,$$

где r — радиус-вектор в см, отмечающий положение точки, в которой определяется температура (см. фиг. 26); $z_0(x)$ — цилиндрическая функция нулевого порядка от аргумента x , определяемая через функции Бесселя и Неймана посредством равенства

$$z_0(x) = N_1(k\nu_n) J_0(x) - J_1(k\nu_n) N_0(x);$$

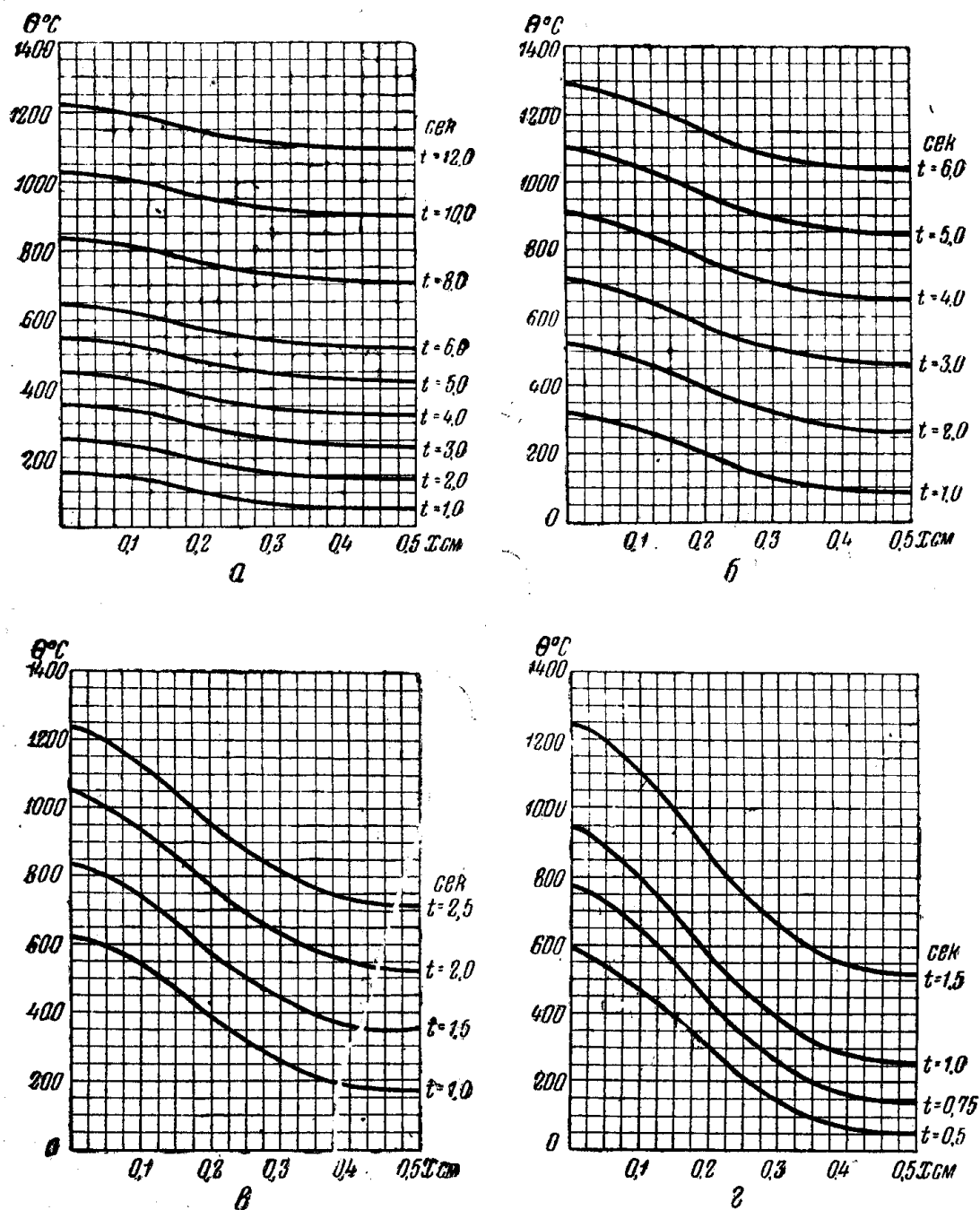
ν_n — корни уравнения:

$$z_1(\nu_n) = 0, \quad (n=1, 2, \dots),$$

где $z_1(x)$ — цилиндрическая функция первого порядка от аргументов, определяемая через функции Бесселя и Неймана посредством равенства

$$z_1(x) = N_1(k\nu_n) J_1(x) - J_1(k\nu_n) N_1(x).$$

На основании уравнения (III, 43) можно начертить график для распределения температур (см. фиг. 34), по которому видно, что здесь (при том же времени и удельной мощности) температура спадает ме-



Фиг. 36. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности тела в различные моменты времени t ; $\theta = \varphi(x)$. Полый цилиндр, $r_1 = 0,5$ см; $r_2 = 1$ см; $k = \frac{r_2}{r_1} = 2$. Глубинный нагрев наружной поверхности: выделение тепла в активном слое $\xi = 0,1$ см, $p = \text{const}$.

а) $p = 0,25$ квт/см²; б) $p = 0,50$ квт/см²; в) $p = 1,0$ квт/см²; г) $p = 1,5$ квт/см².

нее круто, чем в случае сплошного цилиндра. Коэффициент полезного действия в этом случае может быть написан в виде следующего уравнения:

$$\eta = \frac{1}{239} \frac{\lambda}{a} \frac{\theta_k}{p} \frac{x_k}{t_k} \left(1 - \frac{x_k}{2r_2}\right). \quad (\text{III}, 44)$$

Здесь t_k определяется по графику зависимости Θ от t (см. фиг. 34), построенному согласно уравнению (III, 43) из условия: при $r=r_2-x_k$ $t=t_k$ должно быть $\Theta=\Theta_k$. На фиг. 35 аналогично предыдущему случаю дана зависимость $p=\varphi(x)$ для температуры 800° на глубине x .

9. Полый цилиндр. Глубинный нагрев внешней поверхности. Активный слой, $\xi > 0$

Постоянная мощность, $p = \text{const}$.

Для функции, выражающей плотность мощности тепла выделяющегося внутри тела, принимаем

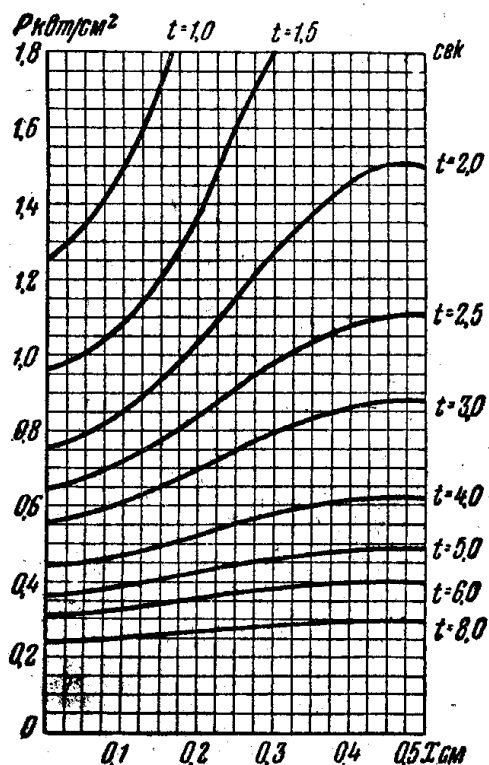
$$w = f(r_1 t) = \begin{cases} \frac{p}{\xi \left(1 - \frac{\xi}{2r_2}\right)} & \text{при } r_2 - \xi < r < r_2 \\ 0 & \text{при } r < r_2 - \xi, \end{cases} \quad (\text{III, 45})$$

где p — в квт/см^2 ; w — в квт/см^3 .

Для распределения температуры имеем

$$\Theta = \frac{478p}{\lambda} \left\{ \frac{k}{k^2 - 1} \frac{at}{r_1} - \frac{r_1^2}{\xi \left(1 - \frac{\xi}{2r_2}\right)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z_0 \left(\nu_n \frac{r}{r_1} \right) \left(k - \frac{\xi}{r_1} \right) z_1 \left(k \nu_n - \frac{\xi}{r_1} \nu_n \right) \left(1 - e^{-\nu_n^2 \frac{at}{r_1^2}} \right)}{\nu_n^3 \left\{ k^2 [z_0(k \nu_n)]^2 - [z_0(\nu_n)]^2 \right\}} \right\}, \quad (\text{III, 46})$$

где z_0 и z_1 имеют значения, указанные в предыдущем параграфе.



Фиг. 37. Удельная мощность, необходимая для нагрева тела до 800° на глубину x , $p = \varphi(x)$. Полый цилиндр, $r_1 = 0,5$ см, $r_2 = 1$ см, $k = \frac{r_2}{r_1} = 2$. Глубинный нагрев наружной поверхности: выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см.

На фиг. 36 построен, подобно предыдущим случаям, график распределения температуры по глубине для тех же данных, что и ранее; так же, как на фиг. 37 для этого случая дана зависимость $p = \varphi(x)$ при 800° на глубине x .

Для к. п. д. имеем то же выражение (III, 44), где t_k определяется по графику, построенному аналогично тому, как и при $\xi = 0$, но на основании уравнения (III, 46).

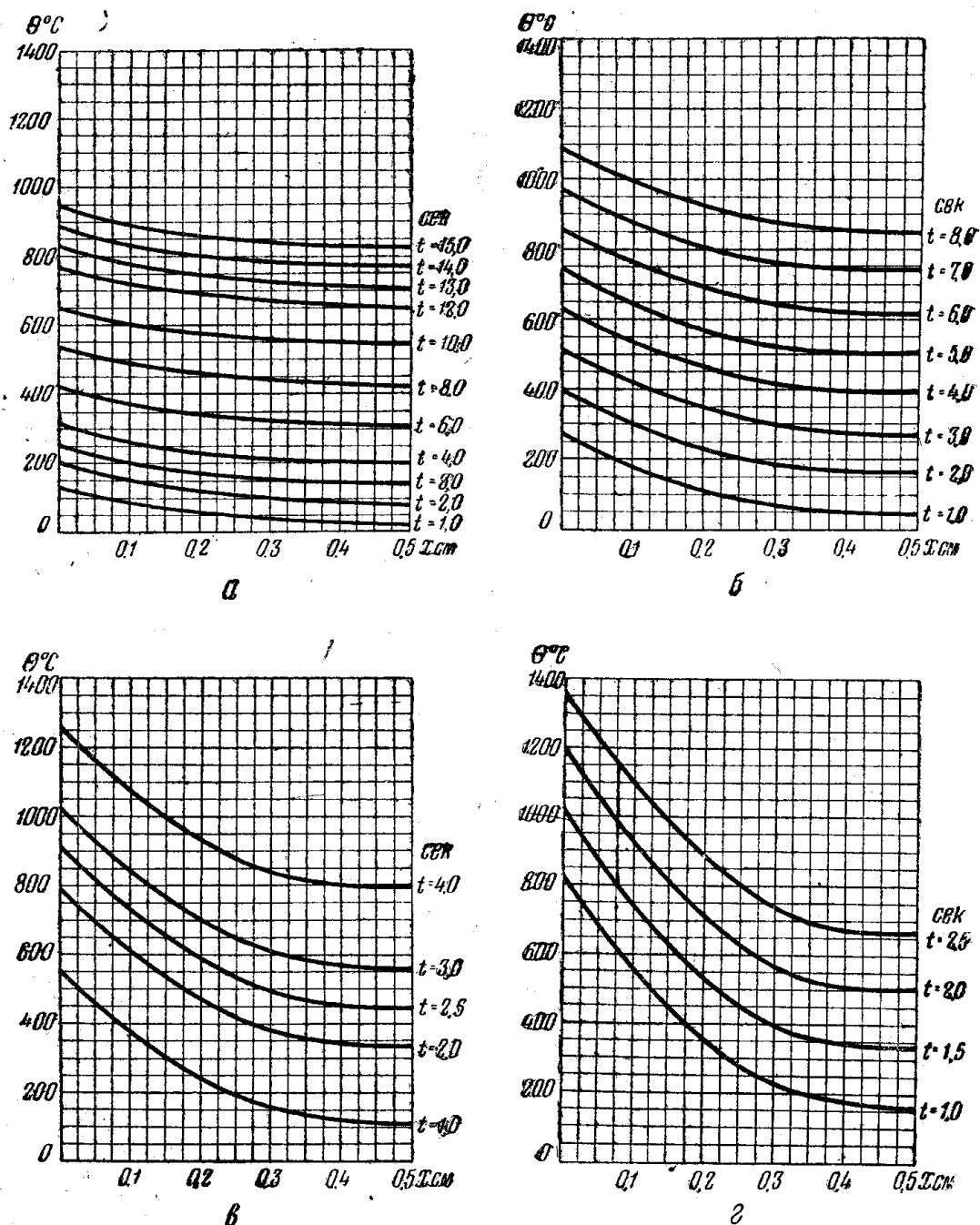
10. Полый цилиндр. Нагрев внутренней поверхности, $\xi = 0$

Нагрев внутренних поверхностей представляет значительный интерес. Условия нагревания их в смысле перегрева, подводимой удельной мощности и к. п. д. менее благоприятны, чем в случае наружной поверхности цилиндра, ввиду того, что потеря тепла на нагрев глубоко лежащих слоев здесь более велика, чем при нагреве наружной поверхности. Плоская поверхность представляет промежуточный случай между наружной и внутренней поверхностями цилиндра.

Внутренняя поверхность при чисто поверхностном нагреве $\xi=0$ и постоянной мощности $p=\text{const}$.

Для распределения температуры имеем уравнение (III, 47); при прежних обозначениях

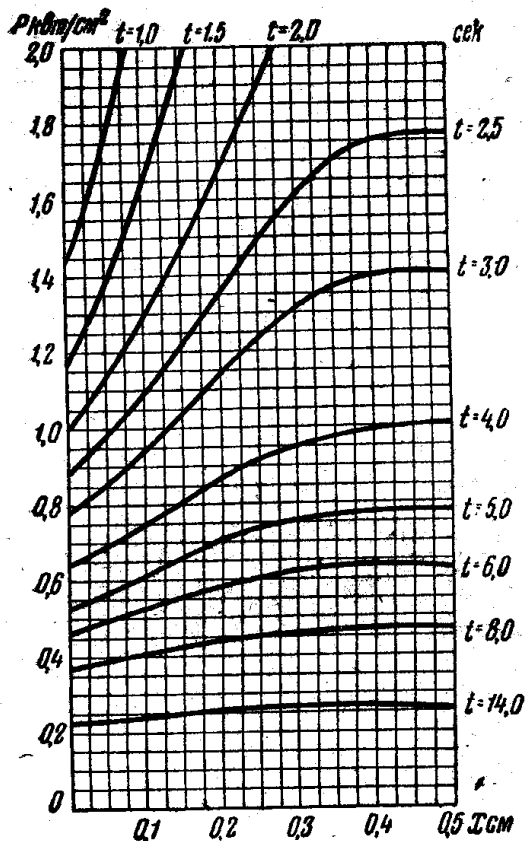
$$\Theta = \frac{478p}{\lambda} \left\{ \frac{1}{k^2 - 1} \frac{at}{r_1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z_0 \left(\nu_n \frac{r}{r_1} \right) z_0(\nu_n) \left(1 - e^{-\nu_n^2 \frac{at}{r_1^2}} \right)}{\nu_n^2 \left\{ k^2 [z_0(k\nu_n)]^2 - [z_0(\nu_n)]^2 \right\}} \right\}. \quad (\text{III, 47})$$



Фиг. 38. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности тела в различные моменты времени t ; $\Theta = \varphi(x)$. Полый цилиндр, $r_1 = 1 \text{ см}$, $r_2 = 1.5 \text{ см}$, $k = \frac{r_2}{r_1} = 1.5$. Чисто поверхностный нагрев внутренней поверхности, $\xi = 0$; $p = \text{const}$.

а) $p = 0.25 \text{ квт/см}^2$; б) $p = 0.50 \text{ квт/см}^2$; в) $p = 1.0 \text{ квт/см}^2$; г) $p = 1.5 \text{ квт/см}^2$.

На фиг. 38 даны графики, отвечающие распределению температур в зависимости от расстояния от поверхности, построенные по уравнению (III, 47) для тех же удельных мощностей p , что и в предыдущих случаях.



Фиг. 39. Удельная мощность, необходимая для нагрева тела до 800° на глубину x , $p = \varphi(x)$. Полый цилиндр, $r_1 = 1$ см, $r_2 = 1,5$ см, $k = \frac{r_2}{r_1} = 1,5$. Чисто поверхностный нагрев внутренней поверхности, $\xi = 0$.

На фиг. 39, как и ранее, дана зависимость $p = \varphi(x)$ при $\theta_k = 800^\circ$ на глубине x .

Коэффициент полезного действия может быть найден по следующему уравнению:

$$\eta = \frac{1}{239} \frac{\lambda}{a} \frac{\theta_k}{p} \frac{x_k}{t_k} \left(1 + \frac{\xi}{2r_0} \right), \quad (\text{III}, 48)$$

в котором t_k определяется по графику (фиг. 38), отвечающему уравнению (III, 47), из условия, что при $r = r_1 + x_k$ $t = t_k$ должно быть $\theta = \theta_k$.

Можно видеть, что уравнение (III, 48) отличается от уравнения (III, 44) для наружных поверхностей знаком перед $\frac{x_k}{2r_1}$.

На фиг. 39 дана удельная мощность, необходимая для нагрева тела на глубину x до температуры 800° , $p = \varphi(x)$.

11. Внутренняя цилиндрическая поверхность при глубинном нагреве. Активный слой, $\xi > 0$

Мощность постоянная, $p = \text{const}$.

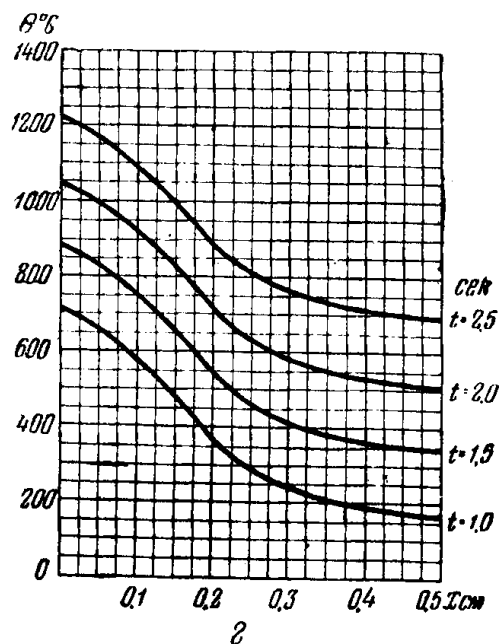
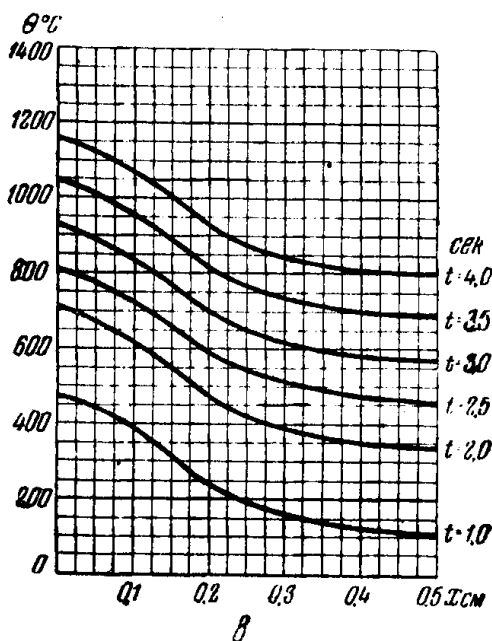
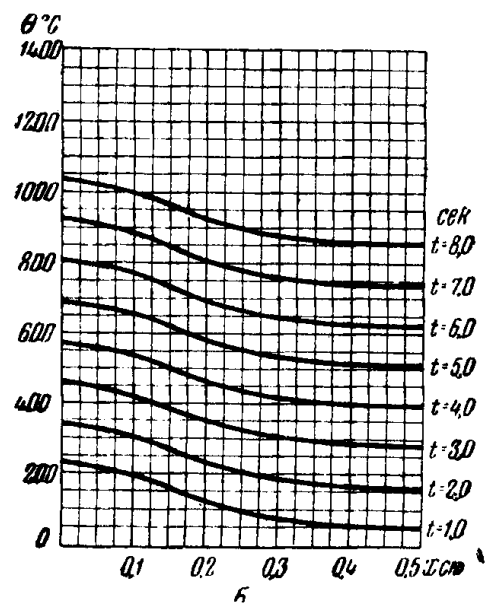
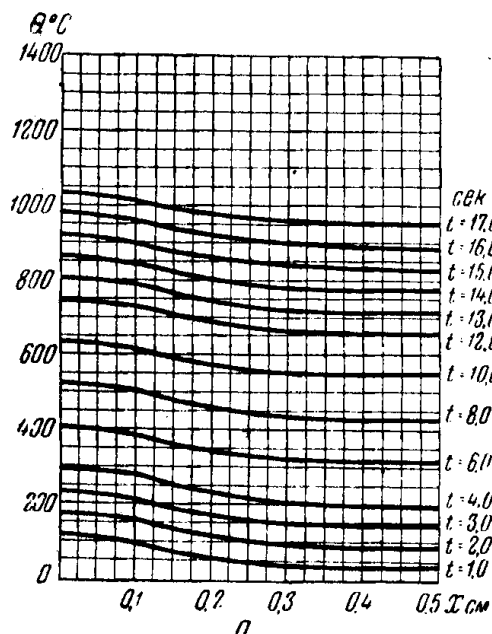
Принимаем для плотности мощности условие

$$w = f(r, t) = \begin{cases} \frac{p}{\xi \left(1 + \frac{\xi}{2r_1} \right)} & \text{при } r_1 < r < r_1 + \xi \\ 0 & \text{при } r_1 + \xi < r, \end{cases} \quad (\text{III}, 49)$$

где p — в кВт/см^2 ; w — в кВт/см^3

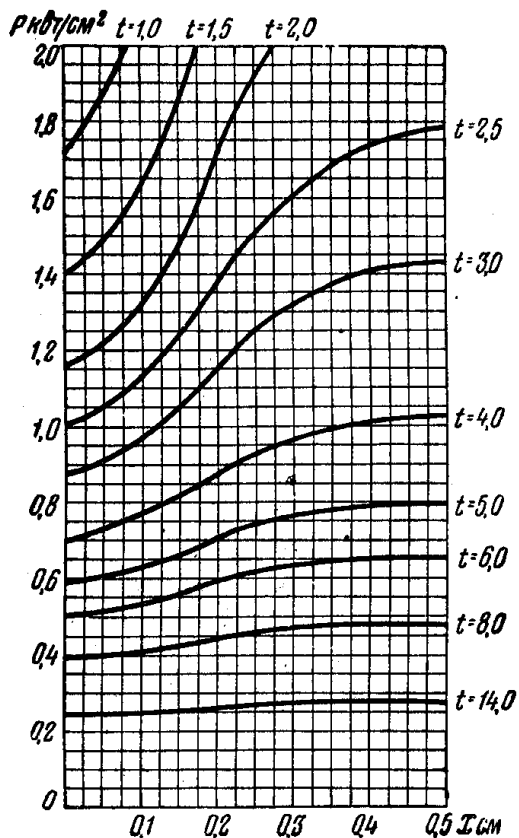
Для распределения температуры имеем

$$\theta = \frac{478p}{\lambda} \left\{ \frac{1}{k^2 - 1} \frac{at}{r_1} + \frac{r_1^2}{\xi \left(1 + \frac{\xi}{2r_1} \right)} \times \right. \\ \left. \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z_0 \left(\nu_n \frac{r}{r_1} \right) \left(1 + \frac{\xi}{r_1} \right) z_1 \left(\nu_n + \frac{\xi}{r_1} \nu_n \right) \left(1 - e^{-\nu_n^2 \frac{at}{r_1^2}} \right)}{\nu_n^3 \left\{ k^2 [z_0(k\nu_n)]^2 - [z_0(\nu_n)]^2 \right\}} \right\}. \quad (\text{III}, 50)$$



Фиг. 40. Распределение температур в зависимости от расстояния x от поверхности тела в различные моменты времени t ; $\theta = \varphi(x)$. Полый цилиндр, $r_1 = 1$ см, $r_2 = 1,5$ см, $k = \frac{r_2}{r_1} = 1,5$. Глубинный нагрев внутренней поверхности: выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см, $p = \text{const}$.
а) $p = 0,25$ квт/см²; б) $p = 0,50$ квт/см²; в) $p = 1,0$ квт/см²; г) $p = 1,5$ квт/см².

На фиг. 40 показаны кривые распределения температуры для данного случая, построенные по уравнению (III, 50) при тех же удельных мощностях p , как и в предыдущих случаях.



Фиг. 41. Удельная мощность, необходимая для нагрева тела до 800° на глубину x , $p = \varphi(x)$. Полый цилиндр, $r_1 = 1$ см; $r_2 = 1,5$ см; $k = \frac{r_2}{r_1} = 1,5$. Глубинный нагрев внутренней поверхности: выделение тепла в активном слое, $\xi = 0,1$ см.

На фиг. 41 дана зависимость $p = \varphi(x)$ для $\Theta_k = 800^\circ\text{C}$ на глубине x .

Для к. п. д. имеем в этом случае то же уравнение (III, 48), что и в случае $\xi = 0$, причем значения для t_k должны быть найдены подобно тому, как это было описано ранее.

12. Заключение. Общий обзор зависимости распределения температуры Θ по глубине x от кривизны поверхности, толщины нагреваемого тела h и от величины активного слоя ξ

Рассмотрим приведенные выше выражения для распределения температуры в нагреваемом с поверхности теле $\Theta = \varphi(x)$ и $\Theta = \varphi(t)$ для различного рода поверхностей, а также разной толщины стенки при $\xi = 0$ и $\xi > 0$, пользуясь кривыми фиг. 15, 19, 21, 24, 27, 31, 34, 36, 38 и 40.

Для большей наглядности нанесем те же кривые $\Theta = \varphi(x)$ для одной из удельных мощностей $p = 1$ квт/см² и одного и того же времени $t = 2,5$ сек. на общий график (фиг. 42).

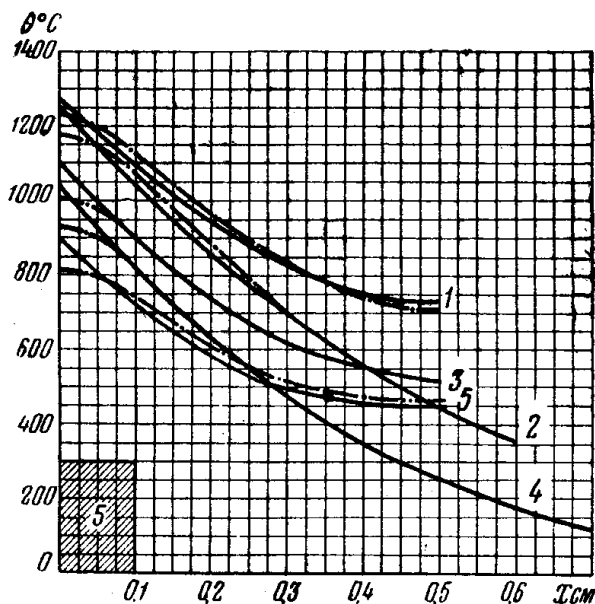
На основании этих кривых можно сделать следующие выводы:

1. Глубинный нагрев во всех случаях оказывает очень благоприятное влияние на уменьшение перегрева ΔT наружной поверхности по отношению к температуре Θ_k слоя на глубине x_k . Так, для плоской поверхности бесконечной толщины при $\xi = 0$ температура наружного слоя Θ_0 будет $\sim 1050^\circ$ при $\Theta_k = 820^\circ$ на глубине $x_k = 0,1$ см, что дает перегрев $\Delta T = 230^\circ$. Тогда как при глубинном нагреве $\xi = x_k = 0,1$ см температура наружной поверхности Θ_0 составляет всего $\Theta_0 = 930^\circ$, что дает перегрев $\Delta T = 110^\circ$.

2. Глубинный нагрев во всех случаях сказывается лишь тогда, когда $\xi \approx x_k$ или $\xi > x_k$, так как при более глубоких слоях, чем ξ , кривые $\Theta = \varphi(x)$ при $\xi = 0$ и $\xi > 0$ практически совпадают.

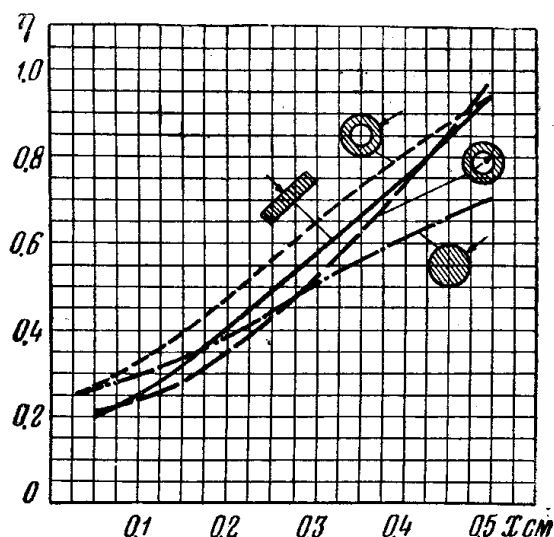
3. Сопоставляя все кривые, видим, что для нагрева наиболее благоприятен полый цилиндр (при нагреве его с наружной поверхности); при одной и той же мощности здесь в заданное время получится наибольшая температура на поверхности с наименьшим перегревом. Далее идет наружный нагрев сплошного цилиндра, затем плоская поверхность с ограниченной толщиной стенки h , если h по толщине

одного порядка с x_k ($h \leq 5-6 x_k$). Затем следует, как несколько менее благоприятный, нагрев плоской стенки бесконечной толщины $h = \infty$ или практически $h > 20 x_k$. Еще менее благоприятен с точки зрения получения требуемой температуры в заданное время и при данной величине p нагрев внутренних цилиндрических поверхностей, когда $r_2 - r_1 = h$ значительно, например, $h > 20 x_k$. При этом имеется и наибольший перегрев ΔT .



Фиг. 42. Сравнение хода кривых распределения температур Θ по глубине x , как для различных поверхностей, так и для различных толщин h при чисто поверхностном $\xi = 0$ и глубинном $\xi = 0,1$ см нагреве, $p = \text{const} = 1 \text{ кВт/см}^2$; $t = \text{const} = 2,5$ сек.

1—полый цилиндр, наружная поверхность; 2—сплошной цилиндр, наружная поверхность; 3—плоская поверхность, $h=0,5$ см; 4—плоская поверхность, $h = \infty$; 5—внутренняя поверхность цилиндра.



Фиг. 42а. Сравнение хода кривых термического к. п. д. в зависимости от глубины x_k для тела с различной поверхностью и толщиной стенки. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$; перегрев $\Delta T = 200^\circ$; $\eta = \varphi(x_k)$.

Говоря о чисто поверхностном нагреве $\xi = 0$ и глубинном $\xi \approx x_k$, необходимо указать, что в действительных условиях нагрев обычно лишь приближается к тому или другому типу, как это и сказано в п. 12 главы II. В действительных условиях при нагреве третьего типа условия будут более благоприятны, даже по сравнению с глубинным нагревом при $\xi \approx x_k$. Наконец, необходимо сказать, что чем больше кривизна, т. е. чем больше отношение $\frac{x_k}{r_0}$, тем сильнее выражены различия, данные на графиках (фиг. 42).

Остановимся теперь на втором вопросе, связанном с нагревом поверхностей различной кривизны, на термических к. п. д. в зависимости от кривизны и толщины стенки. На фиг. 42а дана сводка этих величин, показывающая, что кривизна поверхности здесь сказывается сравнительно незначительно в том случае, если глубина закаленного слоя x_k мала по сравнению с радиусом кривизны r_0 для цилиндра или по сравнению с толщиной стенки h закаливаемого тела: $\frac{x_k}{r_0} < 10$ и $\frac{x_k}{h} < 10$.

В пределе при $\frac{x_k}{r_0} \approx 0$ и $\frac{x_k}{h} = 0$ термические к. п. д. для всех случаев одни и те же, так как они будут отвечать к. п. д. тела бесконечной толщины с плоской поверхностью ($r_0 = \infty$, $h = \infty$).

При увеличении глубины закаленного слоя x_k или при уменьшении толщины стенки h к. п. д. увеличивается, достигая для $x_k = r_0$ и $x_k = h$ (сквозной нагрев) значения, близкого к единице.

К. п. д. $\eta = 1$ здесь получится при нагреве без перегрева $\Delta T = 0$, что будет при $t = \infty$.

Описанные здесь особенности, зависящие от кривизны и толщины стенки, могут быть использованы при закалке тел сложной конфигурации (см. главу VI).

ГЛАВА IV

СКОРОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕЛА ПРИ НАГРЕТОМ ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ

1. Значение скорости охлаждения в процессе закалки

Для получения при закалке надлежащей структуры и твердости, помимо нагрева до определенной температуры, необходимо, чтобы охлаждение происходило при скорости, превышающей некоторую величину, носящую название *критической скорости*. Требуемая скорость охлаждения должна осуществляться при прохождении интересующей нас глубины x_k некоторого определенного диапазона температур, отвечающего наименьшей устойчивости аустенита. В наиболее часто встречающихся случаях этот диапазон лежит в пределах 500—600°.

Рассматривая ранее поверхностную закалку, мы предполагали, что условие достаточно высокой скорости охлаждения выполнено, так как быстрое охлаждение легче осуществляется при нагреве лишь тонкого поверхностного слоя, а не всей массы металла. Исходя из этого, глубину закаленного слоя x_k предполагали равной глубине, на которой металл принимает при нагреве закалочную температуру T_k . Хотя такое предположение и отвечает большинству случаев поверхностной закалки, однако иногда оно неверно. Например, при закалке на сравнительно большие глубины, особенно при закалке мелкозернистой стали с малым содержанием углерода, а также при закалке после очень быстрого нагрева, когда время нагрева недостаточно для полного растворения. Последнее чаще всего встречается, когда стремятся получить тонкий закаленный слой, особенно при пониженных частотах.

В настоящем разделе остановимся на влиянии скорости охлаждения на толщину закаленного слоя, не касаясь пока вопросов, связанных с быстрым нагревом и неполным растворением.

Для того, чтобы определить, будет ли в том или другом случае толщина закаленного слоя x_k зависеть лишь от закалочной температуры T_k или на ее величину окажет влияние скорость охлаждения, рассмотрим процесс быстрого охлаждения тела при нагретом поверхностном слое.

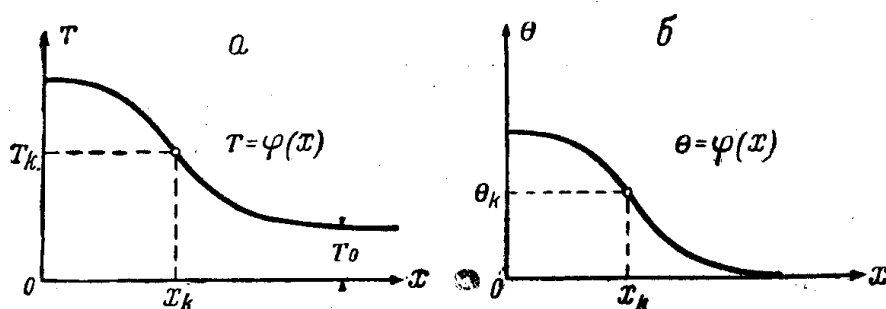
Здесь определим не только распределение температур по времени t и глубине x $\Theta = \varphi(x, t)$, но также и скорость охлаждения

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = f(x, t).$$

Располагая этими зависимостями и зная для той или другой марки стали критическую скорость охлаждения в определенном диапазоне температур, можно решить, какую глубину закаленного слоя x_k получим в рассматриваемом случае.

Для большей простоты предположим пока, что тело ограничено плоскостью, поверхность которой нагрета в момент времени $t=0$ на глубину $x_0=2x_k$ до некоторой температуры T ; причем $\Theta=(T-20)^\circ$ — разность между температурой в точке x и комнатной температурой, равной 20° . В большинстве интересующих нас случаев $\Theta_k=800^\circ$. При этом положим, что температура распределена по глубине по некоторой произвольной кривой, заданной графиком фиг. 43, а. В относительных температурах эта кривая отвечает уравнению (IV, 1) и фиг. 43, б:

$$\Theta_{t=0} = \varphi(x). \quad (\text{IV, 1})$$



Фиг. 43. а—распределение температуры T в теле к началу охлаждения; б—превышение температуры в теле к началу охлаждения (относительные температуры).

Допустим также, что в момент $t=0$ наружная поверхность будет быстро охлаждена до температуры 100° , так что можно принять для $t=0$, $x=0$, $\Theta_b=80^\circ$.

2. Общее решение задачи

Если рассматривать охлаждение плоской поверхности, нагретой на некоторую глубину, то для распределения температуры можем написать следующее выражение, данное Г. А. Разореновым:

$$\Theta = \Theta_b + \frac{1}{2\sqrt{\pi at}} \int_0^\infty [\varphi(x) - \Theta_b] \left[e^{\frac{(x-x)^2}{4at}} - e^{\frac{(x+x)^2}{4at}} \right] dx. \quad (\text{IV, 2})$$

Уравнение (IV, 2) можно написать также в другом виде:

$$\begin{aligned} \Theta = \Theta_b \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \right] + \\ + \frac{1}{2\sqrt{\pi at}} \int_0^\infty \varphi(x) \left[e^{\frac{(x-x)^2}{4at}} - e^{\frac{(x+x)^2}{4at}} \right] dx, \end{aligned} \quad (\text{IV, 3})$$

где

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\tau^2} d\tau -$$

функция Крампа [см. примечание к пояснению уравнения (III, 15)]: x, ξ — переменные интегриации, выпадающие при подстановке пределов.

Для получения скорости изменения температуры Θ по времени $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ дифференцируем уравнение (IV, 3):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = & \Theta_b \frac{x}{4 \sqrt{at^3}} \Phi_1 \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right) - \\ & - \frac{1}{4 \sqrt{\pi at^3}} \int_0^\infty \varphi(x) \left\{ \left[1 - \frac{(x-x)^2}{2at} \right] e^{-\frac{(x-x)^2}{4at}} - \right. \\ & \left. - \left[1 - \frac{(x-x)^2}{2at} \right] e^{-\frac{(x-x)^2}{4at}} \right\} dx. \end{aligned} \quad (IV, 4)$$

3. Первый метод числовых расчетов. Поверхностный нагрев

Так как формулы (IV, 2) и (IV, 3) неудобны для числовых расчетов, то Г. А. Разоренов предложил два упрощенных метода, дающих, правда, уменьшение точности.

В первом методе кривую $\Theta = \varphi(x)$ (фиг. 43,б) заменяют ломаной линией (фиг. 44). Глубины x_1, x_2 и т. д., отвечающие ширине «ступенек» этой «лестницеобразной кривой», могут быть взяты произвольно. Чем больше их число, тем больше точность.

Температуры $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_m$ можно найти либо графически, как это видно на фиг. 44, либо аналитически, из равенств

$$\Theta_n = \varphi(x), \quad (IV, 5)$$

где $n=1, 2, 3 \dots$

При выбранном упрощении приведенное выше общее решение примет следующую форму:

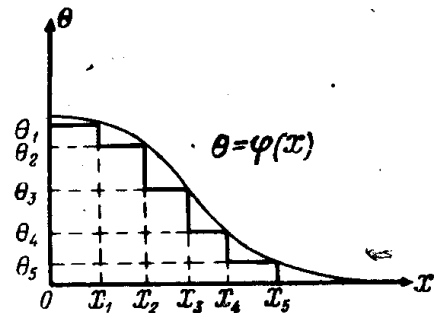
$$\begin{aligned} \Theta = & \Theta_b \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right) \right] + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^m \Theta_n \left[\Phi \left(\frac{x-x_{n-1}}{2 \sqrt{at}} \right) + \right. \\ & \left. + \Phi \left(\frac{x+x_{n-1}}{2 \sqrt{at}} \right) - \Phi \left(\frac{x-x_n}{2 \sqrt{at}} \right) - \Phi \left(\frac{x+x_n}{2 \sqrt{at}} \right) \right], \end{aligned} \quad (IV, 6)$$

где $\Phi(z)$ имеет прежние значение [уравнение (III, 13)].

При $n=1$ в формуле появляется x_0 , который следует приравнять нулю, т. е. $x_0=0$.

Если свести решение к еще более простой задаче, когда $\varphi(x)$ состоит из одного прямоугольника (фиг. 45), то формула (IV, 6) примет вид

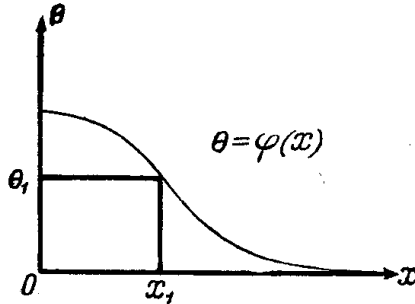
$$\begin{aligned} \Theta = & \Theta_b \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right) \right] + \Theta_1 \left[\Phi \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{x-x_1}{2 \sqrt{at}} \right) - \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{x+x_1}{2 \sqrt{at}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (IV, 7)$$



Фиг. 44. Кривая распределения температуры в теле в виде лестницы, заменяющая действительное распределение.

Подставив численные значения: $\Theta_1 = \Theta_k = 800^\circ$ (температура закалки) и $\Theta_b = 80^\circ$ (температура горячей воды), получим

$$\begin{aligned} \Theta = 80 + 720 \cdot \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - 400\Phi\left(\frac{x-x_1}{2\sqrt{at}}\right) - \\ - 400\Phi\left(\frac{x+x_1}{2\sqrt{at}}\right) = 80 \left[1 + 9\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \right. \\ \left. - 5\Phi\left(\frac{x-x_1}{2\sqrt{at}}\right) - 5\Phi\left(\frac{x+x_1}{2\sqrt{at}}\right) \right]. \quad (\text{IV}, 8) \end{aligned}$$



Фиг. 45. Простейший случай распределения температуры в теле в виде прямоугольника.

Здесь можно принять

$$x_1 \approx 2\xi.$$

Скорость изменения температуры по времени в случае первого метода получим дифференцированием выражения (IV, 6), как это делалось и раньше:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \Theta_b \frac{x}{4\sqrt{at^3}} \Phi_1\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \\ - \frac{1}{8\sqrt{at^3}} \sum_{n=1}^m \Theta_n \left[(x-x_{n-1}) \Phi_1\left(\frac{x-x_{n-1}}{2\sqrt{at}}\right) + \right. \\ + (x+x_{n-1}) \Phi\left(\frac{x+x_{n-1}}{2\sqrt{at}}\right) - (x-x_n) \Phi\left(\frac{x-x_n}{2\sqrt{at}}\right) - \\ \left. - (x+x_n) \Phi\left(\frac{x+x_n}{2\sqrt{at}}\right) \right]. \quad (\text{IV}, 9) \end{aligned}$$

Так же точно для более простого случая, когда $\varphi(x)$ состоит из одного прямоугольника (фиг. 45), скорость охлаждения получим дифференцированием уравнения (IV, 7).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \Theta_b \frac{x}{4\sqrt{at^3}} \Phi_1\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \\ - \Theta_1 \frac{1}{4\sqrt{at^3}} \left[x \Phi_1\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \frac{1}{2} (x-x_1) \Phi_1\left(\frac{x-x_1}{2\sqrt{at}}\right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} (x+x_1) \Phi_1\left(\frac{x+x_1}{2\sqrt{at}}\right) \right]. \quad (\text{IV}, 10) \end{aligned}$$

При $\Theta_1 = \Theta_k = 800^\circ$, $\Theta_b = 80^\circ$ имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = -180 \frac{x}{\sqrt{at^3}} \Phi_1\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) + 100 \frac{x-x_1}{\sqrt{at^3}} \Phi_1\left(\frac{x-x_1}{2\sqrt{at}}\right) + \\ + 100 \frac{x+x_1}{\sqrt{at^3}} \Phi_1\left(\frac{x+x_1}{2\sqrt{at}}\right). \quad (\text{IV}, 11) \end{aligned}$$

Необходимо заметить, что первый метод даст удовлетворительный результат лишь в случае кривой распределения температуры по фиг. 43, весьма близкой к прямоугольнику, что бывает при низких частотах и очень большой удельной мощности, когда проникаемость μ резко падает с глубиной x .

4. Второй метод числовых расчетов. Поверхностный нагрев

Вместо приведенной выше замены кривой уравнения (IV, 1) лестницеобразной кривой возможно заменить ее ломаной, составленной из хорд кривой $\varphi(x)$ (фиг. 46). Такая замена целесообразна в большинстве случаев нагрева. Величины $x_1, x_2, \dots$ задают произвольно.

Температуры находят, как и ранее, либо графически, либо из равенства

$$\theta_n = \varphi(x_{n-1}), \quad (\text{IV, 12})$$

где $n=1, 2, \dots$; причем $x_0=0$.

Углы $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ также находят графически или из равенства

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\theta_n - \theta_{n+1}}{x_n - x_{n-1}}, \quad (\text{IV, 13})$$

где $n=1, 2, \dots$, причем $\theta_{m+1}=0, x_0=0$.

В случае принятого выше упрощения общее решение примет приближенную форму:

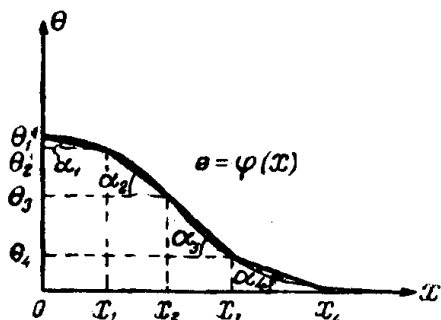
$$\begin{aligned} \theta = & \theta_b \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^m \left\{ [\theta_n - (x - x_{n-1}) \operatorname{tg} \alpha_n] \left[\Phi \left(\frac{x - x_{n-1}}{2\sqrt{at}} \right) - \right. \right. \\ & - \left. \Phi \left(\frac{x - x_n}{2\sqrt{at}} \right) \right] + [\theta_n + (x + x_{n-1}) \operatorname{tg} \alpha_n] \left[\Phi \left(\frac{x + x_{n-1}}{2\sqrt{at}} \right) - \right. \\ & - \left. \Phi \left(\frac{x + x_n}{2\sqrt{at}} \right) \right] - \operatorname{tg} \alpha_n \sqrt{at} \left[\Phi_1 \left(\frac{x - x_{n-1}}{2\sqrt{at}} \right) - \right. \\ & - \left. \Phi_1 \left(\frac{x - x_n}{2\sqrt{at}} \right) - \Phi_1 \left(\frac{x + x_{n-1}}{2\sqrt{at}} \right) + \Phi_1 \left(\frac{x + x_n}{2\sqrt{at}} \right) \right] \right\}, \quad (\text{IV, 14}) \end{aligned}$$

где $x_0=0$.

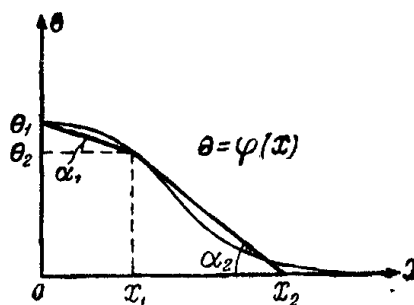
$$\Phi_1(z) = \frac{d}{dz} \Phi(z) = \frac{2}{\pi} e^{-z^2} \quad (\text{IV, 15})$$

есть первая производная функции Крампа $\Phi(z)$.

При $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = 0$ формулы (IV, 14) превращаются в формулу (IV, 6).



Фиг. 46. Кривая распределения температуры в теле к началу охлаждения в виде трапециoidalной ломаной линии, заменяющая действительное распределение.



Фиг. 47. Простейший случай распределения температуры в виде четырехугольника.

Второй метод при одинаковом числе ступеней дает значительно более точный результат (правда, при этом формула получается более сложной) и может быть рекомендован в большинстве случаев.

Если, как и в случае первого метода, кривую $\varphi(x)$ заменим единственным четырехугольником (фиг. 47), то формула (IV, 14) примет следующий вид:

$$\begin{aligned}\Theta = & \Theta_b + (\Theta_1 - \Theta_b) \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) + \\ & + \frac{1}{2x_1} \left[\Theta_1 - \frac{x_2}{x_2 - x_1} \Theta_2 \right] \left\{ (x - x_1) \Phi\left(\frac{x - x_1}{2\sqrt{at}}\right) - \right. \\ & - (x + x_1) \Phi\left(\frac{x + x_1}{2\sqrt{at}}\right) + \sqrt{at} \left[\Phi_1\left(\frac{x - x_1}{2\sqrt{at}}\right) - \right. \\ & - \left. \Phi_1\left(\frac{x + x_1}{2\sqrt{at}}\right) \right] \left. \right\} + \frac{1}{2(x_2 - x_1)} \Theta_2 \left\{ (x - x_2) \Phi\left(\frac{x - x_2}{2\sqrt{at}}\right) - \right. \\ & - (x + x_2) \Phi\left(\frac{x + x_2}{2\sqrt{at}}\right) + \sqrt{at} \left[\Phi_1\left(\frac{x - x_2}{2\sqrt{at}}\right) - \right. \\ & - \left. \Phi_1\left(\frac{x + x_2}{2\sqrt{at}}\right) \right] \left. \right\}. \quad (\text{IV, 16})\end{aligned}$$

Скорость изменения $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$, как и раньше, может быть найдена из уравнений (IV, 14) и (IV, 16) в виде следующего уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Theta}{\partial t} = & - \frac{1}{4\sqrt{at^3}} \left\{ (\Theta_1 - \Theta_b) x \Phi_1\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \right. \\ & - \frac{1}{2} [(\Theta_1 - \Theta_2 - x_1 \operatorname{tg} \alpha_1)(x - x_1) - (\operatorname{tg} \alpha_2 - \\ & - \operatorname{tg} \alpha_1) 2at] \Phi_1\left(\frac{x - x_1}{2\sqrt{at}}\right) - \frac{1}{2} [(\Theta_1 - \Theta_2 - x_1 \operatorname{tg} \alpha_1)(x + x_1) + \\ & + (\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1) 2at] \Phi_1\left(\frac{x + x_1}{2\sqrt{at}}\right) - \frac{1}{2} \{ [\Theta_2 - \\ & - (x_2 - x_1) \operatorname{tg} \alpha_2] (x - x_2) + \operatorname{tg} \alpha_2 2at \} \Phi_1\left(\frac{x - x_2}{2\sqrt{at}}\right) - \\ & - \frac{1}{2} \{ [\Theta_2 - (x_2 - x_1) \operatorname{tg} \alpha_2] (x + x_2) - \operatorname{tg} \alpha_2 2at \} \Phi_1\left(\frac{x + x_2}{2\sqrt{at}}\right) \left. \right\}. \quad (\text{IV, 17})\end{aligned}$$

В случае упрощения, согласно фиг. 47, получим

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Theta}{\partial t} = & - \frac{1}{4\sqrt{at^3}} \left\{ (\Theta_1 - \Theta_b) x \Phi_1\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \right. \\ & - \frac{at}{x_1} \left[\Theta_1 - \frac{x_2}{x_2 - x_1} \Theta_2 \right] \left[\Phi_1\left(\frac{x - x_1}{2\sqrt{at}}\right) - \Phi_1\left(\frac{x + x_1}{2\sqrt{at}}\right) \right] - \\ & - \frac{at}{x_2 - x_1} \Theta_2 \left[\Phi_1\left(\frac{x - x_2}{2\sqrt{at}}\right) - \Phi_1\left(\frac{x + x_2}{2\sqrt{at}}\right) \right] \left. \right\}. \quad (\text{IV, 18})\end{aligned}$$

В формулах (IV, 17) и (IV, 18) $\Phi_1(z)$, как и ранее, есть первая производная функции Крампа.

Так как в большинстве случаев нас интересует распределение температуры при охлаждении и скорости охлаждения в слоях, близких по ширине к x_k , то почти всегда достаточно пользоваться упрощением фиг. 47.

5. Сплошной нагрев, $\varphi(x) = \text{const} = \Theta_1$

Охлаждение тела, нагретого равномерно сплошь, хорошо известно в литературе, так как это бывает при обычной закалке и при очень многих тепловых явлениях¹. Уравнение для распределения температуры в зависимости от расстояния от поверхности в различные моменты времени, считая от начала охлаждения, может быть, помимо непосредственного вывода, получено как частный случай уравнений (IV, 2), (IV, 3), (IV, 6) и (IV, 14), если принять в уравнении (IV, 1) $\Theta_{t=0} = \varphi(x) = \text{const}$. При этом в формулах (IV, 7), (IV, 8), (IV, 10) и (IV, 11), отвечающих фиг. 45, следует положить $x_1 = \infty$, тогда получим

$$\begin{aligned} \Theta &= \Theta_b \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \right] + \Theta_1 \cdot \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) = \\ &= \Theta_b + (\Theta_1 - \Theta_b) \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right). \end{aligned} \quad (\text{IV, 19})$$

Так же точно, дифференцируя уравнение (IV, 19), получим для скорости охлаждения:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -(\Theta_1 - \Theta_b) \frac{x}{4\sqrt{at^3}} \Phi_1 \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right). \quad (\text{IV, 20})$$

Написанные выше уравнения (IV, 3), (IV, 6), (IV, 14), (IV, 16) и (IV, 19) позволяют построить кривые распределения температур в теле, ограниченном плоской поверхностью, по глубине x , для различных моментов времени t , и, кроме того, уравнения (IV, 4), (IV, 9), (IV, 10), (IV, 11), (IV, 17), (IV, 18) и (IV, 20) дают возможность построить скорости охлаждения на различных глубинах x в те же моменты времени (фиг. 48 и 49). При этом фиг. 48 отвечает поверхностному нагреву, а фиг. 49 — сплошному.

По этим кривым видно, что кривые Θ для различных моментов времени быстро сливаются с кривой $\Theta_{t=0} = \varphi(x)$, не пересекая ее, если кривая $\Theta_{t=0} = \varphi(x)$ получена из уравнения теплопроводности (I, 1). Это обозначает, что во всех точках тела после начала охлаждения наружной поверхности происходит понижение температуры.

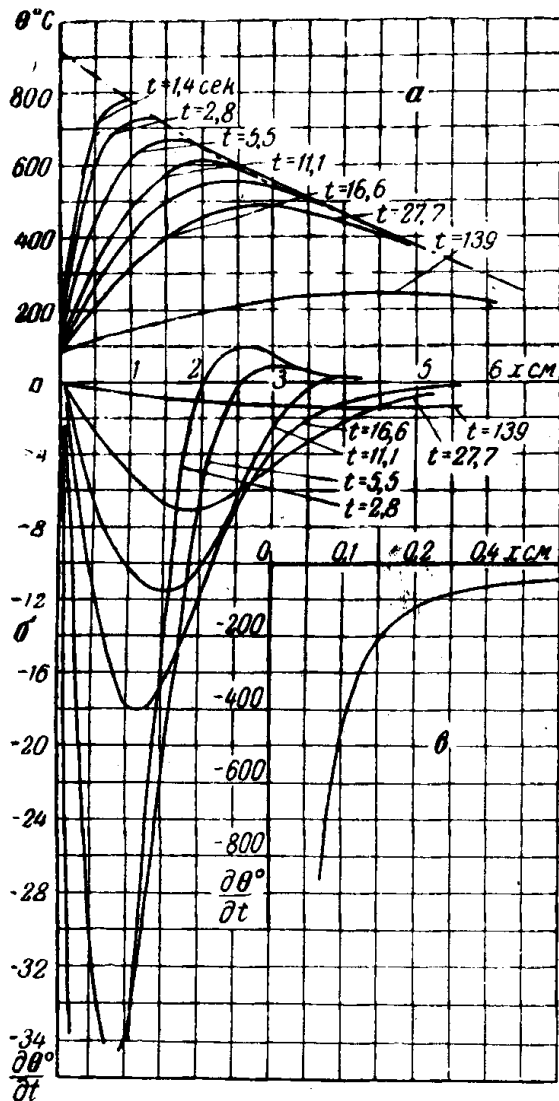
По фиг. 48 можно видеть, что кривые $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ имеют участки в области положительных значений, отвечающих нагреву, что, казалось бы, противоречит только что сказанному. Объясняется это противоречие тем, что кривые $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ и $\Theta = \varphi(x)$ построены, исходя из фигуры, образованной прямыми линиями, отступающей от кривой, даваемой уравнением (I, 1).

6. Применение уравнений скорости охлаждения для определения глубины закаленного слоя x_k

Сопоставление кривых распределения температуры в теле в различные моменты времени t , на различной глубине $\Theta = \varphi(x, t)$ (фиг. 48,а и 49,а), с кривыми скорости охлаждения (фиг. 48,б и 49,б) для тех же моментов времени и на той же глубине позволяет судить не только о скоростях охлаждения $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ на различных глубинах, но и о скорости охлаждения в различных интервалах температур.

¹ Г. Гребер, Введение в теорию теплопередачи, Гостехиздат, 1929.

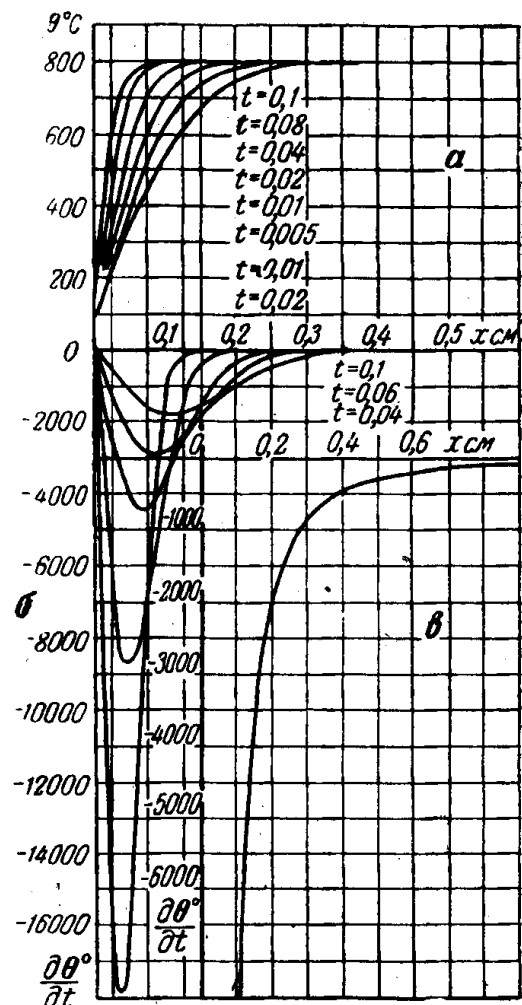
Последнее очень важно, так как процесс заковки определяется не скоростью охлаждения при закалочной температуре θ_k , а скоростью охлаждения при температуре наименьшей устойчивости аустенита, которая чаще всего охватывает интервал температур 500—600°¹.



Фиг. 48. Охлаждение плоского тела. Поверхностный нагрев, $\xi = 0$.

α —распределение температуры при охлаждении (уравнение V, 16), для различных значений времени t , $\theta = \varphi(x)$; β —распределение скоростей охлаждения для температур (фиг. 48а) и тех же моментов времени t , $\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right) = \varphi(x)$; β —скорости охлаждения, которые имеют место во время прохождения слоем x температуры 550°
 $\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)_{550} = \varphi(x)$.

Ввиду этого на фиг. 48, β и 49, β на основе кривых $\theta = \varphi(x)$ и $\frac{\partial\theta}{\partial t}$ (фиг. 48, α , 48 β , 49, α и 49, β) построены кривые, дающие скорость охлаждения $\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)_{550} = \varphi(x)$ и отвечающие для каждой глу-



Фиг. 49. Охлаждение плоского тела. Сплошной нагрев.

α —распределение температуры охлаждения, уравнение (V, 19) для различных значений времени t , $\theta = \varphi(x)$; β —распределение скоростей охлаждения для температур фиг. 49а и тех же моментов времени t , $\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right) = \varphi(x)$; β —скорости охлаждения, которые имеют место во время прохождения слоем x температуры 550°
 $\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)_{550} = \varphi(x)$.

¹ G. Digges, Influence of austenitic grain size on the critical cooling rate of high-purity iron-carbon alloys, Journal of Research of the National Bureau of Standards, v. 24, June 1940, p. 730.

бины x тому моменту, в который температура во время охлаждения достигает значения, отвечающего наименьшей устойчивости аустенита. При построении эта температура принята равной 550° .

На основе всего сказанного можно перейти к использованию уравнений этой главы и фиг. 48 и 49 для определения условий получения той или другой глубины закаленного слоя. Эти условия состоят в следующем:

Первое условие. Температура на глубине x_k , которая может быть найдена на кривой $\Theta_k = \varphi(x)$ (фиг. 43 или фиг. 48, а), должна быть выше или равна закалочной температуре Θ_k , т. е.

$$\Theta_{x_k} \geq \Theta_k. \quad (\text{IV}, 21)$$

Второе условие. Скорость охлаждения $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial t}\right)_{550^\circ}$ на глубине x_k во время прохождения слоев с этой глубиной температуры $\Theta_k \approx 550^\circ$ должна быть не ниже критической:

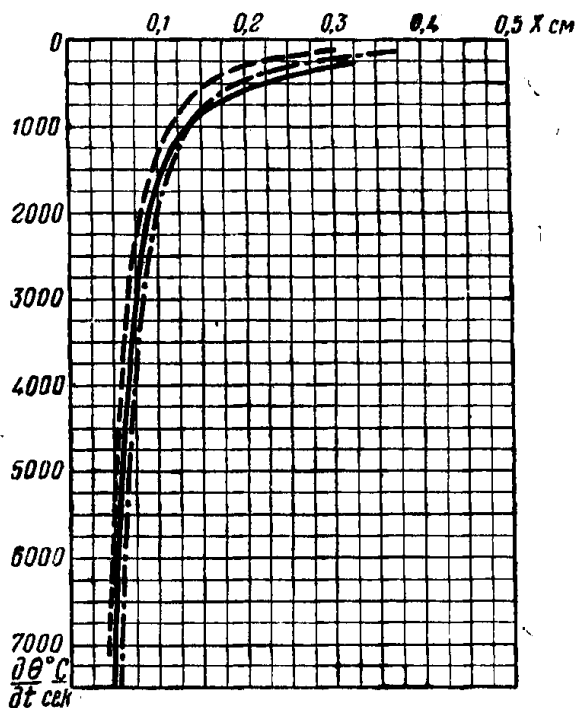
$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial t}\right)_{\Theta=550^\circ} \geq \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t}\right)_{\text{кр}}. \quad (\text{IV}, 22)$$

Условие (IV, 22) может быть найдено по кривым (фиг. 48, в и 49, в). Если одно из этих условий не выполнить, то закалка либо совсем не получится, либо будет на меньшую, чем x_k глубину.

Необходимо заметить, что для сталей с малой критической скоростью, например легированных, или при малых глубинах закаленного слоя условие (IV, 22) легко выполняется, и здесь глубина закаленного слоя определяется исключительно уравнением (IV, 21), как это было принято в табл. 5 и при всех выводах. В тех же случаях, когда требуется осуществить закалку на большие глубины x_k , например, при $x_k > 4$ у сталей с высокой критической скоростью, то глубина закаленного слоя определяется не уравнением (IV, 21), а уравнением (IV, 22).

Критическая скорость охлаждения зависит от температуры, до которой нагрет слой x_k , уменьшаясь с ее повышением. Поэтому для получения больших глубин закаленного слоя, при стали с высокой критической скоростью приходится нагревать сталь до закалочной температуры Θ_k

на большую глубину чем x_k так, чтобы на глубине x_k температура при охлаждении имела значение $\Theta > \Theta_k$, и этим обусловилось снижение критической скорости охлаждения.



Фиг. 50. Сравнение скорости охлаждения тела, нагретого сплошь и с поверхности, при температуре 550° $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial t}\right)_{550} = \varphi(x)$.

Сплошная линия — сплошной нагрев; штрихпунктирная — поверхностный нагрев.

Интересно сравнить скорости охлаждения $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{550^\circ}$ при поверхностном нагреве с такой же скоростью при сплошном нагреве. На фиг. 50 дано это сравнение.

Скорости, против всякого ожидания, почти совпадают; это указывает, что и при сплошном нагреве и при поверхностном можно получить одну и ту же глубину закаленного слоя x_k , если сталь имеет заданную критическую скорость охлаждения и слой x_k нагрет до закалочной температуры θ_k .

Увеличение глубины x_k может быть при поверхностном нагреве получено лишь вследствие того, что благодаря быстрой нагрева здесь возможно пользоваться более высокими температурами, достигая этим снижения критической скорости. Это, однако, возможно лишь при нагреве третьего типа (см. табл. 5), так как при чисто поверхностном нагреве препятствием служит перегрев наружной поверхности, который никакой пользы с точки зрения критической скорости не приносит вследствие того, что нас в этом отношении интересует температура не на поверхности, а в слое с глубиной x_k .

Кривые фиг. 48 и 49 вычерчены для удельной мощности $p=1 \text{ квт/см}^2$ и времени нагрева $t=2 \text{ сек.}$, причем кривые фиг. 48, кроме того, исходят из $x_k=1 \text{ см.}$, тогда как кривые фиг. 49 построены для $x_k=0,1 \text{ см.}$ Однако имеется полная возможность пользоваться этими кривыми и для других удельных мощностей и глубин, если применить метод подобия (см. главу VII, п.п. 1 и 2), учитывая особенности, связанные с данным случаем (см. главу VII, п. 12).

Так как процесс индукционной закалки располагает многими параметрами, выбор которых предоставляется экспериментатору [например, удельная мощность и частота, причем первая из них может в случае надобности не оставаться постоянной по времени, а меняться по заранее выбранному закону $p=\tau(t)$], то становится возможно осуществить к моменту охлаждения $t=0$ ту или другую кривую распределения температур $\theta=f(x)$.

Так, при очень высоких частотах или малой удельной мощности распределение температур пойдет по экспоненте, тогда как низкие частоты при значительной удельной мощности дадут кривую, приближающуюся к прямоугольнику.

Имея ту или другую кривую $\theta=f(x)$ и задаваясь температурой наружной поверхности при начале охлаждения в момент времени $t=0$, можно осуществить ряд режимов для скорости охлаждения в любой точке закаленного слоя, что открывает новые возможности для получения тех или других структур и их распределения по глубине закаленного слоя.

Помимо этого, имеется еще возможность, которая не учтена уравнением (IV, 3), а именно, применение охлаждения наружной поверхности по тому или другому закону, что, как известно, используется в упрощенной форме и при обычной сплошной и поверхностной закалке.

Все это расширяет возможность индукционной закалки и в смысле более благоприятного распределения внутренних напряжений.

Необходимо отметить, что во всех выводах этой главы не учитывалось выделение тепла, происходящее при переходе критических точек.

ГЛАВА V

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ, СВЯЗАННЫЕ С ИНДУКТИРОВАНИЕМ И ПРОХОЖДЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПО ПРОВОДНИКАМ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ МЕТОДА ЗАКАЛКИ¹

Помимо закономерностей, относящихся к теплопередаче в индукционном методе поверхностной закалки, использованы некоторые закономерности, относящиеся к электрическим явлениям.

Особенно благоприятную роль здесь сыграли те особенности, которые связаны в этих явлениях с увеличением частоты, причем увеличение частоты играет роль *не только количественную, но и качественную*.

Хотя большинство явлений, положенных в основу данного метода, достаточно известно, однако для более ясного понимания метода они приведены в этой главе, для того чтобы в дальнейшем изложении можно было на них ссылаться в наиболее удобной для нас формулировке.

1. Закон индукции

Как это и следует из самого названия метода, нагревание поверхности производится токами, образованными посредством индукции. Для этого нагреваемое тело помещают в магнитное поле, пронизывающее это тело. При высоких частотах поле проникает лишь в тонкий поверхностный слой тела, а из остального внутреннего объема тела поле как бы вытесняется. Если магнитный поток, создаваемый полем, равен Φ , то в этом случае получим для индуктированной э. д. с.

$$e = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} 10^{-8}. \quad (V, 1)$$

При частоте магнитного поля f и синусоидальной его форме получим для эффективного значения э. д. с.

$$E = 4,44nf\Phi 10^{-8} \text{ в.} \quad (V, 2)$$

В нашем случае число витков $n=1$.

¹ Приведенный в настоящей главе математический анализ, начиная с формулы (V, 13) и далее, собран и переработан Г. А. Разореновым. Формулы (V, 54) и далее, до конца настоящей главы, получены Г. А. Разореновым (см. Отчет группы члена-корреспондента Академии Наук СССР проф. В. П. Вологодина Энергетического института имени акад. Г. М. Кржижановского за 1939 г., работа Г. А. Разоренова, О распределении тока в параллельных проводах круглого сечения при эффекте близости).

Умножая обе части уравнения (V, 2) на эффективное значение тока I , который будет создан в нагреваемом теле э. д. с. E , получим

$$P'' = EI = 4,44f\Phi/10^{-8} \text{ в} \cdot \text{а} \quad (\text{V}, 3)$$

или мощность

$$P = EI \cos \varphi = 4,44f\Phi/10^{-5} \cos \varphi \text{ кВт.}$$

По уравнению (V, 3) видно, что кажущаяся мощность $P'' = EI$, индуцируемая постоянным магнитным потоком Φ , при постоянном значении силы тока I — пропорциональна частоте.

В случае достаточно высокой частоты $\cos \varphi$ не зависит ни от частоты, ни от параметров тела. Поэтому для этого случая и активная мощность P , передаваемая телу, также пропорциональна частоте.

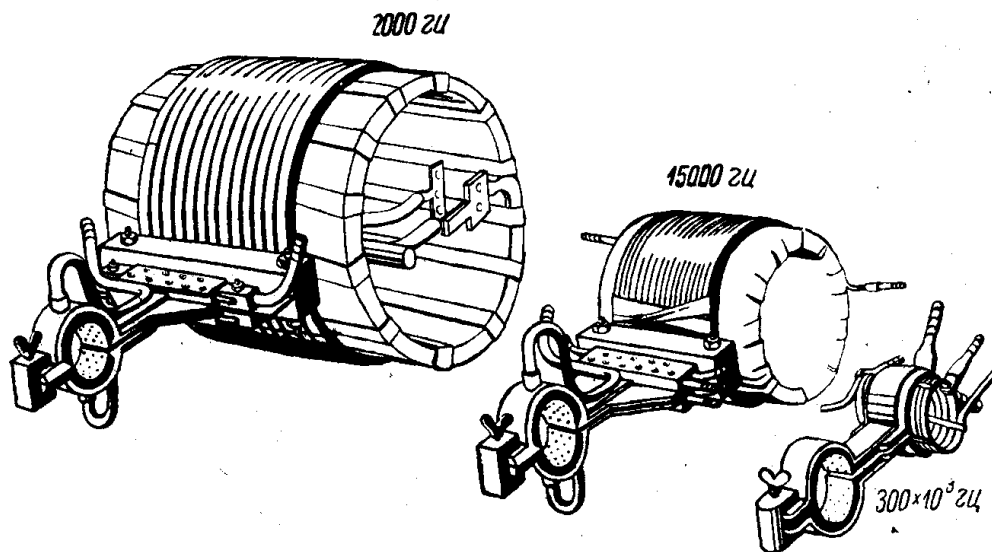
Так как величина магнитного потока связана с размерами тела, что видно по выражению:

$$\Phi = qB, \quad (\text{V}, 4)$$

если не менять индукцию или силу поля, то отсюда следует, что при индуктировании токов увеличение концентрации мощности может быть достигнуто повышением частоты:

$$k = \frac{P}{V} = \frac{EI \cos \varphi}{V} = \frac{4,44fqBI \cos \varphi}{V} = \frac{AfBI}{h'}, \quad (\text{V}, 5)$$

так как объем $V = qh'$, где q — сечение тела, а h' — его высота и $A = 4,44 \cos \varphi = \text{const}$, так как $\cos \varphi$ при высоких частотах, согласно сказанному выше, может быть принят постоянным.



Фиг. 51. Зависимость размеров воздушного трансформатора от частоты.
Мощность $P = 500 \text{ кВт.}$

Возможность значительной концентрации мощности, а следовательно и энергии, может быть формулирована так же, как возможность уменьшения размера и веса устройств, служащих для тех или других целей техники, если эти устройства в своей работе основаны на законах индукции.

На фиг. 51 изображены три трансформатора как приборы, работающие по принципу индукции; причем видно, что с увеличением частоты размеры трансформатора значительно уменьшаются.

2. Закон магнитной цепи

Поток, необходимый для создания э. д. с., может быть получен при помощи контура, образованного проводником в виде одного или нескольких (например, n) витков и по которому проходит ток i . В этом случае индукция и сила поля, которые будут создаваться этим проводником с током, могут быть определены по уравнению

$$\int H dl = \frac{B_1}{\mu_1} l_1 + \frac{B_2}{\mu_2} l_2 + \dots = \frac{4\pi ni}{10}, \quad (V, 6)$$

где i — в а.

Если кольцевой проводник малой высоты или, точнее, он имеет малое значение $\frac{h}{d}$, то поле внутри этого кольца будет неравномерно (фиг. 52, а). С увеличением отношения $\frac{h}{d}$ равномерность поля внутри кольцевого проводника возрастает (фиг. 52, б и 52, в).

В большинстве случаев закалки для упрощения выводов нас интересует равномерное поле. Такое поле будет создаваться бесконечной или практически весьма длинной катушкой, образованной проводом с током. Для равномерности поля достаточно, чтобы

$$\frac{h}{d} \approx 30. \quad (V, 7)$$

В этом случае имеем

$$H = 0,4\pi ni, \quad (V, 8)$$

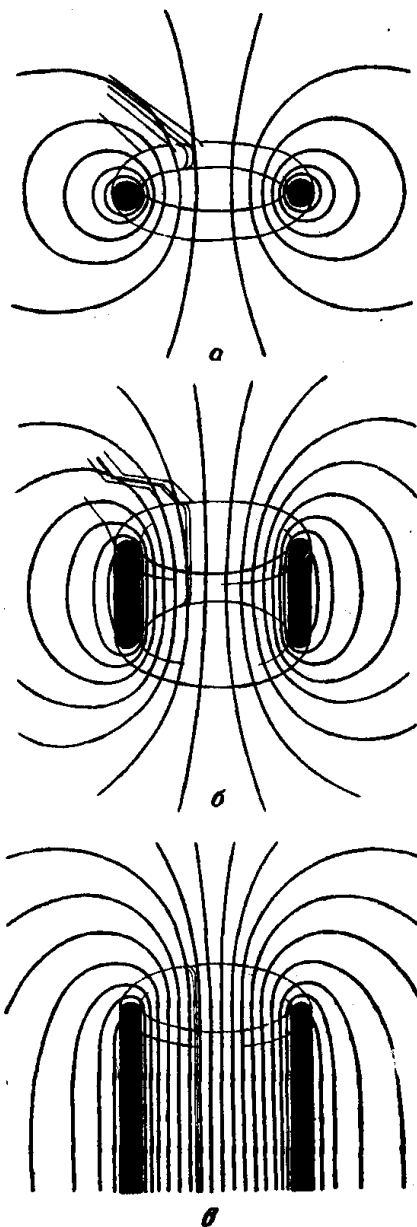
где i — сила тока в а.

Хотя почти всегда в закалочных устройствах уравнение (V, 7) не выполнено, однако ввиду наличия некоторых условий, связанных с работой индуктора (поток в узком зазоре между индуктором и телом), во многих случаях можно считать H равномерным.

3. Особенности, связанные с прохождением токов высокой частоты

В этом методе особый интерес представляют токи высокой частоты, при которых весьма значительно облегчается возможность концентрации энергии. Поэтому рассмотрим те явления, которые возникают в проводах при повышении частоты. Однако надо оговориться, что частоту тока следует рассматривать не по абсолютной ее величине, а в связи с размерами тела или проводника, по которому проходит интересующий нас ток. Численная зависимость для этого отношения будет дана ниже.

Все особенности, связанные с высокими частотами, имеют общую основу и могли бы быть рассмотрены в общем виде, однако для



Фиг. 52. Распределение магнитного поля внутри кольцевого провода, при разных отношениях.

а) $\frac{h}{d} = 0,15$; б) $\frac{h}{d} = 0,6$; в) $\frac{h}{d} = 30$.

ясности мы опишем их как отдельные явления, принимая лишь во внимание сделанную только что оговорку.

Нас будут интересовать следующие явления:

- 1) поверхностный эффект (скин-эффект);
- 2) явление близости (Proximity effect, Annäherungseffect);
- 3) катушечное явление;
- 4) явления, связанные с наличием магнитных экранов.

4. Поверхностный эффект

Это явление наиболее известно техникам. Оно состоит в том, что переменный ток при прохождении его по проводнику, если сечение проводника велико, или при малых сечениях, но при высокой частоте тока заполняет сечение провода неравномерно. Ток имеет наибольшую плотность у наружной поверхности провода; эта плотность тока плавно спадает при переходе к более глубоким слоям. При очень высоких частотах это явление обнаруживается столь сильно, что можно говорить о прохождении тока лишь по тонкому поверхностному слою проводника. Поверхностный эффект в значительной степени увеличивает сопротивление проводов, чем часто вносит затруднения в конструкцию тех или иных приборов, так как в значительной мере теряется возможность уменьшить сопротивление провода при больших силах тока, увеличивая его сечение.

Вместо зависимости сопротивления провода от сечения

$$R = \rho \frac{l}{q} \quad (V, 9)$$

здесь имеем зависимость сопротивления R от периферии провода s , а не от сечения:

$$R = \rho \frac{l}{s}. \quad (V, 10)$$

Иначе говоря, с увеличением размеров провода в n раз сопротивление его при наличии значительного поверхностного эффекта уменьшается не в n^2 , а лишь в n раз.

Описанное необходимо учитывать при конструировании приборов, применяемых в данном методе. Интересно отметить, что в этом случае роль удельного сопротивления уменьшается, ибо действие удельного сопротивления до известной степени парализует явление поверхностного эффекта. Так, если какой-либо проводник имеет сопротивление R_1 при удельном сопротивлении ρ_1 , то проводник при тех же размерах, но с удельным сопротивлением ρ_2 при высоких частотах будет иметь сопротивление R_2 :

$$R_2 = R_1 \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}, \quad (V, 11)$$

а не

$$R_2 = R_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad (V, 12)$$

как это было бы при низких частотах.

Отсюда следует, что при применении толстых проводов или при достаточно высоких частотах использование проводов с более низкой проводимостью, если только провод немагнитный, будет лучшим, чем использование тех же проводов при низкой частоте. Так, для алюминиевых проводов использование в этом случае будет по сравнению с медью на 35% выше, чем при низких частотах или малых сечениях. Из сказанного следует, что применять алюминий для шин в данном

случае рекомендуется более, чем при низкой частоте; железные же провода влияют крайне неблагоприятно.

Явление образования неодинаковой плотности при поверхностном эффекте может быть в нескольких чертах объяснено следующим образом.

Пусть в цилиндрическом теле с радиусом r проходит ток i (фиг. 53). Если ток постоянный, то в теле будет магнитное поле H . Если ток переменный, то магнитное поле будет индуцировать в массе тела э. д. с., которые вызовут соответствующие токи. Эти токи имеют вблизи оси тела различные направления с основным током, вследствие чего они вычитаются, обуславливая уменьшение плотности тока, тогда как на поверхностных частях эти токи имеют одно и то же направление с основным током и будут с ним складываться, что даст увеличение плотности в частях, более близких к поверхности.

Если по проводу идет переменный ток

$$i = I_m \cos \omega t, \quad (V, 13)$$

где i — полный ток всего сечения, то распределение плотности тока при переходе от наружной поверхности к более глубоким слоям может быть выражено уравнением

$$j = j_m \frac{e^{-\frac{x}{\delta}}}{\sqrt{1 - \frac{x}{r_0}}} \cos \left(\omega t - \frac{x}{\delta} + \frac{\pi}{4} \right), \quad (V, 14)$$

где j — плотность тока на глубине x в момент t ;

r_0 — радиус провода;

δ — глубина проникновения тока, о которой было уже упомянуто ранее:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (V, 15)$$

где ρ — удельное сопротивление;

μ — магнитная проницаемость (все величины в единицах CGSM);

j_m — амплитуда плотности тока на поверхности:

$$j_m = \frac{I_m}{\sqrt{2} \pi \delta r_0}, \quad (V, 16)$$

где I_m — амплитуда полного тока.

Формулы (V, 14) и (V, 16) справедливы с точностью не ниже 5% лишь тогда, когда

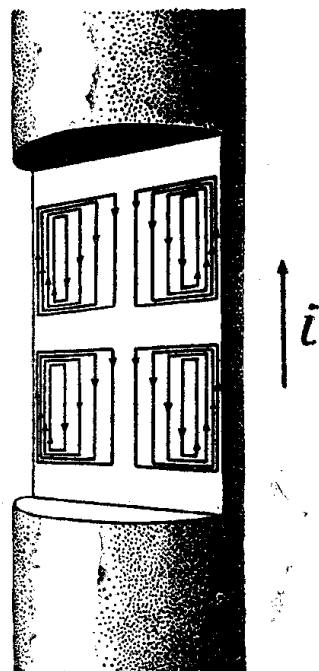
$$r_0 \geq 4\delta. \quad (V, 17)$$

В случае весьма больших радиусов или для плоской поверхности при

$$r_0 \geq 33\delta \quad (V, 18)$$

с той же точностью можно положить

$$\sqrt{1 - \frac{x}{r_0}} = 1. \quad (V, 18a)$$



Фиг. 53. Внутренние токи в проводящем теле, обуславливающие поверхностный эффект.

В этом случае получим более известную формулу

$$j = j_m e^{-\frac{x}{\delta}} \cos \left(\omega t - \frac{x}{\delta} + \frac{\pi}{4} \right), \quad (V, 19)$$

где j_m попрежнему имеет значение (V, 16).

При низких частотах и малых радиусах, когда

$$\delta \gg 2,5r_0, \quad (V, 20)$$

получим

$$j = j_m \frac{r}{r_0} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (V, 21)$$

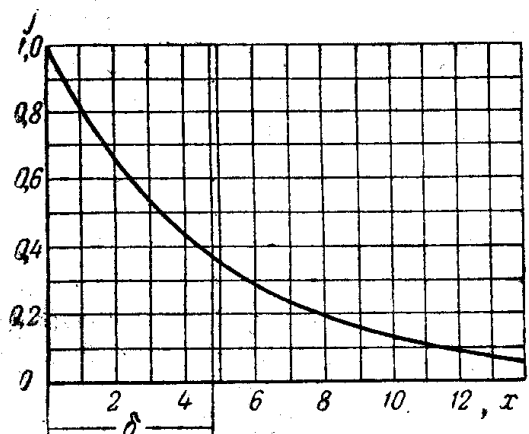
где

$$j_m = \frac{I_m r_0}{\delta^2},$$

$$r = r_0 - x.$$

Распределение тока, согласно уравнению (V, 19), представлено на фиг. 54.

Так как на практике затруднительно пользоваться сложным распределением тока, показанным на кривой (фиг. 54), то при рассмотрении явлений, связанных с поверхностным эффектом, для упрощения заменяют показанное распределение тока более простым. Тогда полагают ток идущим по некоторому поверхностному слою с равномерной плотностью, равной действительной плотности на поверхности, при глубине этого слоя δ , которая носит название «эквивалентной глубины проникновения».



Фиг. 54 Распределение плотности тока, проходящего по проводу, при поверхностном эффекте, по уравнению (V, 19), и глубине проникновения δ .

Как видно на фиг. 54, эта глубина пересекает истинную кривую распределения плотности тока тогда, когда плотность тока равна

$$j_m \frac{1}{e} = \frac{j_m}{2,73} = 0,38j_m$$

плотности на поверхности. Принятие этой замены оправдывается тем, что тепловое действие тока при его действительном распределении, по уравнению (V, 19), одинаково с тем действием, которое оказывает ток, распределенный равномерно с плотностью j_m в слое с толщиной δ . Величина δ играет значительную роль во всех явлениях прохождения тока при высоких частотах и поэтому на этой величине будем останавливаться неоднократно.

При всех явлениях, связанных с той или иной частотой и размерами тела, характер протекания явлений зависит не от частоты или размеров тела, а от соотношения между глубиной проникновения δ и размерами тела, что еще более увеличивает значимость величины δ . В табл. 7 приведены данные для глубины проникновения δ для красной меди и стали при 15 и 830°. Для частоты 50 и 2000 гц приведено на фиг. 1 распределение тока в медном проводе диаметром 7,6 см. Необходимо обратить внимание на то, что ввиду зависимости δ от про-

нищаемости, а также и от удельного сопротивления холодная и горячая сталь имеют различные глубины проникновения.

Таблица 7

Глубина проникновения δ , см

Частота гц	Красная медь при 15°	Сталь 1045 при 15°	Сталь 1045 при 850°
50	1,0	0,22	9,14
2000	0,15	0,05	1,45
10 ⁴	0,07	0,02	0,65
3·10 ⁵	0,012	0,005	0,12

Ток, проходя по проводнику, будет распределяться неравномерно в том случае, если он подведен с помощью контактов, и в том случае, если он получен посредством индукции. Для последнего случая дадим выражение, аналогичное уравнению (V, 19) для плотности тока, индуцированного в цилиндрическом теле, помещенном в однородное переменное магнитное поле, с эффективной напряженностью поля $H_{эф}$.

При выполнении условия (V, 17) имеем

$$j_{эф} = \frac{H_{эф}}{2 \sqrt{2} \pi \delta} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x}{r_0}}} e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (V, 22)$$

При $\delta > 2,5 r_0$ с точностью 5% получим

$$j_{эф} = \frac{H_{эф}}{4\pi\delta^2} r. \quad (V, 23)$$

Поверхностный эффект обуславливается магнитным полем, образующимся при прохождении переменного тока по проводу и расположенным внутри провода. При этом, как это видно на фиг. 54, наибольшая плотность тока при изменении его по экспоненте будет там, где наибольшее магнитное поле. Оба эти вектора взаимно связаны приведенным ниже уравнением (V, 24). Следовательно, явление поверхностного эффекта относится не только к току, но и к переменному магнитному полю.

5. Взаимное распределение магнитного и электрического полей

Во многих случаях получение в нагреваемом теле тока посредством индукции, а также при прохождении тока, связанном с поверхностными явлениями того или другого рода (поверхностный эффект, явление близости, вытеснение магнитными экранами), бывает полезно знать распределение магнитного потока, когда известно распределение плотности тока, и наоборот.

Так как обе эти величины взаимно связаны, то нетрудно решить поставленную задачу, не прибегая к дополнительным вычислениям, зная ход изменения одной из величин.

Уравнение, связывающее мгновенные напряженности магнитного поля и плотности тока, можно написать в следующем виде:

$$4\pi j = - \frac{\partial H}{\partial x} \quad (V, 24)$$

Отсюда для простейшего случая распределения плотности по экспоненте формула (V, 19), согласно уравнению (V, 24), дает для эффективных значений

$$j_{эф} = j_m \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x}{\delta}}$$

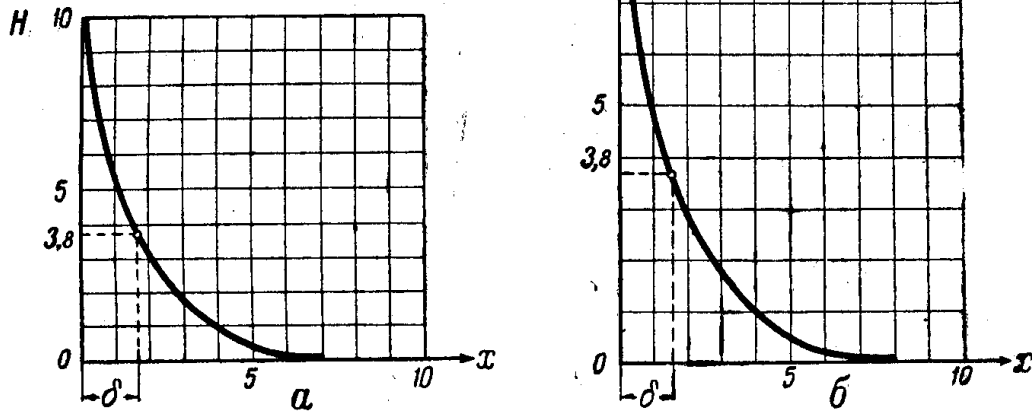
и

$$H_{эф} = H_m \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{x}{\delta}}, \quad (V, 25)$$

т. е. и спадание плотности тока и спадание поля идут по одной кривой, отличаясь лишь по фазе.

Так же точно из уравнения (V, 24) можно найти распределение поля при различных формах спадающего тока и обратно.

На фиг. 55 приведены кривые, показывающие эти зависимости. Эти кривые можно использовать для выяснения картины нагрева токами, индуктируемыми в поверхности тела под закалку.



Фиг. 55. Распределение магнитного поля и соответствующее распределение плотности тока.

Необходимо заметить, что уравнение (V, 24) дает зависимость между мгновенными значениями плотности тока и поля. Что касается соотношения между эффективными значениями, которые главным образом нас и интересуют, то, как это было показано уравнением (V, 25), в некоторых случаях кривая плотности тока j имеет тот же характер, что и кривая поля H ; однако в большинстве случаев ввиду различия фаз поля и тока этого не наблюдается. В таких случаях кривая поля бывает совершенно другого характера, не имеющего ничего общего с кривой плотности тока. Исследование этого вопроса, представляющего практический интерес, было сделано Г. А. Разореновым.

6. Сопротивление при высоких частотах

Неравномерность в распределении плотности тока вызывает значительное увеличение сопротивления провода; коэффициент увеличения этого сопротивления

$$k = \frac{R}{R_0},$$

где R — сопротивление при высокой частоте;
 R_0 — сопротивление при постоянном токе.

Коэффициент k зависит от того, насколько ярко выражено явление поверхностного эффекта. В качестве мерил здесь можно принять отношение между величиной δ и размерами провода. Поэтому ниже даны коэффициенты увеличения сопротивления при малом значении отношения $\frac{\delta}{r_0}$ [уравнение (V, 25a)] и при большом $\frac{\delta}{r_0}$ [уравнение (V, 27)].

При малых величинах $\frac{\delta}{r_0}$

$$k = \frac{d}{2\sqrt{\pi\delta}} \frac{\operatorname{sh}\alpha'' + \sin\alpha''}{\operatorname{ch}\alpha'' - \cos\alpha''}, \quad (\text{V, 25a})$$

где

$$d = 2r_0 \text{ и } \alpha'' = \frac{d}{\sqrt{\pi\delta}}. \quad (\text{V, 26})$$

При больших величинах $\frac{\delta}{r_0}$

$$k = \frac{R}{R_0} \approx 1 + \frac{d^4}{180\pi^2\delta^4}. \quad (\text{V, 27})$$

При сечении провода, сильно отличающемся от круга, при высоких частотах, когда δ значительно меньше каждого из размеров провода, сопротивление провода может быть получено из уравнения (V, 10), так как в этом случае проводимость провода можно считать пропорциональной не сечению провода, а его периферии s . Из уравнения (V, 10), кроме того, следует, что при той же частоте, а значит, и величине δ использование сечения провода с увеличением его размеров в n раз падает также в n раз.

7. Явление близости

Поверхностный эффект зависит от переменного магнитного поля, расположенного внутри провода и созданного током, протекающим по этому проводу.

Распределение магнитного поля непосредственно связано с распределением плотности тока в этом проводе. Если изменить конфигурацию поля внутри провода наложением на него поля той же частоты, созданного другим проводом, то получим изменение в распределении плотности тока в проводе, соответствующее изменению в расположении магнитного поля согласно уравнению (V, 24). Здесь также плотность тока увеличится в тех частях провода, в которых будет увеличено изменение магнитного поля, и уменьшится там, где это изменение поля будет уменьшено. Приняв во внимание сказанное, рассмотрим, как распределятся плотности переменного тока внутри провода, если вблизи этого провода поместить такой же провод с током той же частоты и фазы.

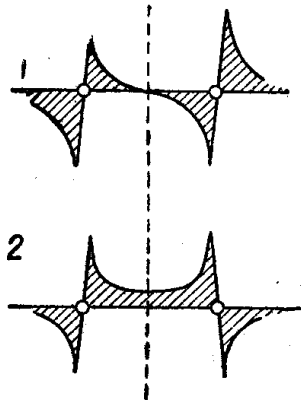
На фиг. 56 показаны напряженности магнитного поля каждого из проводов и распределение результирующей напряженности поля, производимой обоими проводами; причем даны два случая: 1) токи имеют одинаковое направление, 2) токи имеют противоположное направление.

В первом случае напряженность поля внутри проводов наибольшая в точках, удаленных одна от другой; во втором же случае, в точках, лежащих вблизи. Принимая во внимание сказанное ранее, плотности тока внутри проводов в том и в другом случае будут иметь вид, показанный на фиг. 57.

Название явления близости оправдывается тем, что описанный эффект резко обнаруживается лишь при сближении проводов на очень небольшие расстояния.

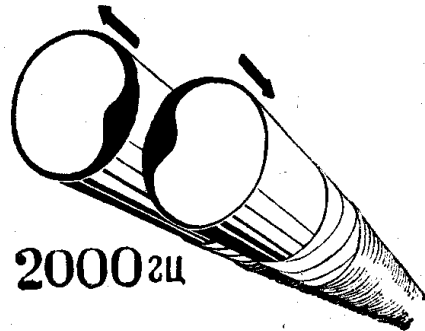
Нетрудно заметить, что явление близости также ведет к увеличению сопротивления провода, к уменьшению его использования.

Плотности тока при явлении близости могут быть выражены следующими уравнениями (в зависимости от того, будут ли размеры провода одинаковыми или различными).



Фиг. 56. Распределение магнитного поля при явлении близости:

1—токи одного направления;
2—токи противоположных направлений.



Фиг. 57. Распределение плотности тока в проводах при явлении близости (черным показаны части провода с плотностями большими некоторого значения j).

Первый случай. Два одинаковых провода радиуса r_0 при токах противоположного направления. Распределение плотности тока в зависимости от расстояния от поверхности x здесь будет выражаться той же формулой, что и для уединенного провода [уравнение (V, 14)]. Однако значение амплитуды плотности тока на поверхности не постоянно, а зависит от положения точки на окружности, определяемой углом β . Для j_m в этом случае Г. Ми¹ вывел формулу

$$j_m = j_{cp} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^2}}{1 - \frac{r_0}{R_0} \cos \beta}, \quad (\text{V}, 28)$$

где j_{cp} дано было ранее уравнением (V, 16) и является средним значением амплитуды плотности тока на поверхности проводника:

$$j_{cp} = \frac{I_m}{\sqrt{2} \pi r_0}.$$

Величины r_0 , R_0 и β показаны на фиг. 58, а, также на фиг. 64, причем в последнем случае по оси абсцисс отложена величина

$$\alpha = \frac{r_0}{R_0}. \quad (\text{V}, 29)$$

¹ G. Mie, Elektrische Wellen an zwei parallelen Drähten, Ann. d. Phys., B. 2, № 6, 1900, S. 201—249.

При сравнительно больших расстояниях между проводами, когда $\frac{r_0}{R_0} < 0,1$ мало, распределение плотности выражается уравнением

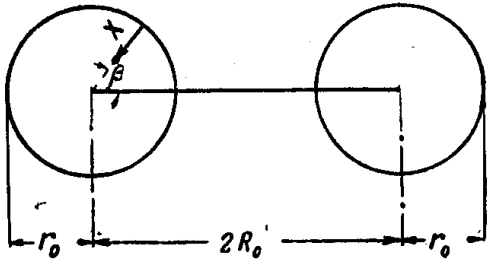
$$j_m = j_{\text{ср}} \left(1 + \frac{r_0}{R_0} \cos \beta \right). \quad (\text{V}, 30)$$

Формулу (V, 28) можно переписать в виде:

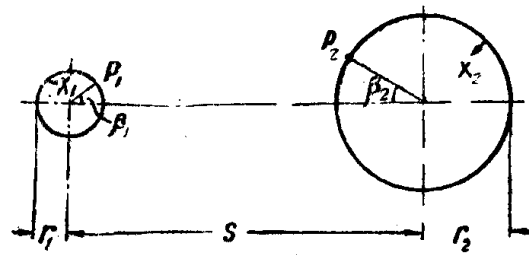
$$j_m = j_{\text{ср}} \frac{\sqrt{2\varepsilon + \varepsilon^2}}{\varepsilon + 1 - \cos \beta}, \quad (\text{V}, 31)$$

где $\varepsilon = \frac{R_0 - r_0}{r_0}$ — отношение просвета между проводами к диаметру провода.

В написанных выше формулах дано распределение плотности тока в функции угла β .



Фиг. 58. Обозначения к первому случаю явления близости.



Фиг. 59. Обозначения ко второму случаю явления близости.

Что касается максимальной плотности тока, то она будет в точке M , когда $\beta = 0$, т. е.

$$j_{\text{max}} = j_{\text{ср}} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon} + 1}. \quad (\text{V}, 32)$$

Выражения (V, 31) и (V, 32) справедливы также и при проводах с большой магнитной проницаемостью, когда $\mu > 1$, однако лишь в том случае, если частота тока сравнительно высока, так, чтобы было выполнено условие

$$\frac{\mu \delta}{r_0} = \frac{1}{r_0} \sqrt{\frac{\mu \rho}{2\pi\omega}} \ll 1. \quad (\text{V}, 33)$$

Если это условие не выполнено, то явление близости будет выражено значительно меньше, чем это дают формулы. При очень больших проницаемостях проводов, когда μ можно принять равной бесконечности, явление близости совершенно не замечается. Так же точно при весьма низких частотах, когда не выполнено условие (V, 33), приведенные выражения не имеют места. Зависимости, выведенные для двух круглых проводов, если не дают количественных соотношений для двух одинаковых проводов другой какой-либо формы, то дают некоторые качественные указания.

Второй случай. Два провода различных диаметров; токи противоположного направления¹.

Обозначения, относящиеся к данному случаю, даны на фиг. 59. Аналогично предыдущему случаю амплитуда плотности тока в зави-

¹ Указанные в настоящем разделе формулы получены Ч. Сноу (C. Snow, Alternating current distrib in cyl. conductors, Scient. papers of the Bureau of Standards, v. 20, № 509, 1925, p. 277—338) и приведены к более простому виду Г. А. Разорновым.

симости от расстояния от поверхности x будет выражаться той же формулой (V, 14), причем значение амплитуды плотности тока на поверхности также зависит от угла β и выражается следующей формулой:

$$j_{m1} = j_{1\text{cp}} \frac{1 - b_1^2}{1 + b_1^2 - 2b_1 \cos \beta_1}, \quad (\text{V}, 34)$$

где $j_{1\text{cp}}$ — среднее значение плотности тока на поверхности первого провода, как и раньше,

$$j_{1\text{cp}} = \frac{I_1}{\sqrt{2\pi} \cdot r_1 \delta_1}.$$

В формуле (V, 34) через b_1 обозначено выражение

$$b_1 = \frac{s^2 + r_1^2 - r_2^2}{2sr_1} - \sqrt{\left(\frac{s^2 + r_1^2 - r_2^2}{2sr_1}\right)^2 - 1}, \quad (\text{V}, 35)$$

где s — расстояние между центрами проводов;

r_1, r_2 — радиусы проводов.

Для плотности тока во втором проводе будет справедливо то же уравнение (V, 34), если величины со знаком 1 заменить величинами со знаком 2. Если требуется точность расчета, большая чем 10%, то должны быть соблюдены условия:

$$\begin{aligned} \frac{\mu_1 \delta_1}{r_{\min}} &\leq 0,2; \quad \frac{\mu_2 \delta_2}{r_{\min}} \leq 0,2; \\ \frac{2r_1}{s} &\leq 0,5; \quad \frac{2r_2}{s} \leq 0,5. \end{aligned} \quad (\text{V}, 36)$$

При больших значениях, чем это дано неравенствами (V, 36), необходимо вводить поправочный фактор (см. упомянутый ранее отчет Г. А. Разоренова. О распределении тока в параллельных проводах круглого сечения при эффекте близости).

Максимальное значение плотности тока, имеющееся в точке M , где $\beta=0$, выражается уравнением

$$j_{1\text{max}} = j_{1\text{cp}} \cdot \frac{1 - b_1^2}{(1 - b_1)^2}. \quad (\text{V}, 37)$$

От случая двух проводов, имеющих различное сечение, перейдем к рассмотрению явления близости в проводе, расположенном параллельно проводящей плоской поверхности.

Распределение плотности тока в проводе, расположенном над проводящей пластиной. К этому случаю, имеющему большое практическое значение при закалке плоских предметов, можно перейти от случая двух проводов различного радиуса, приняв в уравнении (V, 35) $r_1 = \text{const}$ и $r_2 = \infty$.

Остановимся сперва на распределении плотности тока в расположенном таким образом проводе, а затем и в самой пластине.

Распределение плотности тока в проводе. Здесь можно использовать формулы предыдущего параграфа, которые остаются без изменения, если учесть, что радиус r_2 входит в формулы (V, 34) посред-

ством величин b_1 и b_2 . Поэтому при $r_2 = \infty$ для величин b_1 и b_2 надо принять значения

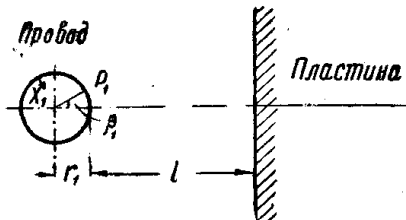
$$\left. \begin{aligned} b_1 &= 1 + \varepsilon - \sqrt{\varepsilon(\varepsilon + 2)}, \\ b_2 &= 1, \end{aligned} \right\} \quad (\text{V}, 38)$$

где $\varepsilon = \frac{l}{r}$ (согласно фиг. 60).

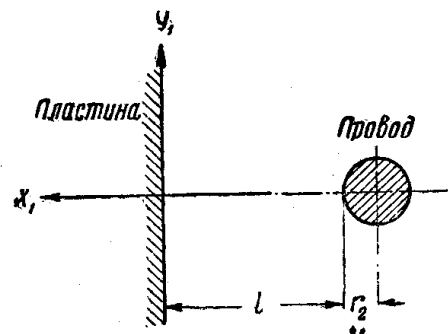
Условия (V, 36) при $r_2 \rightarrow \infty$ принимают такой вид:

$$\frac{\mu_1 \delta_1}{r_1} \ll 1; \quad \frac{\mu_2 \delta_2}{r_1} \ll 1. \quad (\text{V}, 39)$$

Распределение плотности тока в пластине. В этом случае $r_1 \rightarrow \infty$ и нельзя задаваться, как это делали ранее, распределением плотности тока на поверхности в функции угла β , а надо ввести новую координату Y , расположение которой относительно рассматриваемой поверхности показано на фиг. 61.



Фиг. 60. Обозначения к случаю распределения плотности тока в проводе.



Фиг. 61. Обозначения к случаю распределения плотности тока в пластине.

Для плотности тока в пластине в зависимости от расстояния от поверхности x при $r_1 \rightarrow \infty$ формула (V, 19) дает

$$j_1 = j_{m1} e^{-\frac{x_1}{\delta_1}} \cos \left(\omega t - \frac{x_1}{\delta_1} + \frac{\pi}{4} \right). \quad (\text{V}, 40)$$

Распределение амплитуды плотности тока по поверхности в зависимости от координаты Y (фиг. 61) может быть представлено в следующем виде:

$$j_{m1} = (-j_{2\text{cp}}) \frac{\delta_2}{\delta_1} \frac{2 \sqrt{\varepsilon(\varepsilon + 2)}}{\left(\frac{Y}{r_2} \right)^2 + \varepsilon(\varepsilon + 2)}, \quad (\text{V}, 41)$$

где $\varepsilon = \frac{l}{r_2}$ — отношение просвета между проводом и пластиной к радиусу провода;

$j_{2\text{cp}} = \frac{I_2}{\sqrt{2} \pi \delta_2 r_2}$ — среднее значение плотности тока на поверхности провода (знак минус перед $j_{2\text{cp}}$ соответствует противоположному направлению токов в проводе и на поверхности).

В формуле (V, 41) видно, что при больших расстояниях $l = r_2 \varepsilon$ провод возможно рассматривать как линейный, полагая $r_2 = 0$. При этом, если $r_2 \ll 0,1 l$ или $\varepsilon \gg 10$, то точность будет не ниже 10%.

Приведенные выше формулы являются приближенными. Более точные формулы из цитированной выше работы Г. А. Разоренова здесь не приводим, так как в данном случае наша задача сводится не к

точным вычислениям, а к получению некоторых руководящих указаний, исходящих из общей картины распределения плотности тока в пластине при токах противоположного направления, если их распределение зависит лишь от явления близости.

Для максимального значения плотности тока в пластине для точки $Y_1=0$ получим

$$J_{1 \max} = (-j_2 \text{ ср}) \frac{\delta_2}{\delta_1} \frac{2}{V_{\epsilon(\epsilon+2)}}. \quad (\text{V}, 42)$$

Во всех приведенных выше формулах $j_2 \text{ ср}$ представляет объемную плотность тока.

Если плотность тока в зависимости от расстояния от поверхности x убывает согласно уравнению (V, 19)

$$j = j_m e^{-\frac{x}{\delta}} \cos \left(\omega t - \frac{x}{\delta} + \frac{\pi}{4} \right),$$

то для перехода к поверхностной плотности J_m можно пользоваться формулой

$$J_m = j_m \frac{\delta}{V_2}. \quad (\text{V}, 43)$$

8. Кольцевой эффект. Распределение плотности переменного тока в кольце и спирали

Этот случай представляет едва ли не больший практический интерес, чем явление близости, ввиду очень ярко выраженной неравномерности в плотности переменного тока, возникающей в проводе, если его свернуть в кольцо или спираль. Явление наблюдается не только в кольцах малого радиуса по сравнению с радиусом провода, но и тогда, когда радиус R_0 (фиг. 62) велик сравнительно с радиусом r_0 ,

т. е. при малых значениях $a = \frac{r_0}{R_0}$. Так как в закалочных устройствах индукторы всегда можно рассматривать как кольца, спирали или петли, то данное явление приходится учитывать. В случае индукторов для цилиндрических тел наличие кольца с током явно видно, но оно имеется и при закалке плоских предметов. В последнем случае часть кольца образована активным проводом, лежащим вблизи нагреваемой поверхности, а другая часть — пассивным обратным проводом, весьма слабо связанным с нагреваемой поверхностью (см. фиг. 4). Однако вследствие кольцевого эффекта влияние этого провода приходится принимать во внимание не только с точки зрения его связи с закаливаемым предметом, что учитывается уравнением (I, 5), но и с точки зрения кольцевого эффекта, влияющего на распределение тока и в нем самом, и в рабочем проводе. Необходимо прибавить, что наличие железных цепей и экрана у рабочего провода изменяет характер явления. Здесь мы рассмотрим пока случай, отвечающий отсутствию железных магнитопроводов на активной части кольца.

Кольцо с проводом круглого сечения. Распределение плотности тока по глубине в зависимости от расстояния x от поверхности здесь, как и во всех предыдущих случаях, определяется для всех точек окружности провода уравнением (V, 14), дающим это распределение в зависимости от наибольшей плотности на поверхности провода при $x=0$.

Свертывание провода в кольцо увеличивает напряженность намагничивания внутри кольца и на частях провода, прилегающих ближе к центру кольца. Это обуславливает увеличение плотности тока на внутренних частях провода.

Зависимость амплитуды плотности тока на поверхности для различных частей окружности провода можно выразить в функции угла β (фиг. 62), как это делали раньше при рассмотрении явлений близости.

Для амплитуды плотности тока j_m можно воспользоваться формулой, выведенной акад. В. А. Фоком¹:

$$j_m = j_{cp} \frac{1 - A \left(1 - \frac{1 - \alpha^2}{1 - \alpha \cos \beta} \right)}{1 - A (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})}. \quad (V, 44)$$

где j_{cp} — среднее значение амплитуды плотности тока, как и при прямом проводе [уравнение (V, 16)], равно

$$j_{cp} = \frac{I_m}{\sqrt{2\pi\delta r_0}};$$

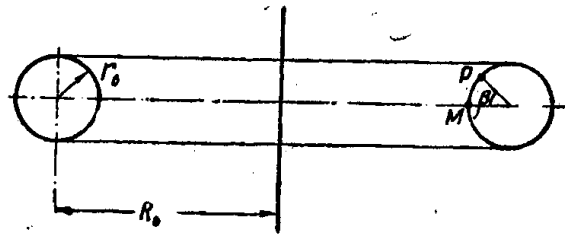
$\alpha = \frac{r_0}{R_0}$ и A — коэффициент, зависящий от α :

$$A = \ln 4 - \frac{1}{2} + \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha^2}}{\alpha} = 0,88629 + \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha^2}}{\alpha}. \quad (V, 45)$$

Выражение (V, 44) для j_m дает хорошее приближение при $\alpha < 0,1$, т. е. при кольцах большого диаметра и тонком проводе. Оно может быть здесь заменено приближенной формулой

$$j_m = j_{cp} (1 + A\alpha \cos \beta), \quad (V, 46)$$

где $A = 1,57944 + \ln \frac{1}{\alpha}$. (V, 47)



Фиг. 62. Обозначения к кольцевому эффекту.

Для максимальной плотности тока в точке M (фиг. 62), для которой $\beta = 0$, имеем

$$j_{max} = j_{cp} \frac{1 + A\alpha}{1 - A (1 - \sqrt{1 - \alpha^2})} \approx j_{cp} (1 + A\alpha). \quad (V, 48)$$

9. Выражения упрощенного вида для поверхностных явлений, могущие служить при решении вопросов поверхностной закалки

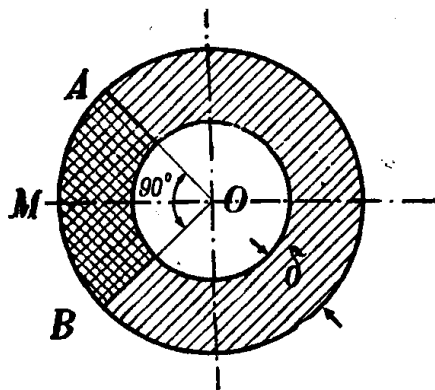
Использование приведенных выше формул, дающих распределение плотности тока при поверхностных явлениях, позволяет получать ясное представление в ряде случаев работы индуктора и других высокочастотных устройств. Однако часто достаточно бывает получить ответ на вопрос, где в основном концентрируется ток в проводе при поверхностных явлениях, без того чтобы иметь данные о детальном его распределении.

Такое упрощенное решение задачи имеет то преимущество, что позволяет все решение вести также более упрощенным способом с точностью, достаточной для практики.

При поверхностном эффекте одиночного провода уже давно предложено заменять действительное распределение тока по уравнению (V, 14) равномерным распределением плотности тока в слое глубиной δ (см. фиг. 54).

¹ В. А. Фок, Скин-эффект в кольце круглого сечения, Ж. Р. Ф. Х. О., часть физическая, LXII, вып. 3, 1930, стр. 281. Формула приведена к более простому виду Г. А. Разореновым.

Для явления близости и кольцевого эффекта можно предложить подобного же рода упрощение, состоящее в том, что действительное распределение тока в проводах, даваемое уравнениями (V, 28) и (V, 44), заменяется равномерным распределением в слое глубиной δ , причем плотности тока на участках, заштрихованных на фиг. 63 в клетку и в полоску, принимаются различными.



Фиг. 63. Упрощенное распределение плотности тока при кольцевом эффекте.

На участке, прилегающем к поверхности сектора AOB (штриховка в клетку), плотность тока принимается большей, нежели в остальной части провода (штриховка в полоску). Максимальная плотность тока соответствует точке M , лежащей на середине дуги AMB . Угол AOB прямой.

Отношение полного тока, протекающего через сектор AOB , к полному току, протекающему через все сечение провода, обозначается как «коэффициент концентрации»:

$$\zeta = \frac{\text{ток, протекающий равномерно по сектору } AOB}{\text{полный ток, протекающий через все круговое сечение провода}}$$

Значения этого коэффициента вычислил для разных случаев Г. А. Разоренов, исходя из формул предыдущих разделов.

Нетрудно видеть, что наибольшее численное значение для коэффициента будет $\zeta = 1$ — при сосредоточии всего тока в секторе AOB и наименьшее 0,25 — при распределении тока по всему круговому сечению равномерно в случае отсутствия несимметрии, вызванной явлением близости.

Выражение для коэффициента концентрации тока ζ при эффекте близости. Если принять, как и ранее, $\alpha = \frac{r_0}{R_0}$ (фиг. 58), то для малых значений $\alpha < 0,1$ точно и для значений до $\alpha < 0,4$ — ориентировочно можно принять

$$\zeta = \frac{2}{\pi} \arctg \left(0,41421 \sqrt{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \right). \quad (V, 49)$$

Для $\alpha < 0,1$ можно пользоваться приближенной формулой

$$\zeta = 0,25(1 + 0,49\alpha). \quad (V, 50)$$

Иногда удобнее выразить величину ζ через ϵ , где ϵ — отношение

$$\epsilon = \frac{\text{просвет между проводами}}{\text{диаметр провода}}.$$

В этом случае

$$\alpha = \frac{1}{1 + \epsilon}$$

и

$$\epsilon = \frac{1 - \alpha}{\alpha}. \quad (V, 51)$$

На фиг. 64 показаны значения коэффициента концентрации тока ζ и значения максимальной плотности тока $j_{\max}$, подсчитанные по приведенным уравнениям (V, 49), а также по приведенному ниже уравнению (V, 52).

По этим кривым видно, что явление близости, как это и следует из названия, сказывается более или менее резко при малых расстояниях между проводами, например, при $\alpha=0,9$. Это особенно хорошо видно на кривой $\frac{j_{\max}}{j_{\text{ср}}}$. Величина же ζ получает ход, резко отличный от прямолинейного, при $\alpha \approx 0,5-0,6$.

Выражение для коэффициента концентрации тока ζ_1 при кольцевом эффекте. Подобно предыдущему случаю имеем

$$\zeta_1 = 0,25 \frac{1 - A \left[1 - \sqrt{1 - \alpha^2} \cdot \frac{8}{\pi} \arctg \left(0,41421 \sqrt{\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}} \right) \right]}{1 - A(1 - \sqrt{1 - \alpha^2})}, \quad (\text{V}, 52)$$

где A дано уравнением (V, 45), или, упрощенно, если для A принять значение из уравнения (V, 47), то

$$\zeta_1 = 0,25(1 + 0,48\alpha). \quad (\text{V}, 53)$$

На фиг. 64 нанесены для сравнения также и кривые изменения ζ_1 и $\frac{j_{\max}}{j_{\text{ср}}}$ для кольцевого эффекта.

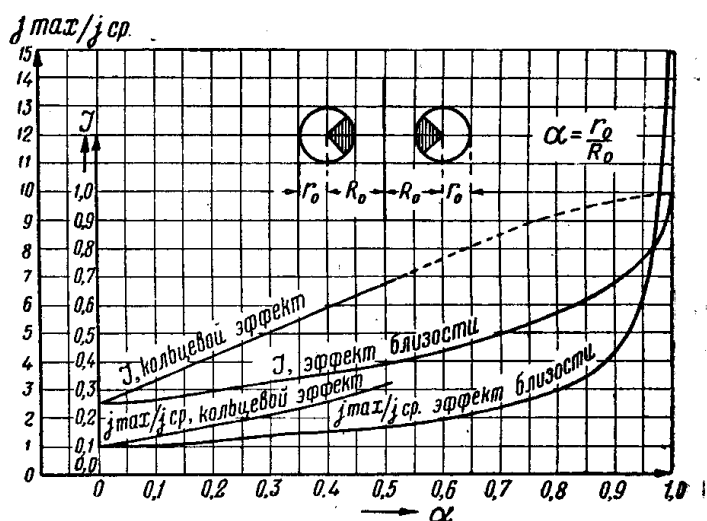
Сравнивая обе группы кривых этого графика, можно видеть, что при кольцевом эффекте коэффициент концентрации, за исключением обоих общих предельных значений, имеет большее значение. Отсюда следует, что кольцевой эффект играет большую роль в смысле неравномерного распределения тока по проводу. То же самое можно сказать про отношение $\frac{j_{\max}}{j_{\text{ср}}}$.

Явление близости. Два провода различных радиусов r_1 и r_2 . В этом случае нас будет интересовать коэффициент концентрации тока ζ , а также отношение

$$\frac{j_{\max}}{j_{\text{ср}}} = \frac{J_{\max}}{J_{\text{ср}}} = \frac{\text{поверхностная плотность тока}}{\text{среднее значение амплитуды плотности тока}}.$$

Для упрощения задачи предположим, что в случае проводов с магнитной проницаемостью μ_1 и $\mu_2 > 1$ величины μ_1 и μ_2 не зависят от напряженности поля. Хотя это предположение далеко не всегда отвечает действительным условиям, однако принимаем его, чтобы не встречаться с теми затруднениями, которые влечет за собой принятие для μ_1 и μ_2 значений, зависящих от напряженности поля. Поэтому приведенные ниже данные можно принимать, как дающие лишь некоторую ориентировку в этом вопросе, а не как исходные значения для точного расчета.

Говоря о магнитной проницаемости, уместно также заметить, что увеличение магнитной проницаемости того и другого провода сглажи-



Фиг. 64. Значения коэффициента концентрации тока ζ и значение максимальной плотности его $j_{\max}$ при кольцевом эффекте и эффекте близости.

вает неравномерность в плотности тока, вызываемую явлением близости, уменьшая этот эффект, который в полной мере сказывается при $\mu=1$, или вообще при небольших значениях μ .

В действительных условиях, особенно при низких частотах, работают при высоких насыщениях железа, имея для μ значения, близкие к $\mu=1$. Поэтому явление близости, несмотря на сказанное, играет известную роль.

Предположение для $\mu \approx 1$ принимаем также и при рассмотрении других вопросов, например, при определении глубины активного слоя ξ , при выборе частоты f и зависимости к. п. д. от радиуса [уравнение (II, 2)], где это предположение вполне оправдало себя практикой. Следовательно, его можно взять и в рассматриваемом случае явления близости.

Для коэффициента концентрации тока в случае двух проводов различных радиусов r_1 и r_2 имеем

$$\zeta = \frac{2}{\pi} \arctg \left(0,41421 \frac{1+b_1}{1-b_1} \right), \quad (V, 54)$$

где по уравнению (V, 35)

$$b_1 = \frac{s^2 + r_1^2 - r_2^2}{2sr_1} - \sqrt{\left(\frac{s^2 + r_1^2 - r_2^2}{2sr_1} \right)^2 - 1};$$

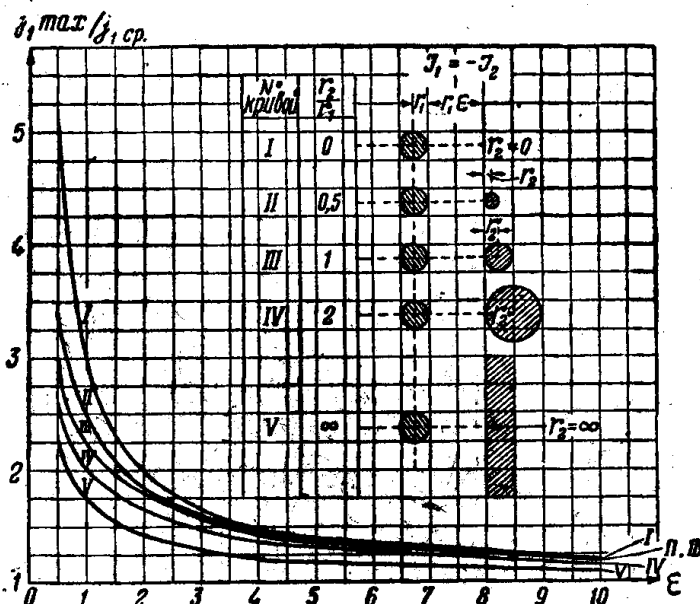
s — расстояние между осями проводов.

При $\varepsilon=0,5$ и $r_2=0$ (линейный провод) $\zeta=0,72$.

При $\varepsilon=0,5$ и $r_2=\infty$ (плоская пластина) $\zeta=0,47$.

Это показывает, что радиус r_2 второго провода влияет сравнительно мало.

Для отношения $\frac{j_{\max}}{j_{\text{ср}}}$ при проводах различного радиуса имеем зависимость от просвета ε , показанную на фиг. 65.



Фиг. 65. Значения отношения $\frac{j_{\max}}{j_{\text{ср}}}$ в зависимости от просвета ε .

Отношение поверхностной плотности в плоской пластине к средней поверхностной плотности в проводе. Если ток в проводе и пластине имеет одну и ту же силу, но противоположное направление, т. е.

$$I_1 = -I_2,$$

то для отношения $\frac{J_{\max}}{J_{\text{ср}}}$ можно взять выражение

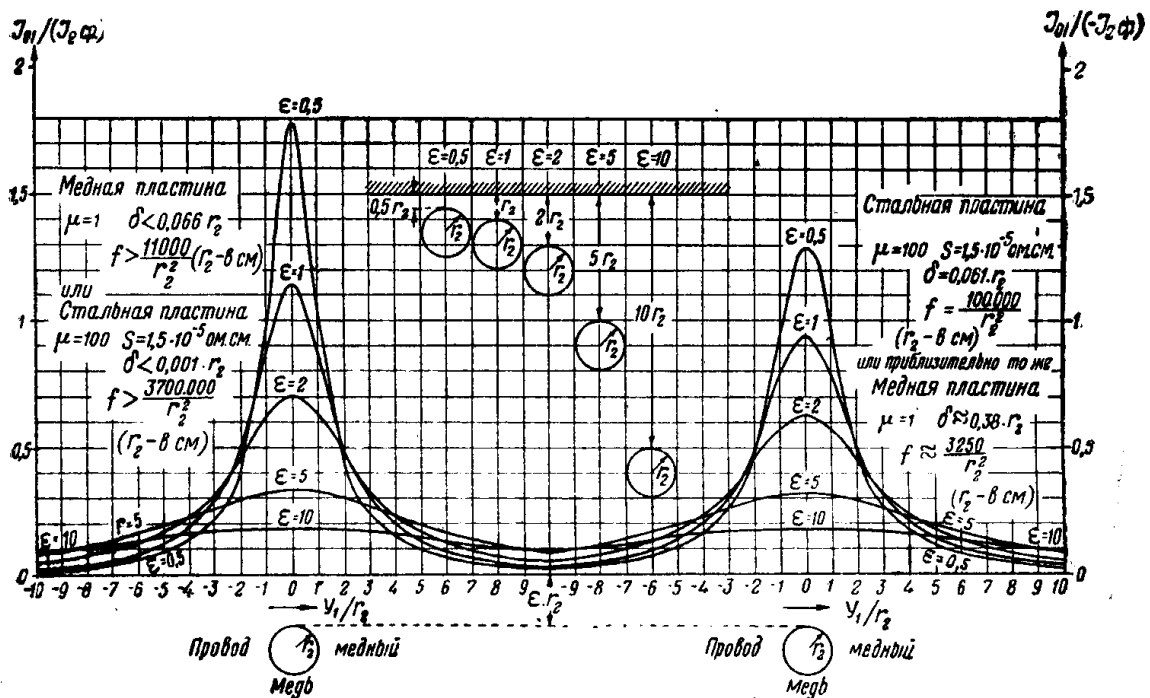
$$J_{m1} = (-J_{2\text{ср}}) \frac{2 \sqrt{\epsilon(\epsilon+2)}}{\epsilon(\epsilon+2) + \left(\frac{Y_1}{r_2}\right)^2} (1 - B_1), \quad (\text{V}, 55)$$

где

$$B_1 = D_1 \frac{H_1 \delta_1 + c_1 \mu_2 \delta_2}{r_2}. \quad (\text{V}, 56)$$

Значения C_1 и D_1 не приводим, так как B_1 можно положить равным нулю при $\epsilon \geq 0,5$ и если

$$\frac{\mu_1 \delta_1 + 0,67 \mu_2 \delta_2}{r_2} \leq 0,11. \quad (\text{V}, 57)$$



Фиг. 66. Значения $\frac{J_{01}}{J_{2\text{ср}}}$ для медной и стальной пластин.

На фиг. 66 приведен график, дающий величину отношения,

$$\frac{J_{0,1}}{J_{2\text{ср}}} = \frac{\text{поверхностная плотность в плоской пластине}}{\text{средняя поверхностная плотность в проводе}}$$

как для медной, так и для стальной пластин, для различного расстояния провода от пластины при соблюдении условия (V, 57).

По уравнениям (V, 55) и (V, 56), а также по кривым, приведенным на фиг. 66, видно следующее:

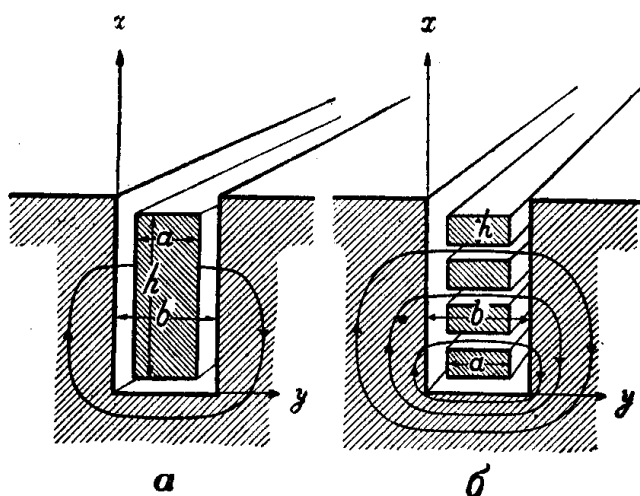
1) значительная величина магнитной проницаемости ослабляет эффект близости (правые кривые); 2) при значительной магнитной проницаемости (например при $\mu_2=100$) возможно получить отношение, данное кривыми фиг. 66 (правые кривые), лишь при достаточно большой частоте $f = \frac{100000}{r_2^2}$. При меньших же частотах явления эффекта близости в значительной степени уменьшаются.

10. Распределение тока в проводе, окруженном с трех сторон расслоенным железом.

Критическая высота провода, помещенного в расслоенное железо

Во многих случаях, относящихся к закалке индукционным методом, провод, несущий переменный ток, окружается, как это было предложено автором, расслоенным железом¹. При этом распределение тока в проводе резко меняется, в результате чего активное сопротивление провода увеличивается, индуктивное же уменьшается по сравнению с сопротивлением провода, который не окружен железом.

Однако, помимо нежелательного увеличения активного сопротивления, окружение провода расслоенным железом в закалочных устройствах создает ряд положительных свойств, которые могут улучшить действие закалочных устройств. Поэтому здесь будут приведены данные, относя-



Фиг. 67. Провод, окруженный с трех сторон расслоенной магнитной цепью: а—один провод в пазу; б— m проводов в пазу.

щиеся к поверхностному эффекту для этого случая. Расположение провода и самое явление здесь совершенно тождественны с хорошо известным в электротехнике расположением провода в пазу машины, почему для распределения поля и плотности тока можно воспользоваться выводом, данным Фильдом². Приведенные ниже формулы для джоулевых потерь и коэффициента сопротивления применимы поэтому не только к проводам, заложенным в пазы электрических машин, но и в окно магнитной цепи индуктора или трансформатора, а также к цилиндри-

ческим катушкам в воздухе и вообще во всех случаях, где с достаточной для практики точностью можно полагать, что линии магнитного поля проходят параллельно стороне a прямоугольного сечения проводника и пересекают его перпендикулярно стороне h . Коэффициент увеличения активного сопротивления такого провода носит название *коэффициента Фильда*. На фиг. 67 показано расположение провода относительно железной расслоенной цепи и даны обозначения, которыми и будем пользоваться. Для общности здесь дан не один провод, а m слоев проводов, хотя в большинстве случаев нас будет интересовать один провод в пазу, как это показано на фиг. 67, а.

Плотность тока

Для распределения плотности тока в однослойной катушке в зависимости от расстояния x от нижней кромки сечения можно в окончательном виде написать (см. Роговский, Arch. f. El., 1913, Bd. II, S. 89):

$$j_m = j_{cp} \sqrt{2\alpha_0 h} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\alpha_0 x + \cos 2\alpha_0 x}{\operatorname{ch} 2\alpha_0 x - \cos 2\alpha_0 x}}, \quad (\text{V}, 58)$$

¹ Авторские заявки: В. П. Вологдин, № 182419; В. П. Вологдин и А. А. Фогель, № 56585 и 8896.

² А. Френкель, Теория переменных токов, ОНТИ, 1933, стр. 211.

где j_m — амплитуда плотности тока на высоте x ;

j_{cp} — амплитуда средней по всему сечению плотности тока

$$j_{cp} = \frac{I_m}{ah}; \quad (V, 59)$$

$$\alpha_0 = 2\pi \sqrt{\frac{a}{b} \frac{f\mu}{\rho} 10^{-9}}, \quad (V, 60)$$

где в свою очередь I_m — амплитуда силы тока в проводе;

a и h — ширина и высота сечения провода;

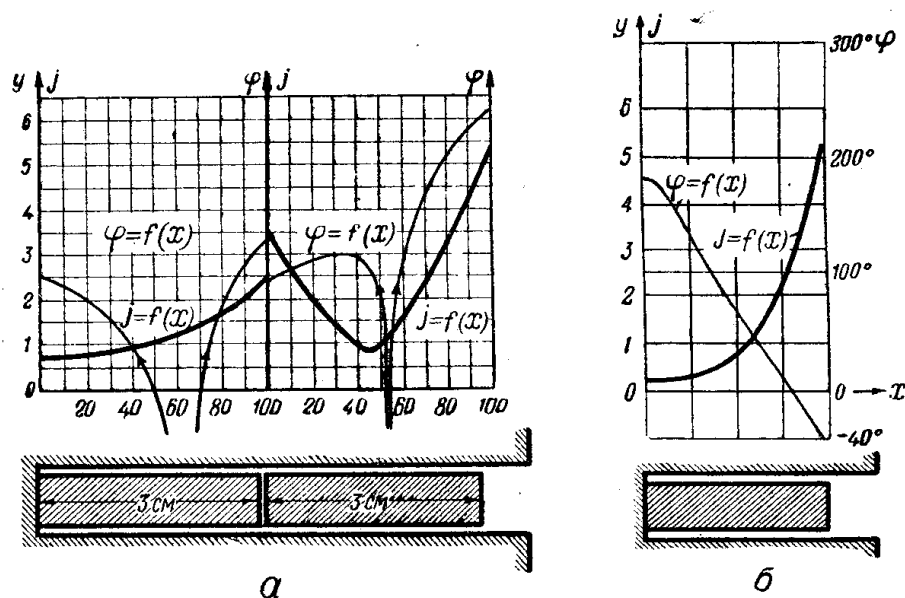
b — ширина паза;

f — частота, гц;

ρ — удельное сопротивление материала провода, ом·см;

μ — магнитная проницаемость материала провода.

На фиг. 68 показано распределение плотности тока для слоев, причем на фиг. 68, б — для одного слоя. Плотность тока сосредоточивается у верхней кромки провода.



Фиг. 68. Распределение амплитуды плотности тока в проводе, окруженном расслоенной магнитной цепью. Толстой линией обозначена плотность тока, а тонкой — фаза.

а — два провода, $f = 25$, $h = 3,5$, мм; б — один провод, $f = 50$, $h = 4$ мм.

Обозначим

$$\xi = \alpha_0 h = 2\pi h \sqrt{\frac{\mu f}{\rho 10^9} \frac{a}{b}} = \frac{h}{\delta} \sqrt{\frac{a}{b}}, \quad (V, 61)$$

где ξ — безразмерная величина, равная отношению высоты проводника (с учетом заполнения) к эквивалентной глубине проникновения.

* Для медных проводов при 50 гц $\alpha_0 = 1$ см⁻¹; при 2000 гц $\alpha_0 = 0,16$ см⁻¹; при 5000 гц $\alpha_0 = 0,1$ см⁻¹ и т. д.

При больших частотах и размерах проводника $\xi > 2$ $\text{ch } \xi \gg \cos \xi$, $\text{ch } \xi = \frac{1}{2} e^{\xi}$ и для плотности тока на верхней кромке провода ($x = h$) получим

$$j_m = j_{\text{ср}} \sqrt{2} \xi. \quad (\text{V}, 62)$$

На самой верхней кромке плотность тока в $\sqrt{2} \xi$ раз больше средней по сечению плотности тока.

Плотность тока на нижней кромке провода ($x=0$) будет

$$j_m \approx 2 \sqrt{2} \xi e^{-\xi}, \quad (\text{V}, 63)$$

т. е. весьма мала, и при значительной частоте и высоте провода ($\xi > 2$) можно с достаточным для практики приближением считать, что почти весь ток стянут к верхней кромке провода, а вся остальная высота провода свободна от тока.

Коэффициенты увеличения активного сопротивления проводов в пазу

Неравномерное распределение плотности тока по сечению провода вызывает увеличение джоулевых потерь сравнительно с потерями, которые имеются при постоянном токе. При многослойном расположении проводов в пазу потери в слое с порядковым номером p (счет номеров снизу) по вычислениям Эмде составляют

$$Q_p = R_0 [I_p^2 \varphi(\xi) + I_n^2 \psi(\xi) + I_p I_n \cos \gamma \psi(\xi)], \quad (\text{V}, 64)$$

где R_0 — сопротивление постоянному току;

I_p — эффективная сила тока, рассматриваемого (p -го) слоя;

I_n — общий ток всех ниже лежащих слоев;

γ — фазовый угол между токами I_p и I_n ;

ξ — имеет прежнее значение

$$\xi = \alpha_0 h = 2\pi h \sqrt{\frac{a\mu f}{b\rho 10^9}}. \quad (\text{V}, 65)$$

Функция

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\text{sh } 2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi},$$

а

$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{\text{sh } \xi - \sin \xi}{\text{ch } \xi + \cos \xi}. \quad (\text{V}, 66)$$

Значения функций φ и ψ представлены на фиг. 69.

При малых значениях аргумента ($\xi \leq 0,7$) можно приближенно полагать

$$\begin{aligned} \varphi(\xi) &\approx 1 + \frac{4}{45} \xi^4 = 1 + \frac{64}{45} (\pi h)^4 \left(\frac{a}{b} \frac{\mu f}{\rho} \right)^2 10^{-18} = \\ &= 1,385 + \left(h^2 \frac{a}{b} \cdot \frac{\mu f}{\rho} \right)^2 10^{-16} \end{aligned} \quad (\text{V}, 67)$$

и

$$\psi(\xi) \approx \frac{1}{3} \xi^4 = \frac{16}{3} (\pi h)^4 \left(\frac{a}{b} \frac{\mu f}{\rho} \right)^2 10^{-18} = 5,195 \left(h^2 \frac{a}{b} \frac{\mu f}{\rho} \right)^2 10^{-16}. \quad (\text{V}, 68)$$

При высоких частотах, т. е. при больших значениях аргумента ($\xi > 2$), получим

$$\varphi(\xi) \approx \xi; \quad \psi(\xi) \approx 2\xi. \quad (\text{V}, 69)$$

Строение формулы (V, 64) показывает, что потеря в p -м слое состоит из трех слагаемых. Первое слагаемое $I_p^2 R_0 \varphi(\xi)$ представляет джоулевы потери при отсутствии ниже лежащих слоев ($I_n = 0$). Коэффициент увеличения потерь в этом случае

$$k_R = \frac{R_a}{R_0} = \varphi(\xi), \quad (V, 70)$$

где R_a — активное сопротивление переменному току;

R_0 — сопротивление постоянному току.

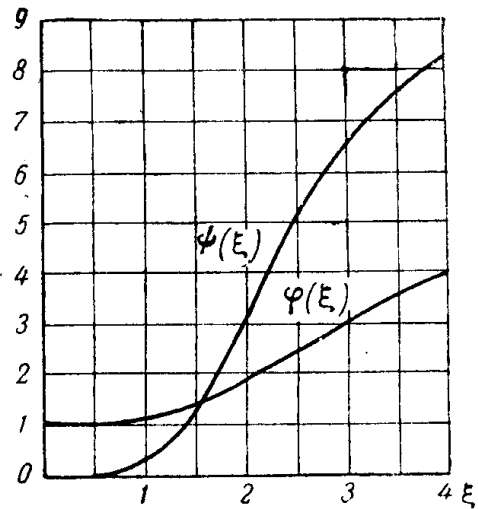
Этот коэффициент зависит от вытеснения тока полем, созданным самим током рассматриваемого слоя.

Второе слагаемое $I_n^2 R_0 \psi(\xi)$ представляет потерю, возникающую в рассматриваемом слое от токов, индуцируемых токами I_n ниже лежащих слоев (при $I_p = 0$).

Третье слагаемое $I_p I_n R_0 \cos \gamma \psi(\xi)$ — эффект взаимодействия токов I_p и I_n и не равно нулю лишь тогда, когда ток протекает и в рассматриваемом (p -м) слое под ним.

Отсюда общее выражение для коэффициента сопротивления p -го слоя

$$k_R = \frac{R_a}{R_0} = \varphi(\xi) + \frac{I_n (I_n + I_p \cos \gamma)}{I_p^2} \psi(\xi). \quad (V, 71)$$



Фиг. 69. Значения функций $\psi(\xi)$ и $\varphi(\xi)$.

Частные случаи

Для однослойного расположения, как было указано уравнением (V, 70), $I_n = 0$; тогда

$$k_R = \varphi(\xi).$$

Если токи всех слоев одинаковы по величине и совпадают по фазе (последовательное соединение), то для p -го слоя имеем

$$k_{Rp} = \varphi(\xi) + p(p-1)\psi(\xi). \quad (V, 72)$$

В случае высоких частот ($\xi > 2$) получим

$$k_{Rp} = \xi + 2p(p-1)\xi = \xi(2p^2 - 2p + 1). \quad (V, 73)$$

Отсюда следует, что коэффициент увеличения сопротивления будет:

- для первого слоя $k_R = \xi$,
- для второго слоя $k_R = 5\xi$,
- для третьего слоя $k_R = 13\xi$

Из этого вытекает, что при высоких частотах и больших размерах проводов не следует прибегать к многослойному расположению проводов в пазу, так как потери во втором слое будут в 5 раз, а в третьем даже в 13 раз больше, чем в первом, что, конечно, недопустимо. Это относится и к обмоткам трансформаторов и к индукторам. Поэтому их также почти никогда не делают многослойными.

Обозначая через m общее число слоев, получим для среднего значения коэффициента сопротивления по всей обмотке

$$k_R = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3} \psi(\xi). \quad (V, 74)$$

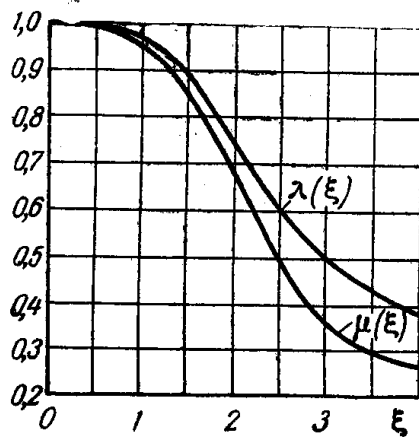
При малых значениях аргумента ($\xi < 0,75$) будет

$$k_R = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} \xi, \quad (V, 75)$$

а при больших значениях аргумента ($\xi > 2$)

$$k_R = \frac{2m^2 + 1}{3} \xi. \quad (V, 76)$$

Кроме увеличения активного сопротивления, вытеснение тока к верхней кромке проводника влечет за собой уменьшение реактивного сопротивления. Аналогично коэффициенту увеличения активного сопротивления k_R можно написать коэффициент изменения реактивного сопротивления k_x , представляющий отношение индуктивности при данной частоте к индуктивности при равномерной плотности тока в проводах. Среднее значение k_x для всех m слоев обмотки (при условии, что токи во всех слоях одинаковы по величине и совпадают по фазе) будет такое:



$$k_x = \frac{1}{m^2} \lambda(\xi) + \frac{m^2 - 1}{m^2} \mu(\xi). \quad (V, 77)$$

Фиг. 70. Значения функций $\lambda(\xi)$ и $\mu(\xi)$.

Для однослойного расположения

$$k_x = \lambda(\xi). \quad (V, 78)$$

Здесь $\xi = \frac{h}{\delta}$ имеет прежнее значение, а функции

$$\lambda(\xi) = \frac{3}{2\xi} \frac{\text{sh } 2\xi - \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi}; \quad (V, 79)$$

$$\mu(\xi) = \frac{1}{\xi} \frac{\text{sh } \xi + \sin \xi}{\text{ch } \xi + \cos \xi}. \quad (V, 80)$$

Значения этих функций показаны на фиг. 70.

При больших значениях аргумента ($\xi > 2$)

$$\left. \begin{aligned} \lambda(\xi) &\approx \frac{3}{2\xi}, \\ \mu(\xi) &\approx \frac{1}{\xi}. \end{aligned} \right\} \quad (V, 81)$$

Критическая высота провода

В случае окружения провода с трех сторон расслоенной магнитной цепью увеличение его сечения посредством увеличения высоты h уменьшает его активное сопротивление лишь до достижения высотой h некоторого критического значения $h = h_k$, после чего, несмотря на общее увеличение сечения провода, его активное сопротивление не только не

уменьшается, но начинает увеличиваться, хотя и незначительно, и при дальнейшем росте h стремится к постоянному предельному значению, не зависящему от h .

Величина критической высоты провода может быть определена из выражения для активного сопротивления на единицу длины.

Для постоянного тока имеем

$$R_0 = \frac{\rho}{ha} = \frac{\rho a_0}{a_0 ha} = \frac{\rho a_0}{a} \frac{1}{\xi} = c \frac{1}{\xi}. \quad (V, 82)$$

Активное сопротивление переменному току при одном слое в пазу

$$R_a = k_R R_0 = \frac{\rho a}{a_0} \frac{\varphi(\xi)}{\xi} = c \frac{\varphi(\xi)}{\xi}, \quad (V, 83)$$

где c — постоянная величина.

На фиг. 71 изображены функции $\frac{1}{\xi}$ (пунктиром) и $\frac{\varphi(\xi)}{\xi}$ (сплошной линией). Первая изображает изменение сопротивления постоянному току, а вторая — переменному в зависимости от высоты провода ($\xi = \frac{h}{\delta}$). При малых значениях аргумента обе кривые практически совпадают, т. е. активное сопротивление почти не отличается от сопротивления постоянному току; затем кривые расходятся и $\frac{\varphi(\xi)}{\xi}$ идет выше $\frac{1}{\xi}$, т. е. активное сопротивление становится больше, чем сопротивление постоянному току.

Функция $\frac{\varphi(\xi)}{\xi}$ имеет минимум при

$$\xi = \xi_k = 1,5. \quad (V, 84)$$

Поэтому критическая высота проводника при однослойном расположении

$$h_k = \delta \xi_k = 1,5\delta. \quad (V, 85)$$

Коэффициент сопротивления для провода критической высоты

$$k_{Rk} = \varphi(1,5) = 1,378 \quad (V, 86)$$

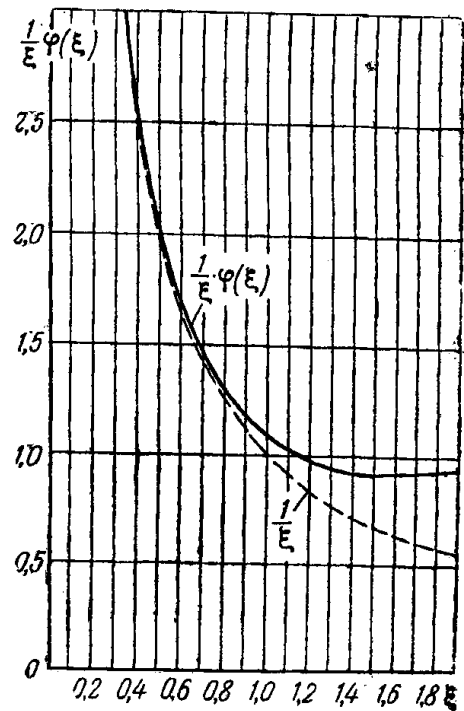
и минимальное значение функции

$$\frac{\varphi(\xi)}{\xi} = 0,9632.$$

При дальнейшем росте ξ $\frac{\varphi(\xi)}{\xi}$ снова возрастает и стремится к пределу 1, соответствующему приближенной формуле $\varphi(\xi) = \xi$ для больших значений аргумента. В пределе активное сопротивление

$$R_a = \frac{\rho}{ha} \xi = \frac{\rho}{a\delta}, \quad (V, 87)$$

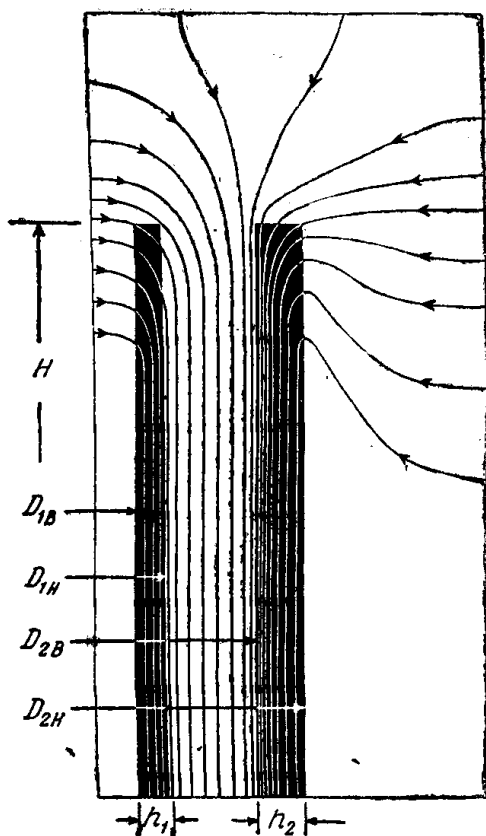
т. е. равно сопротивлению стержня, имеющего высоту, равную глубине проникновения, независимо от действительной высоты провода.



Фиг. 71. Значения функций $\frac{1}{\xi} \varphi(\xi)$ и $\frac{1}{\xi}$.

Увеличение высоты провода выше критической может быть оправдано только соображениями развития поверхности для улучшения отвода развивающейся в проводнике теплоты, но для уменьшения потерь в нем оно бесполезно.

В табл. 8 приведены значения критической высоты.



Фиг. 72. Поле, пересекающее медь в обмотках трансформатора.

$\cos \gamma = -1$. Коэффициент при $\varphi(\xi)$ обращается в этом случае в нуль,

$$k_R = \varphi(\xi).$$

Коэффициенты сопротивления для первичной и вторичной обмоток трансформаторов можно рассматривать отдельно для каждой, если с необходимой степенью точности можно считать, что полные токи, первичный и вторичный, равны и находятся в противофазе.

12. Сравнение влияния, оказываемого поверхностным эффектом, явлением близости, катушечным эффектом и расслоенными магнитными экранами (эффект Фильда), на распределение плотности тока в проводящих телах

Во время работы закалочного устройства чаще всего возникает не одно из упомянутых в п. 3 явлений, а несколько. При этом часть явлений полезно используется для увеличения эффекта нагрева, увеличивая к. п. д., коэффициент мощности, создавая требуемое распределение плотности тока в тех или других частях индуктора и нагреваемого тела. Одновременно с этим те же явления создают и некоторые неудобства, особенно в пассивных частях индуктора, в проводке, в контактах,

Таблица 8

Значения критической высоты для медного провода при полном заполнении паза ($a = b$)
 $\rho = 2 \cdot 10^{-6}$ омсм

Частота гц	Критическая вы- сота h_k , мм
50	15
500	4,75
2000	2,4

11. Применение выведенных формул при расчете трансформаторов

Выведенные выше формулы для провода, находящегося в пазу, можно использовать при определении распределения плотности тока обмоток трансформатора, так как здесь магнитные линии, пересекающие медь, имеют аксиальное направление (фиг. 72).

Первичную и вторичную обмотки трансформатора, помещенные в окна сердечника, можно рассматривать как два слоя, причем $I_p \approx I_n$ и $\gamma = \pi$, т. е.

$\cos \gamma = -1$. Коэффициент при $\varphi(\xi)$ обращается в этом случае в нуль,

$$k_R = \varphi(\xi).$$

Коэффициенты сопротивления для первичной и вторичной обмоток трансформаторов можно рассматривать отдельно для каждой, если с необходимой степенью точности можно считать, что полные токи, первичный и вторичный, равны и находятся в противофазе.

12. Сравнение влияния, оказываемого поверхностным эффектом, явлением близости, катушечным эффектом и расслоенными магнитными экранами (эффект Фильда), на распределение плотности тока в проводящих телах

Во время работы закалочного устройства чаще всего возникает не одно из упомянутых в п. 3 явлений, а несколько. При этом часть явлений полезно используется для увеличения эффекта нагрева, увеличивая к. п. д., коэффициент мощности, создавая требуемое распределение плотности тока в тех или других частях индуктора и нагреваемого тела. Одновременно с этим те же явления создают и некоторые неудобства, особенно в пассивных частях индуктора, в проводке, в контактах,

в проводниках генератора и т. п. Эти неудобства выражаются в увеличении потерь во всех перечисленных частях установки, вследствие создания неравномерной плотности тока по всему сечению, что вызывает местный перегрев.

При одновременном действии некоторых из перечисленных эффектов можно наблюдать случаи, когда их действие складывается, усиливаясь одно другим, создавая благоприятный или неблагоприятный эффект. В других же случаях один эффект ослабляет действие другого, что тоже может быть полезным или вредным.

В качестве примера приведем несколько подобных случаев.

Одновременное действие поверхностного эффекта, явления близости и кольцевого эффекта имеются при нагреве наружной цилиндрической поверхности. Здесь все эти явления складываются, оказывая полезное влияние на процесс передачи энергии в нагреваемую поверхность; поэтому нагрев такого рода поверхностей осуществляется весьма легко и на высоких, и на низких частотах. Окружая провод кольцевого индуктора расслоенным железом, можно полезно применить, кроме того, и расслоенные магнитные экраны, хотя в этом здесь не встречается большой надобности. Поэтому такими экранами пользуются редко.

Противоположным примером, при котором одно явление компенсирует другое, ослабляя его и этим ухудшая тот эффект, который необходимо использовать, может служить работа кольцевого индуктора при нагреве им внутренней цилиндрической поверхности (см. фиг. 129). В этом случае кольцевой эффект ослабляет действие поверхностного эффекта и явления близости в индукторе, уменьшая весьма значительно связь между индуктором и нагреваемой поверхностью тела, так как при этом увеличивается эффективный зазор между ними. Уменьшение связи влечет за собой столь большое падение к.п.д. системы, что часто самая закалка становится невозможной из-за невозможности создать на закаливаемой поверхности требуемую удельную плотность тока. Увеличение же подводимой мощности вызывает столь большие местные плотности тока в проводе индуктора, что он плавится, несмотря на интенсивное охлаждение водой.

Здесь в качестве конкретного случая можно привести закалку отверстий диаметром менее 20 мм при помощи спирального индуктора, которая пока неосуществима из-за описанных явлений.

Если для нагрева внутренних цилиндрических поверхностей применить железные расслоенные магнитные экраны (см. фиг. 131, 132), используя, помимо перечисленных явлений, также и явление Фильда, то нетрудно убедиться, что это явление окажет действие, обратное катушечному эффекту, ослабляя его. В то же время магнитные экраны будут действовать в одном направлении с поверхностным эффектом и явлением близости, которые дают распределение плотности тока, необходимое для успешного нагрева.

В результате при закалке внутренних цилиндрических поверхностей применение магнитных расслоенных экранов сказывается очень сильно. Часто только благодаря им и возможно осуществить закалку, особенно при малых диаметрах, когда действие кольцевого эффекта, как это можно вывести из уравнения (V, 44), весьма велико.

На основе сказанного лабораторией автора были созданы описанные ниже индукторы (см. фиг. 131 и 132).

Одновременное существование нескольких эффектов, создающих вытеснение тока к поверхности проводящего тела, заставляет, помимо направления, в котором действуют все эти явления, также поставить вопрос об их относительной активности. Правда, здесь нельзя разрешить этот вопрос в общем виде, так как все явления зависят от многого,

что связано, помимо электрических параметров, также и с геометрическими формами и размерами.

Однако на практике для большинства случаев по интенсивности воздействия на вытеснение плотности тока перечисленные явления можно расположить в такой последовательности, если переходить от наименее активных явлений к более активным:

- 1) явление близости,
- 2) поверхностный эффект (простой),
- 3) кольцевой эффект,
- 4) вытеснение, оказываемое магнитным экраном (явление Фильда).

Сравнительная интенсивность для первого и третьего явлений была показана на фиг. 64. Что касается явления Фильда, то оно может быть осуществлено в столь интенсивной форме, что легко перекроет все только что перечисленные явления — первое, второе и третье. Последнее, помимо индуктора для нагрева внутренних поверхностей, было использовано автором при создании индукторов для закалки плоских поверхностей (авторское свидетельство В. П. Вологодина и А. А. Фогель, № 54496). Индуктор этого рода изображен на фиг. 138. Столь же яркий пример применения магнитных экранов дает использование их для выравнивания ширины закаленного слоя у коленчатых валов в виде так называемых *рейтеров*, изображенных на фиг. 150.

ГЛАВА VI

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЗАКАЛИВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

1. Необходимость учета формы закаливаемой поверхности и замена сложной поверхности системой цилиндрических поверхностей

Закалка индукционным методом, разработанным лабораторией высокочастотной электротехники Ленинградского электротехнического института, требует более внимательно рассмотреть формы закаливаемых поверхностей, чем это необходимо при нагреве под поверхностную закалку, производимом другими методами. Здесь форма поверхности оказывает большее, чем в других случаях, влияние на результат.

Однако было бы ошибочно пренебрегать формой закаливаемой поверхности даже при нагреве обычными методами. Но до сих пор этому вопросу уделялось очень мало внимания. Влияние формы поверхности учитывалось почти всегда на-глаз. Если такой учет был еще терпим при прежних методах, то индукционный метод во многих случаях не может быть использован, если не учитывать влияния формы поверхности, применяя точный физико-математический анализ.

Лаборатория убедилась в этом на горьком опыте предшествующих лет, когда безуспешно в течение нескольких месяцев пыталась достигнуть при закалке деталей сложной формы заданного эффекта, исходя не из точного расчета, а из общих физических положений. После многих неудач лаборатория поставила проблему нагрева сложных поверхностей в общем виде. Уже первоначальные этапы этой работы дали столь ценные указания, что стала ясной необходимость продолжать эту работу и отказаться от приближенной оценки влияния поверхности на ход нагрева под закалку.

Закалка тел сложной конфигурации индукционным методом, правда, проводилась рядом организаций, хотя и в небольших масштабах, как это видно из литературы, однако почти во всех случаях это была не поверхностная закалка в подлинном смысле этого слова, а частичная закалка некоторых участков детали. Например, при закалке шестерни зуб чаще всего закаливался почти сплошь, у метчика оставалась сырой лишь сердцевина и т. д. В некоторых случаях такая закалка достаточна и может найти применение, однако в большинстве случаев ставятся другие требования, дающие лучшее конструктивное решение, большую прочность закаленной детали. Эти требования сводятся к получению у закаленной детали более или менее равномерного по толщине закаленного слоя, расположенного по всей поверхности или по активной ее части. В этом случае при одинаковой поверхностной твердости дости-

гается бóльшая прочность при изгибе, особенно при ударах, по сравнению с частичной закалкой, так как последним противостоит не закаленная часть, а более вязкая сердцевина.

В качестве примера частичной закалки на фиг. 82, б дана шестерня, зуб которой закален почти сплошь, а на фиг. 83, а дана поверхностная закалка той же шестерни, но при закаленном слое более или менее равномерной толщины.

Из этих фигур нетрудно видеть, что распределение закаленного слоя у шестерни фиг. 83, а обеспечивает бóльшую прочность зуба ввиду наличия надлежаще термически обработанной, а потому вязкой сердцевины. Помимо этого, у шестерни фиг. 82, б прочность зуба уменьшается еще тем, что как раз в опасном сечении будут сосредоточены внутренние закалочные напряжения, тогда как у шестерни фиг. 83, а их в этом сечении не будет.

Частичная закалка по фиг. 82, а, б легко реализуется применением радиочастоты высокого диапазона порядка 300 000 гц. Правда, иногда и в литературе высказывается мнение, что высокая частота, особенно при повышении ее, дает вследствие поверхностного эффекта (скин-эффекта) прохождение тока по поверхности с более или менее равномерной плотностью, как на выступающих частях, так и во впадинах, поэтому достаточно применить радиочастоту для того, чтобы получить форму закаленного слоя, представленную на фиг. 83, а.

В действительности это не так.

Явления прохождения тока и нагрева поверхности формы, показанной на фиг. 82, а, б, значительно более сложны и не могут быть полностью исчерпаны рассмотрением лишь поверхностного эффекта в его элементарной форме.

Как работы лаборатории автора, так и заводская практика дают здесь полное подтверждение этого положения. Правда, при очень высоких частотах, порядка $500\,000 \div 10^6$ гц, как будет показано ниже, возможно получить закалку тел сложной конфигурации с равномерным слоем, закаливая в очень короткое время, например, 0,1—0,2 сек. Но такая закалка почти неприменима, так как требует весьма больших удельных мощностей, которые неосуществимы.

Ввиду этого автором была поставлена задача: найти метод, который позволил бы реализовать закалку индукционным методом тел сложной конфигурации с получением слоя более или менее равномерной толщины по всей поверхности при таких удельных мощностях, которые допустимы.

Более того, этот метод должен дать возможность регулировать толщину закаленного слоя по поверхности, давая то бóльшую толщину на выступающих частях при малой толщине во впадинах, то, наоборот, давая толстый слой во впадинах и тонкий или даже отсутствие его на выступающих частях.

Последний случай представлен на фиг. 83, б. Такая широкая постановка вопроса необходима потому, что требования, выдвигаемые перед методом индукционной закалки, весьма разнообразны, и для успеха ее внедрения необходимо подготовить пути осуществления этих требований.

Решение данной задачи было получено, с одной стороны, широким теоретическим исследованием явлений, происходящих в теле, помещенном в магнитное поле той или другой частоты, с использованием достаточно сложного математического аппарата, и, с другой стороны, постановкой ряда опытов, дающих наводящий для теоретической постановки задачи материал и подтверждающих выводы теории и принятые в ней допущения и упрощения.

Математическая обработка вопроса сделана канд. физико-математических наук Г. А. Разореновым.

Наконец, полученные в результате этой работы данные были проверены на практике и использованы при производственной закалке ряда деталей для заводов. Однако ценность этой работы пока не исчерпана практическим применением, так как данный метод открывает широкие перспективы закалки тел сложной конфигурации во всем их многообразии.

Однако для того чтобы использовать математический аппарат и решения были бы достаточно наглядны, пришлось принять ряд упрощений.

При упрощениях, сильно искажающих действительный ход процесса закалки, полученные результаты исследования не могут быть применены на практике, как не обеспечивающие заданную конфигурацию закаленного слоя. С другой стороны, при выборе недостаточно простой схемы прохождения процесса нагрева под закалку усложнится математический аппарат и решения потеряют ту простоту, которая только и обеспечивает использование их на практике.

Исходя из высказанных положений, автором была предложена весьма простая схема. На принятие этой схемы его натолкнуло явление, наблюдаемое в области индукционных печей.

Это явление носит название «кускового вопроса» и состоит в том, что при недостаточно высоких частотах нагрев садки, состоящей из мелких кусков, идет с малой скоростью, с малым к. п. д. и часто при достижении точки Кюри совершенно останавливается, так как к. п. д. падает до нескольких процентов, и подаваемая индукцией энергия при достижении определенной температуры не превосходит потерь на конвекцию и излучение, отдаваемых данным куском садки.

С другой стороны, при весьма высоких частотах при индукционном нагреве предпочтительно нагреваются мелкие куски, тогда как крупные отстают в смысле повышения температуры.

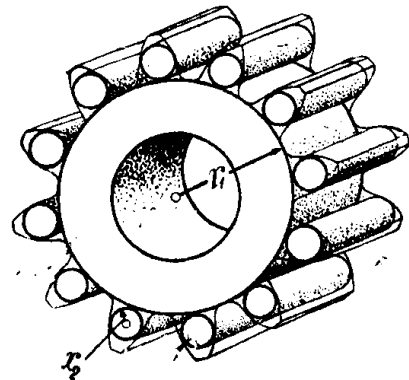
Наконец, из практики и теории индукционных печей известно, что для данных размеров куска и при данных параметрах его материала существует оптимальная частота, дающая наивысший к. п. д. печи, а значит, обеспечивающая при заданной мощности возможно быстрый нагрев.

Исходя из этого, автор предложил использовать для получения заданного распределения закаленного слоя те явления, которые наблюдаются при «кусковом вопросе».

С другой стороны, для того чтобы было легко использовать математический анализ, автор предложил заменять тело сложной конфигурации телом, представляющим из себя систему цилиндров различного радиуса.

В большинстве случаев достаточно данное тело представить в виде системы цилиндров двух различных радиусов и свести задачу к получению равномерно закаленного слоя у двух цилиндров различного радиуса, находящихся в общем однородном переменном магнитном поле.

В этом случае как определение распределения индуктируемых токов сообщаемой нагреваемому слою энергии, так и нахождение распреде-



Фиг. 73. Шестерня как система цилиндров радиусов r_1 и r_2 .

ления температуры получает весьма простое математическое выражение при помощи функций Бесселя.

На фиг. 73 представлена замена шестерни системой цилиндров. Один цилиндр радиуса r_1 и ряд других с радиусом r_2 .

Приняв указанную замену, решим задачу получения у двух цилиндров различных радиусов r_1 и r_2 закаленного слоя приблизительно одной и той же толщины при условии нагрева их одновременно в общем магнитном поле в течение одного и того же времени.

2. Решение задачи получения закаленного слоя приблизительно одинаковой толщины у двух цилиндров различного радиуса чисто тепловым методом

В некоторых случаях (хотя далеко не всегда) эта задача может быть решена путем подбора сообщаемой телу мощности, не считаясь с влиянием частоты тока.

Это решение, ввиду последнего обстоятельства, будет пригодно и при нагреве не путем индукции, а любым другим способом, передающим энергию поверхности тела. Так, например, изложенное в этом разделе целиком относится к поверхностному нагреву в соляной, свинцовой ванне или другим способом.

Если эти соображения не всегда могут дать окончательное решение поставленной задачи, то они представляют некоторую ценность, так как дают указания, какое влияние оказывает величина удельной энергии, сообщаемой поверхности тела, на глубину закаленного слоя или на распределение температуры в зависимости от радиуса кривизны.

При индукционном нагреве знание этих зависимостей часто помогает получению требуемого нагрева и выбору тех удельных мощностей и времени нагрева, при которых целесообразно вести поверхностную закалку деталей, имеющих поверхность различного радиуса кривизны.

Для получения интересующих нас зависимостей напомним выражение для количества тепла Q и мощности P , сообщаемых цилиндру радиуса r , рассчитывая их на 1 см высоты цилиндра.

При этом основным условием ставим достижение в течение времени t_k заданной закалочной температуры θ_k слоями, находящимися на глубине x_k от поверхности.

При правильно выбранной скорости охлаждения и соответствующей прокаливаемости стали на глубину x_k деталь будет закалена.

Для количества тепла Q Г. А. Разореновым было найдено выражение

$$Q = \frac{Q_c}{1 + \frac{r^2}{at_k} S_1} \quad (\text{VI, 1})$$

Здесь Q_c — количество тепла, потребное для равномерного нагрева цилиндра по всему сечению до температуры θ_k ; a — температуропроводность тела; S_1 — зависимость, данная уравнением (VI, 2), и r — радиус кривизны в см.

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(v_n) (1 - e^{-v_n^2 \tau})}{v_n^2 J_0(v_n)}, \quad (\text{VI, 2})$$

где v_n — корни уравнения $J_1(v_n) = 0$ ($n = 1, 2, \dots$).

$\tau = \frac{at_k}{r^2}$; $\beta = 1 - \frac{x_k}{r}$ и J_0 — функция Бесселя нулевого порядка.

$$Q_c = \pi r^2 \frac{\lambda}{a} \Theta_k, \quad (\text{VI, 3})$$

где $\frac{\lambda}{a}$ — удельная теплоемкость.

Аналогично уравнениям (VI, 1) и (VI, 3) можно написать выражение для мощностей

$$P = \frac{P_c}{1 + \frac{r^2}{at_k} S_1} \quad (\text{VI, 4})$$

и

$$P_c = \frac{r \frac{\lambda}{a} \Theta_k}{478 t_k}. \quad (\text{VI, 5})$$

Пользуясь уравнениями (VI, 1) и (VI, 4), можно вычертить, как это и было сделано на фиг. 29, графики, дающие зависимость времени нагрева t_k под закалку от радиуса кривизны для различных удельных мощностей p . При этом на глубине x_k температура достигает значения закалочной Θ_k ; таким образом закаленный слой будет иметь толщину x_k , если, конечно, охлаждение будет выбрано надлежащим, и сталь имеет достаточную прокаливаемость.

Как видно на графике фиг. 29, например, кривой, отвечающей удельной мощности $p=1 \text{ квт/см}^2$, время, потребное для нагрева слоя на глубину x_k до температуры Θ_k , практически не зависит от радиуса кривизны цилиндра, если только этот радиус будет больше некоторой критической величины $r > r_k$, в данном случае $r_k \approx 2 \text{ см}$.

Кроме того, кривые той же фиг. 29, отвечающие меньшим удельным мощностям, $p=0,5$; $p=0,35$ и $p=0,25 \text{ квт/см}^2$, показывают, что величина критического радиуса увеличивается с уменьшением удельной мощности p .

Так, при $p=0,5 \text{ квт/см}^2$ критический радиус повышается до $r \approx 4 \text{ см}$, а при удельной мощности $p=0,25 \text{ квт/см}^2$ будет значительно больше 6 см.

Из сказанного выше и приведенных графиков можно сделать следующие заключения:

1. При данной удельной мощности, сообщаемой телу, например при удельной мощности 1 квт/см^2 , все цилиндры, имеющие радиус больше критического r_k , в данном случае больший 2 см, будут иметь одинаковую глубину закаленного слоя $x_k \approx 0,2 \text{ см}$ при нагреве в течение времени $t_k \approx 3 \text{ сек.}$, так как из графика $p=1 \text{ квт/см}^2$ (фиг. 29, а) видно, что одно и то же время t_k требуется для всех цилиндров, имеющих радиус, больший r_k ; здесь $r_k \approx 2 \text{ см}$.

Для разных глубин x_k получим разные графики, другие времена t_k и r_k , но положение остается тем же. Так, на фиг. 29, б построены на основе тех же уравнений (VI, 3) и (VI, 4) графики для других глубин x_k .

2. Для получения одинаковой толщины закаленного слоя x_k у двух или нескольких цилиндров, нагреваемых в общем магнитном или тепловом поле, в одно и то же время при заданной удельной мощности p достаточно, чтобы меньший из радиусов имел величину большую критического радиуса r_k .

3. Для получения одинаковой толщины закаленного слоя x_k у двух или нескольких цилиндров радиуса $r_1, r_2, r_3 \dots$ необходимо, как это и видно на фиг. 29 (графики для $p=1, p=0,35$ и $p=0,25 \text{ квт/см}^2$), чтобы

удельная мощность, сообщаемая при нагреве, была большей, чем та, при которой критический радиус имеет величину меньшую, чем радиус $r_k < r_1$, если $r_1 < r_2, r_3, r_4 \dots$. В данном случае при $x_k = 0,2$ см; $r_1 = 2$ см; $r_2 > 2$ см, как следует из фиг. 29, мощность p должна быть порядка 1 квт/см².

4. При различных радиусах кривизны (если меньший из них не будет близок или больше критического для заданной глубины) меньшие мощности дадут большие различия в глубине закаленного слоя, чем большие.

Изложенное выше дает путь к получению более или менее равномерного закаленного слоя у тел сложной конфигурации и может быть использовано на практике. Так, кулачковый валик фиг. 81, имеющий $r_1 \approx 2$ см и $r_2 \approx 5$ см, может быть с успехом закален с равномерным по всей периферии слоем $x_k = 0,2$ см, если удельная мощность будет выбрана порядка $p \approx 1$ квт/см².

Однако и несколько меньшие удельные мощности, например $0,5$ квт/см², будут приемлемы, если допустить некоторую неравномерность толщины, которая будет больше в части с меньшим радиусом кривизны.

Ограниченное применение данного метода заключается в том, что большие удельные мощности, вызываемые меньшим радиусом r_1 , часто невыгодны, так как увеличивают установленную мощность, правда, за счет увеличения производительности. Однако последняя и так почти всегда достаточно велика.

Помимо этого, имеется еще одно препятствие к увеличению удельной мощности при требовании более толстой закалки. Из уравнений (VI, 1), (VI, 2) и (VI, 3) нетрудно получить аналогичные фиг. 29 графики для различных значений x_k . Рассматривая эти графики, а также кривые распределения температуры, построенные по уравнению (VI, 6), которое вытекает из уравнения теплопроводности Фурье

$$\Theta = 2,39 \frac{2rP}{\lambda} \left(\frac{at}{r^2} + S \right), \quad (\text{VI, 6})$$

где температура и остальные величины имеют те же значения, что и раньше, нетрудно видеть, что с увеличением глубины x и удельной мощности p быстро растет температура наружного слоя Θ_0 , а значит, и перегрев наружного слоя относительно закалочной температуры, $\Delta \Theta = \Theta_0 - \Theta_k$.

Этот перегрев при достаточно большой глубине x_k и удельной мощности p может получить совершенно неприемлемую величину.

Так, если при $x_k = 0,66$ см, $t_k = 0,9$ сек. и $p = 1,5$ квт/см², из уравнения (VI, 6) получим $\Theta_0 \approx 1000^\circ$ или при $\Theta_k = 820^\circ$ перегрев будет равен $\Delta \Theta = \Theta_0 - \Theta_k = 180^\circ$, что дает уже достаточно высокую величину, то при дальнейшем увеличении удельной мощности p получим для перегрева совершенно недопустимые цифры.

Все изложенное в этом разделе относится, как было сказано ранее, к нагреву, передаваемому наружной поверхности тела.

В этом предположении были написаны и уравнения (VI, 1), (VI, 2) и (VI, 4), так как они в своей основе имеют уравнение Фурье

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}, \quad (\text{VI, 7})$$

отвечающее отсутствию внутренних источников тепла.

Этот случай в практике может быть, как указывалось и ранее, осуществлен передачей тепла путем нагрева обычным методом, например, в соляной ванне, лучеиспусканием и т. п. или же индукционным путем, если применять токи радиочастоты, порядка 300 000 гц.

В последнем случае также можно принять, что вся энергия сообщается наружному слою, как и при нагреве в печи, ванне и т. п., так как при указанной частоте ток проходит лишь по тонкому наружному слою под влиянием упомянутого выше поверхностного эффекта. В этом нетрудно убедиться, обратившись к хорошо известному выражению для глубины проникновения тока при поверхностном эффекте.

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ см.} \quad (\text{VI, 8})$$

Для стали выражение (VI, 8) дает при радиочастоте порядка $f = 300\,000$ гц значение $\delta_{\text{хол}} \approx 0,004$ см, $\delta_{\text{гор}} \approx 0,12$ см.

Как видно, при подобных частотах, как и говорилось ранее, уместно считать, что нагрев передается чисто наружным слоям.

В тех случаях, когда применяется индукционный нагрев на более низких частотах, можно написать уравнение, аналогичное уравнениям (VI, 1), (VI, 2) и (VI, 4), если исходить из уравнения Фурье с внутренними источниками тепла,—уравнение (VI, 9):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{a}{\lambda} w. \quad (\text{VI, 9})$$

Необходимость принятия при более низких частотах уравнения (VI, 9) вытекает из того, что, например, при 2000 гц ток имеет глубину проникновения, исходя из уравнения (VI, 8), уже $\delta_{\text{хол}} = 0,05$ см и $\delta_{\text{гор}} = 1,45$ см (обе величины для стали). Для количества тепла в этом случае получим такое же выражение, как уравнение (VI, 1), но только вместо уравнения (VI, 2) необходимо подставить величину из (VI, 9а):

$$S = -\frac{2r}{\xi} \frac{1 - \frac{\xi}{r}}{2 - \frac{\xi}{r}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\nu_n \alpha) J_0(\nu_n \beta) (1 - e^{-\nu_n^2 \tau})}{\nu_n^3 [J_0(\nu_n)]^2}. \quad (\text{VI, 9a})$$

Здесь $\alpha = 1 - \frac{\xi}{r}$, где ξ — слой, в котором идет выделение тепла, $\xi \approx \delta$.

Рассмотрение полученных из (VI, 9) уравнений и графиков показывает, однако, что существенных отличий от изложенного ранее здесь не получается, за исключением некоторого понижения перегрева, который выше определялся, исходя из уравнения (VI, 6), а теперь должен определяться из аналогичного ему выражения при глубинном выделении тепла.

Глубинный нагрев $\xi > 0$ и не будет рассматриваться с точки зрения простой передачи тепла, как это было только что сделано в отношении поверхностного нагрева, при $\xi = 0$, в разделе 2.

Это тем более нецелесообразно, что при значительном понижении частоты начинают играть значительную роль чисто электрические особенности, связанные и вытекающие из выбранной частоты. Эти особенности коренным образом искажают прежде нарисованную для поверхностного нагрева картину, приводя к совершенно другим заключениям.

Автор использовал эту особенность для решения той же задачи, но более радикальным образом и для более широкого применения. Содержание следующего раздела и является развитием метода, основанного на использовании электрических особенностей, обнаруживающихся при понижении частоты до некоторых пределов в комбинации с теми закономерностями, которые относятся к поверхностному нагреву, основанному на чисто тепловых закономерностях, выведенных из уравнений (VI, 7) и (VI, 8).

3. Получение закаленного слоя приблизительно одинаковой толщины у двух цилиндров, находящихся в однородном переменном магнитном поле, путем использования тепловых и электрических зависимостей, связанных с кривизной цилиндра и частотой поля

Как было сказано выше, здесь были использованы явления, составляющие в значительной мере «кусковой вопрос».

Для нахождения решения задачи двух цилиндров различного радиуса автор выбрал два совершенно разнородных процесса, связанных между собой через мощность или энергию.

Чтобы найденное решение было достаточно определено и резко очерчено и могло быть практически реализовано, необходимо наличие резкой зависимости процессов от тех параметров, какими мы располагаем.

При этом для того и другого процесса эти зависимости были весьма отличны и при графическом их выражении в зависимости от интересующего нас параметра давали пересекающиеся кривые с определенной точкой пересечения.

В качестве одного из этих явлений было выбрано распространение тепла от поверхности тела путем теплопроводности.

Здесь интерес представляет зависимость необходимой мощности или количества тепла Q , потребного для нагрева до заданной закалочной температуры Θ_k слоя, лежащего на расстоянии x_k от поверхности, где x_k — глубина закаленного слоя от какой-либо переменной величины, которой можно располагать в закалочном устройстве.

В качестве такой переменной величины была взята частота или, что удобнее для анализа, связанная с ней величина $\frac{\delta}{r}$, где δ определяется уравнением (VI, 8) и r — радиус меньшего цилиндра:

$$Q = \varphi \left(\frac{\delta}{r} \right) \quad (\text{VI, 10})$$

при $t_k = \text{const}$; $x_k = \text{const}$ и $\Theta_k = \text{const}$. Q рассчитано на 1 см высоты цилиндра.

Эта зависимость в несколько другой форме была приведена ранее в уравнении (VI, 1).

Что касается другого явления, то здесь было использовано явление распределения тока, индуктируемого в теле, находящемся в однородном переменном магнитном поле при таких частотах, которые дают согласно уравнению (VI, 8) глубины проникновения одного порядка с радиусом меньшего цилиндра.

В качестве переменной независимой здесь, так же как и в предыдущем случае распространения тепла, возьмем величину, связанную с частотой:

$$\frac{\delta}{r_2}$$

Интересующая нас зависимость, так же как и ранее, может быть написана в виде

$$W = f \left(\frac{\delta}{r} \right), \quad (\text{VI, 11})$$

где W — энергия, выделяемая в цилиндре путем индукции, рассчитанная на 1 см высоты цилиндра.

Как будет показано ниже, зависимость (VI, 11) резко отличается от зависимости (VI, 10).

Если написать уравнения (VI, 10) и (VI, 11) для каждого из цилиндров, то получим для радиуса r_1

$$Q_1 = \varphi\left(\frac{\delta}{r_1}\right)$$

и

$$W = f\left(\frac{\delta}{r_1}\right)$$

и для радиуса r_2

$$Q_2 = \varphi\left(\frac{\delta}{r_2}\right)$$

и

$$W = f\left(\frac{\delta}{r_2}\right), \quad (\text{VI, 12})$$

откуда найдем

$$\frac{Q_1}{Q_2}$$

и

$$\frac{W_1}{W_2}. \quad (\text{VI, 13})$$

Так как уравнение (VI, 12) и отношение (VI, 13) написаны в предположении, что глубина x_k и время t_k для того и другого явления одни и те же, то ясно, что

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{W_1}{W_2}, \quad (\text{VI, 14})$$

так как количество тепловой энергии, вызывающее заданное распределение температур, должно равняться тому количеству, которое подводится к нагреваемому телу. Так как Q_1 , Q_2 и W_1 , W_2 являются функциями $\frac{\delta}{r}$ или, что то же, частоты f , то из уравнения (VI, 14) нетрудно

определить ту частоту, при которой цилиндры радиусов r_1 и r_2 будут в заданное время закали t_k иметь на глубине x_k одинаковую температуру Θ_k , иначе говоря, будут закалены на одинаковую глубину.

Это и составляет решение поставленной задачи.

Наметив в предыдущих строках общий ход решения задачи закали двух цилиндров, остановимся на ней более подробно.

а) Тепловая часть задачи

Количество тепла, необходимое для достижения на глубине x_k за время t_k закалочной температуры Θ_k , может быть определено из уравнений (VI, 1) и (VI, 9a).

Однако в том случае, если радиус нагреваемого цилиндра сравнительно велик и выполняется для численных значений условие

$$t_k < r^2$$

и

$$x_k \leq 0,1r,$$

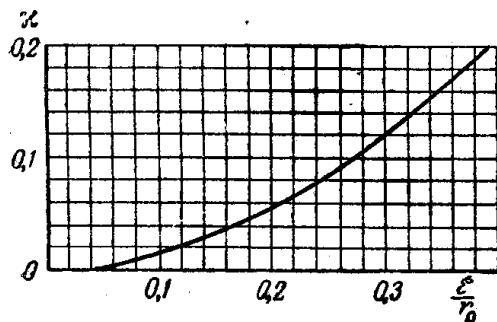
то удобнее пользоваться, как это и предложил Г. А. Разоренов, более простым и наглядным выражением

$$Q = \pi r \frac{t_k}{x_k} \lambda \Theta_k \frac{1}{\Xi} (1-x), \quad (\text{VI, 15})$$

которое, однако, справедливо лишь при

$$t_k \leq r^2 \text{ и } x \leq 0,1r.$$

В уравнении (VI, 15) x — поправка на кривизну поверхности и E — вспомогательная функция. При тех соотношениях, которые имеют место в действительных условиях, и принимая во внимание, что в процессе нагрева под закалку не могут быть учтены многие обстоя-



Фиг. 74. Значение поправки на кривизну x в выражении для Q в зависимости от $\frac{\xi}{r}$.

тельства, как дающие нелинейные зависимости, вполне возможно упростить выражение (VI, 15) приняв $E \approx 2$.

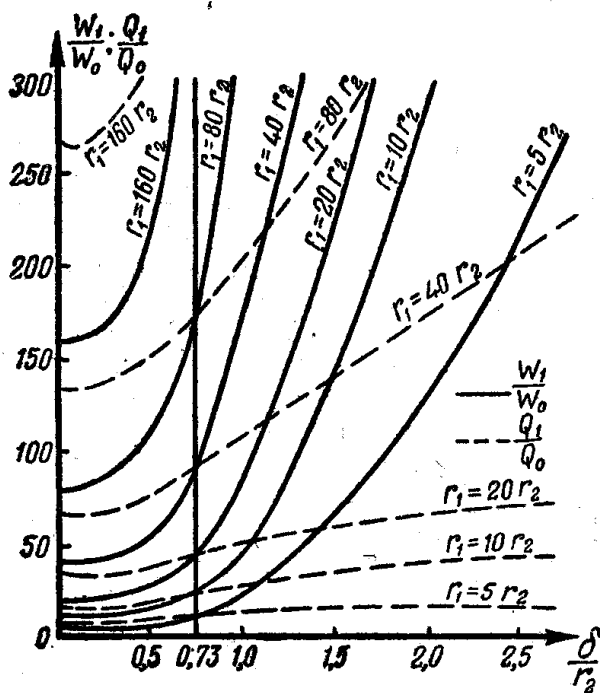
Чтобы судить о вносимой таким упрощением ошибке, достаточно указать на то, что величина E в пределах значений $\frac{\xi}{r}$ от 0 до 2 колеблется в пределах от 2,2 до 2.

Так же точно, для цилиндра большего радиуса величину x можно принять равной нулю, так как эта величина зависит от $\frac{\xi}{r}$ и при $\frac{\xi}{r} \approx 0,2$ не превышает 0,07, как это видно на фиг. 74.

Ввиду сказанного можно принять

$$Q \approx \frac{\pi}{2} r \frac{t_k}{x_k} \lambda \Theta_k. \quad (\text{VI, 16})$$

Как видно, принятое нами для цилиндра с большим радиусом упрощенное выражение для количества теплоты не зависит от частоты магнитного поля.



Фиг. 75. Значения отношений $\frac{W_1}{W_0}$ и $\frac{Q_1}{Q_0}$ в зависимости от отношения $\frac{\delta}{r_2}$.

Приведенные выше формулы для количества тепла позволяют определить и величину отношения $\frac{Q_1}{Q_2}$, которое, как было указано ранее, будет необходимо при определении частоты.

При вычислении значения $\frac{Q_1}{Q_2}$ для Q_1 , как относящейся к цилиндру большего радиуса, для которого выполнены условия $t \leq r_1^2$ и $x_k \leq 0,1 r_1$, можно применить упрощенное выражение (VI, 16), а для Q_2 , относящегося к цилиндру с меньшим радиусом, необходимо взять точную формулу уравнений (VI, 1) и (VI, 9a).

Вычисленное таким образом отношение представлено в виде графика на фиг. 75.

Как видно, зависимость отношения $\frac{Q_1}{Q_2}$ от частоты невелика

и то имеет место лишь при малых значениях $\frac{\delta}{r_2}$, так как только здесь кривая $\frac{Q_1}{Q_2}$ значительно отклоняется от прямой линии.

б) Электрическая часть задачи

Как было указано выше, необходимое для нагревания количество теплоты Q развивается в виде джоулева тепла, как результат тока, индуцируемого переменным магнитным полем, в котором находятся интересующие нас цилиндры радиусов r_1 и r_2 .

Этот ток будет иметь плотность, которая, как известно, будет убывать от поверхности и к более глубоким слоям вследствие упомянутого ранее поверхностного эффекта.

Распределение плотности тока зависит от частоты или, точнее, связанной с ней глубины проникновения тока, данной ранее уравнением (VI, 8).

Это распределение может быть представлено в виде известного уравнения.

$$j = \frac{H}{2\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{x}{\delta}}. \quad (\text{VI, 17})$$

Однако (VI, 17) будет иметь место лишь в том случае, если поверхность, по которой идет ток, будет плоской или иметь кривизну весьма большого радиуса. При относительно больших радиусах кривизны, когда соблюдено условие $\delta \leq 0,25 r_0$, для плотности имеем:

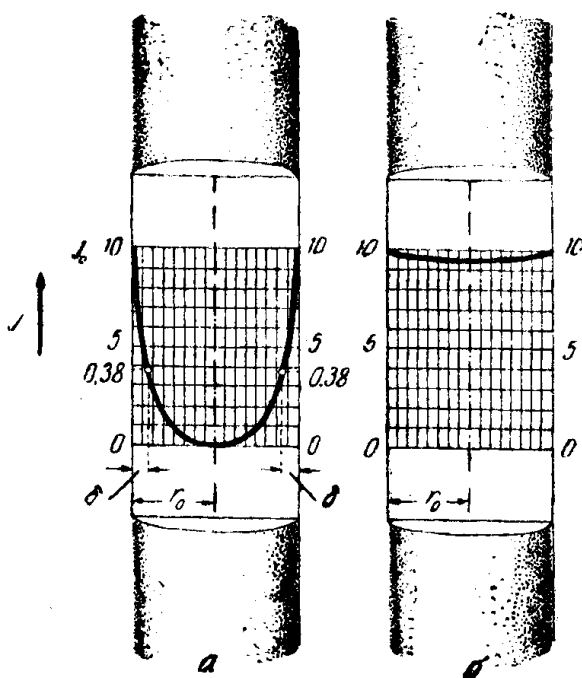
$$j = \frac{H}{2\sqrt{2\pi\delta}} \frac{1}{\sqrt{1-\frac{x}{r_0}}} e^{-\frac{x}{\delta}}, \quad (\text{VI, 18})$$

где $x = r_0 - r$. При относительно малых радиусах при $\delta \geq 0,25 r_0$ вместо VI, 18) будет иметь место уравнение

$$j = \frac{H}{4\pi\delta^2} r. \quad (\text{VI, 19})$$

Из уравнений (VI, 18) и (VI, 19) следует, что при относительно больших частотах, а значит, малых δ ток сосредоточивается вблизи поверхности и сравнительно мало зависит от радиуса кривизны, тогда как при относительно низких частотах зависимость плотности от кривизны, как это показывает (VI, 19), весьма велика, так как ток спадает линейно с радиусом, что и представлено на фиг. 76. Описанное выше различие в распределении плотности тока, обусловливаемое соотношением между частотой и радиусом кривизны, и использовано автором для получения равномерного закалочного слоя у цилиндров различного радиуса, находящихся в общем однородном переменном магнитном поле.

Имея уравнения (VI, 17) и (VI, 18) для распределения плотности тока, определим выражение для энергии, передаваемой цилиндрическому телу путем индукции.



Фиг. 76. Распределение плотности тока при поверхностном эффекте:

а) $\delta \leq 0,25 r_0$; б) $\delta \geq 0,25 r_0$.

Эту энергию рассчитаем, как это делали ранее для величины Q , на 1 см высоты цилиндра. Имеем

$$W = \pi \rho t_k \int_0^r j^2 r dr, \quad (\text{VI}, 19)$$

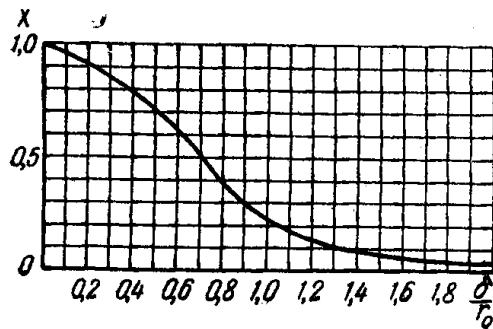
откуда

$$W = t_k \frac{\rho H^2}{16\pi} \frac{r}{\delta} X, \quad (\text{VI}, 20)$$

где

$$X = \frac{-\operatorname{Re}(J_1)[\operatorname{Re}(J_0) + J_m(J_0)] + J_m(J_1)[\operatorname{Re}(J_0) - J_m(J_0)]}{[\operatorname{Re}(J_0)]^2 + [J_m(J_0)]^2}. \quad (\text{VI}, 21)$$

Здесь Re , J_m — вещественные и мнимые части:



Фиг. 77. Значение множителя X в зависимости от $\frac{r}{\delta}$.

$$J_0 = J\left(\sqrt{2i} \frac{r}{\delta}\right), \quad i = \sqrt{-1},$$

$$J_1 = J\left(\sqrt{2i} \frac{r}{\delta}\right) -$$

функция Бесселя от аргумента

$$\sqrt{2i} \frac{r}{\delta}.$$

Зависимость $X = \varphi\left(\frac{\delta}{r}\right)$ по урав-

нению (VI, 21) дана на графике фиг. 77.

Из фиг. 77 нетрудно видеть, что при относительно больших радиусах цилиндра, когда

$$\delta < 0,25r,$$

$$X \approx 1$$

и

$$W \approx \frac{\rho H^2}{16\pi} \frac{r}{\delta} t_k. \quad (\text{VI}, 22)$$

При относительно малых радиусах цилиндра, когда

$$\delta \geq 0,25r,$$

$$X \approx \frac{1}{4} \left(\frac{r}{\delta}\right)^3 \quad (\text{VI}, 22a)$$

и

$$W \approx \frac{\rho H^2}{64\pi} \left(\frac{r}{\delta}\right)^4 t_k. \quad (\text{VI}, 23)$$

Здесь, как и при тепловой задаче, говоря о радиусе цилиндра, мы его сравниваем с глубиной проникновения, связанной с частотой уравнения (VI, 8), так как характер явлений при высокой частоте зависит, как известно, не от абсолютных размеров тела, а от размеров, выраженных в единицах глубины проникновения δ .

Из уравнений (VI, 22) и (VI, 23) следует, что при относительно большом радиусе цилиндра (малое отношение $\frac{\delta}{r}$) поглощаемая цилиндром мощность будет пропорциональна корню из частоты f , тогда как относительно малый радиус цилиндра (большое отношение $\frac{\delta}{r}$) влечет за собой большую зависимость от частоты, так как мощность в этом случае будет пропорциональна f^2 .

Это различие, по идее автора, и должно путем изменения частоты создавать в цилиндрах различного радиуса то количество энергии, которое диктуется чисто тепловыми соотношениями, данными уравнением (VI, 1).

Приведенное уравнением (VI, 20) выражение отвечает тому случаю, когда ток, индуктируемый в теле, определяется уравнениями (VI, 17) и (VI, 18).

В действительности изменение ρ и μ , неизбежное при нагреве, ведет к значительным отклонениям тока от зависимости уравнений (VI, 17) и (VI, 18). Однако, как показал опыт, принятые выражения для мощности (VI, 22) и (VI, 23) дают достаточное приближение.

в) Решение задачи закалки двух цилиндров

Как было сказано ранее, автор предложил осуществлять получение закалочного слоя одинаковой толщины у двух цилиндров, находящихся в общем однородном магнитном поле в течение времени t_k , путем подбора частоты магнитного поля.

В каждом из цилиндров при этом должно выделяться такое количество тепла, которое диктуется получением на глубине x_k одинаковой температуры чисто тепловыми закономерностями, данными уравнением (VI, 1).

Как следует из раздела «б», это можно сделать, написав уравнение, связывающее тепло, необходимое для нагрева обоих цилиндров с той энергией, которая в них должна быть выделена электромагнитным путем. При этом необходимо выразить как тепло, так и электрическую энергию в функции частоты.

В этом случае написанное таким образом уравнение и даст возможность определения требуемой частоты.

Таким уравнением будет пропорция

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (\text{VI, 24})$$

Для решения этого уравнения используем метод, данный Г. А. Разо-реновым, который позволяет это сделать достаточно просто.

На основании выведенных ранее в разделах «а» и «б» соотношений можно написать

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot r_2 \cdot \frac{t_k}{x_k} \cdot \frac{\lambda \theta_k}{Q_2}. \quad (\text{VI, 25})$$

В уравнении (VI, 25), как и было ранее сказано, мы вправе лишь величину Q_1 , как относящуюся к цилиндру с большим радиусом, выразить через упрощенное выражение (VI, 16), так как при этом выполнено условие

$$t_k \leq r_1^2 \quad \text{и} \quad x_k \leq 0,1r_1. \quad (\text{VI, 26})$$

Что же касается Q_2 , то эта величина должна быть вычислена по основному уравнению (VI, 1) и (VI, 9а), так как для малого цилиндра условие (VI, 26) не выполнено. Так же точно, пользуясь уравнениями (VI, 19) и (VI, 21), напомним соотношение

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{1}{X}. \quad (\text{VI, 27})$$

Здесь для величины W_1 можно, как было указано в разделе «б», уравнение (VI, 22), принять $X=1$, тогда как для меньшего цилиндра это допущение не имеет места и необходимо использовать уравнение (VI, 22а).

Из уравнений (VI, 25) и (VI, 27) получаем

$$\frac{\pi}{2} r_2 \frac{t_k}{x_k} \frac{\lambda \theta_k}{Q_2} = \frac{1}{X}. \quad (\text{VI, 28})$$

Принимая выражение для Q_2 из уравнения (VI, 1) при $\xi = x_k$, нетрудно вычислить левую часть, определив этим величину X . Затем, используя график (см. фиг. 77), построенный по уравнению (VI, 21), определим величину $\frac{\delta}{r_2}$, которая даст возможность найти искомую частоту магнитного поля, а значит, и генератора, питающего закалочное устройство, так как согласно уравнению (VI, 8)

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

откуда

$$f = \frac{\rho}{4\pi^2 \mu \left(\frac{\delta}{r_2}\right)^2 r_2^2}. \quad (\text{VI, 29})$$

Уравнения (VI, 28), (VI, 1), (VI, 9a) и (VI, 29), служащие для определения частоты, дающей одинаковый закаленный слой у цилиндров радиусов r_1 и r_2 , хотя и достаточно просты, однако требуют много вычислительной работы, что далеко не всегда выполнимо на заводе и даже в заводской лаборатории.

Чтобы, несмотря на это, использовать на практике предложенный метод, достаточно либо составить предварительно ряд графиков, которыми и пользоваться, либо обратиться к упрощенным выражениям, которые нетрудно вывести из уравнений (VI, 28), (VI, 29).

Эти упрощенные формулы нетрудно получить, введя ряд ограничений. Так, Г. А. Разоренов, ограничив время закалки выражением $t_k = 8r^2$ и глубину закаленного слоя выражением $x_k = 0,15r$, получил для определенных средних значений θ_k , α и λ очень простое выражение, позволяющее определить частоту, при которой должна производиться закалка для получения закаленного слоя одинаковой толщины:

$$\delta = 0,73r^2, \quad (\text{VI, 30})$$

$$f = \frac{3760}{r_2^2}, \quad (\text{VI, 31})$$

что при $r_2 \approx 0,5$ см дает частоту 15 000 гц.

Условия для x_k , t_k и f относятся к численным значениям.

4. Закалка тел сложной конфигурации

Имея решение задачи закалки двух цилиндров в виде уравнения (VI, 28) и исходя из предложения автора заменять линейчатые тела сложной конфигурации рядом цилиндров различного радиуса, нетрудно реализовать закалку тел сложной конфигурации.

Здесь ограничимся несколькими примерами, иллюстрирующими это положение. Простейшим случаем здесь будет закалка кулачка, который легко может быть представлен в виде двух цилиндров. Частота определится из уравнений (VI, 28) и (VI, 29) или из упрощенного (VI, 31).

Более сложный случай закалки шестерни может быть разрешен также исходя из замены зубьев рядом цилиндров, как показано на фиг. 73.

Здесь некоторое затруднение представляет вопрос, какой величины выбрать радиус кривизны шестерни. Опыт показывает, что в качестве

диаметра нужно брать величину на 15—20% бóльшую, чем ширина зуба по делительной окружности. В большинстве случаев для закалки шестерни достаточно пользоваться упрощенной формулой

$$\omega = 2\pi f \approx \frac{6 \cdot 10^5}{M^2}, \quad (\text{VI, 32})$$

где M — модуль шестерни.

Во всех выведенных формулах не учитывалось то обстоятельство, что зубья имеют углы, которые можно рассматривать как цилиндры весьма малого радиуса, но такой подход неверен. При выведенных формулах углы не должны получить закалки, однако ввиду теплопроводности как в период нагрева, так и между нагревом и охлаждением, они также закалятся.

К описанному методу нельзя подходить чисто механически, так как тела сложной конфигурации имеют часто много особенностей, которые надо учитывать.

Метод дает здесь, однако, исходные положения, указывающие путь в основных чертах. Кроме того, изложенное объясняет те парадоксы, которые часто наблюдаются при индукционной закалке. Так наблюдается подкалка углубленных частей, удаленных от индуктора, при оставшихся незакаленными выступами, лежащих у самого индуктора, что объясняется развитой выше теорией.

5. Лабораторные работы, подтверждающие метод

В индукционной закалке приходится при рассмотрении вопросов закалки, если идти путем расчета, делать ряд допущений, например: не всегда полностью учитывать, что в процессе нагрева большинство основных параметров, как ρ и μ , претерпевает значительные изменения, которые при том же нелинейны.

Поэтому необходимо вести контрольную лабораторную проверку, которая показала бы, что принятые допущения и упрощения не меняют качественной стороны и не ведут за собой отклонения от пределов точности, принятых при расчете.

Поэтому и изложенный метод был подвергнут тщательному лабораторному исследованию.

Прежде всего была проверена допустимость замены тел сложной конфигурации рядом цилиндров. Затем проверялись основные выводы и, наконец, упрощенные формулы.

Работа по данному вопросу велась в лаборатории автора в Ленинградском электротехническом институте и отчасти на заводах ХТЗ и ЗИС работниками лаборатории.

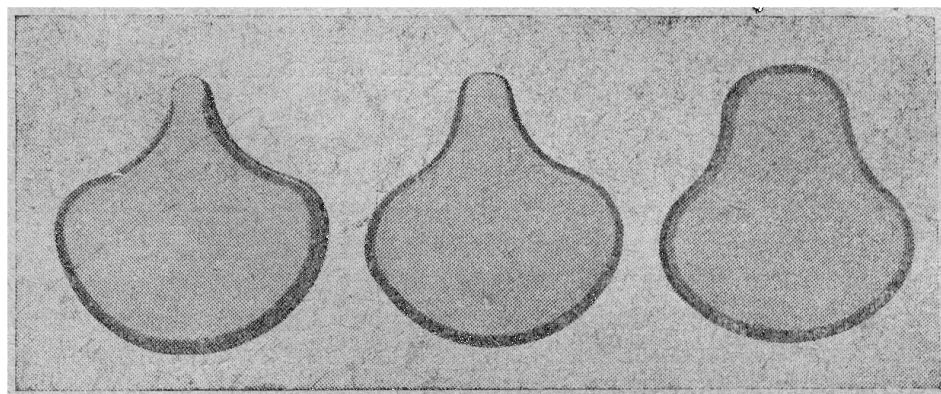
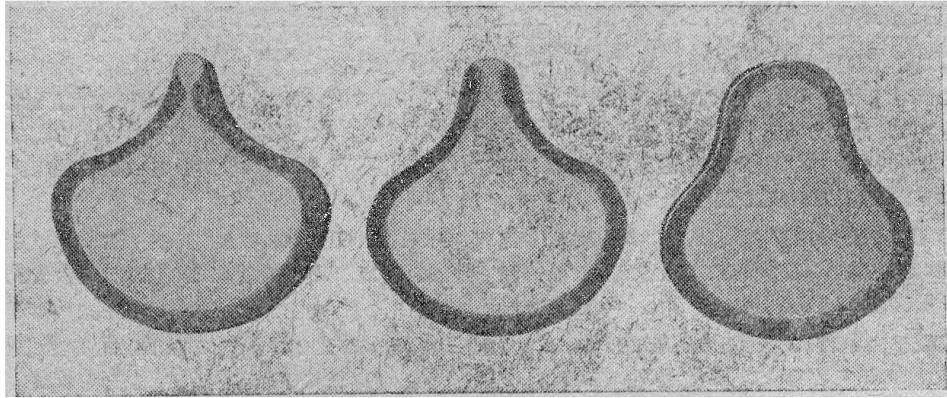
Исследования показали, что целесообразно рассматривать тела сложной конфигурации как систему цилиндров различного радиуса.

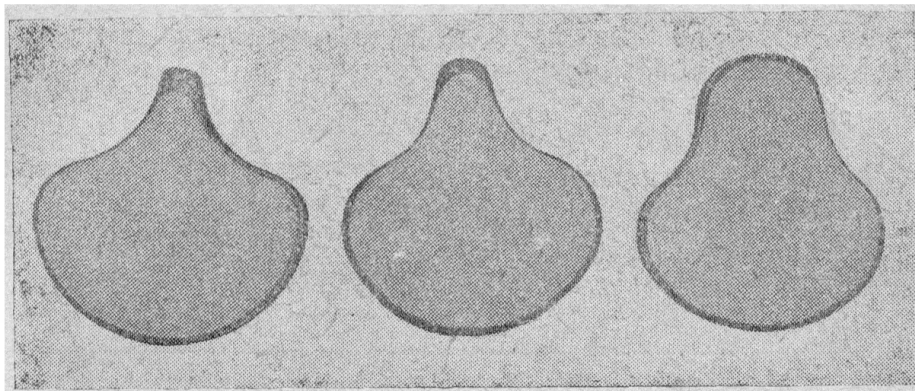
Это видно из того, что предсказания относительно расположения закаленных зон у тел сложной конфигурации, исходящие из рассмотрения его как системы цилиндров, всегда оправдывались с качественной стороны.

Так же точно проверка формул дала достаточные основания считать принятые допущения приемлемыми.

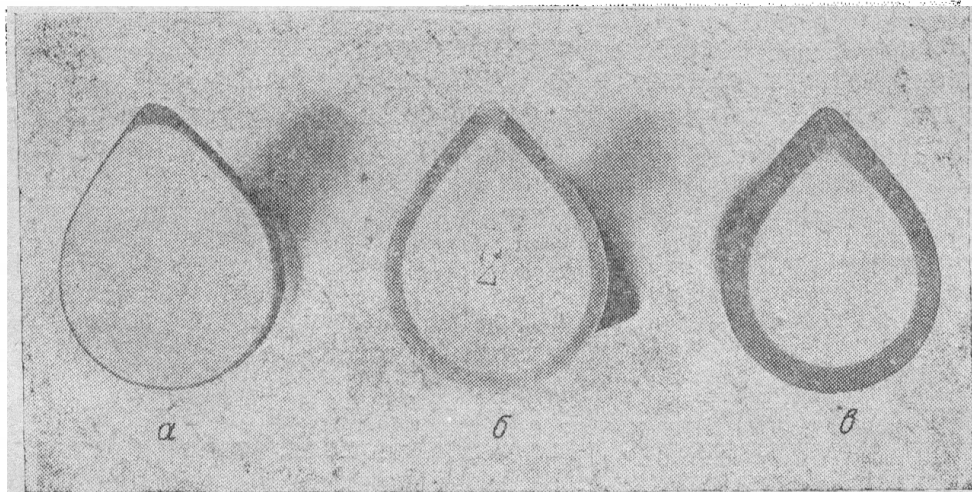
Для подтверждения введенных теоретических зависимостей был изготовлен ряд образцов сложной конфигурации в трех различных вариантах.

Эти образцы были закалены при частотах 2000 и 300 000 гц, при этом на частоте 2000 гц были взяты два разных времени.





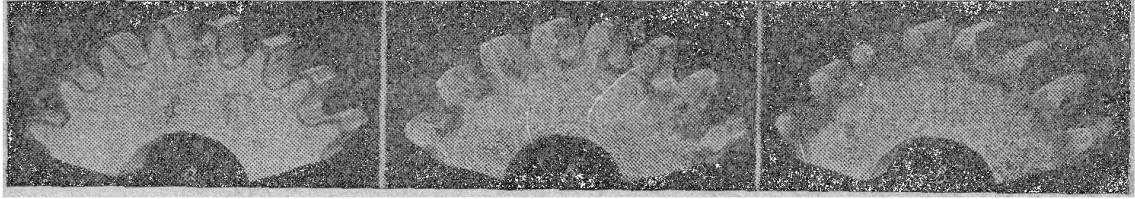
Фиг. 80. Опытная закалка поверхностей различной кривизны.
Частота $250 \cdot 10^3$ гц



Фиг. 81. Макрошлиф кулачкового валика.
а—закалка на частоте 250 000 гц; б—закалки на частоте 2000 гц; в—закалка на частоте 2000 гц с выдержкой времени.



Фиг. 82. Макрошлифы шестерен, закаленных на разных частотах
а—250 000 гц; $t_k = 1,9$ сек., $P = 172$ кат; б—250 000 гц; $t_k = 3$ сек.



Представляя себе деталь в виде призмы, ребра которой направлены параллельно магнитному полю, и применяя к этому случаю уравнения Максвелла (пренебрегая током смещения, как весьма малым), можно найти уравнение¹, которому должна удовлетворять комплексная амплитуда магнитного поля H внутри детали:

$$\nabla^2 H + \left(\frac{1+i}{\delta}\right)^2 H = 0. \quad (\text{VI}, 28)$$

Здесь δ — глубина проникновения тока, понимаемая в обычном смысле, т. е. как глубина, на которой $\text{mod } H$ убывает в $e=2,72$ раза при обычном скин-эффекте вблизи плоской поверхности.

∇^2 есть так называемый оператор Лапласа. В прямоугольных координатах x, y

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2};$$

в полярных координатах r, φ

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}.$$

В обоих случаях ось z направлена параллельно полю и ребрам призмы, так что H от z не зависит.

Уравнение (VI, 28) называется волновым уравнением или уравнением Покельса. Кроме этого, уравнение H должно удовлетворять еще граничному условию на поверхности детали

$$H = H_0, \quad (\text{VI}, 29)$$

где H_0 — амплитуда магнитного поля в воздухе вблизи от поверхности детали. В рассматриваемом случае H_0 в первом приближении можно считать постоянной величиной.

Если задача о распределении поля решена, т. е. найдена зависимость H от координат x, y или r, φ , удовлетворяющая уравнению (VI, 28) и условию (VI, 29), то плотность тока, которую мы также будем писать в комплексной форме $j e^{-i\omega t}$, находится посредством первого уравнения Максвелла

$$j = \frac{1}{4\pi} \text{rot } H. \quad (\text{VI}, 30)$$

В прямоугольных координатах это уравнение разбивается на следующие два уравнения:

$$j_x = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial H}{\partial y}; \quad j_y = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial H}{\partial x}. \quad (\text{VI}, 31)$$

В полярных координатах соответственно получим

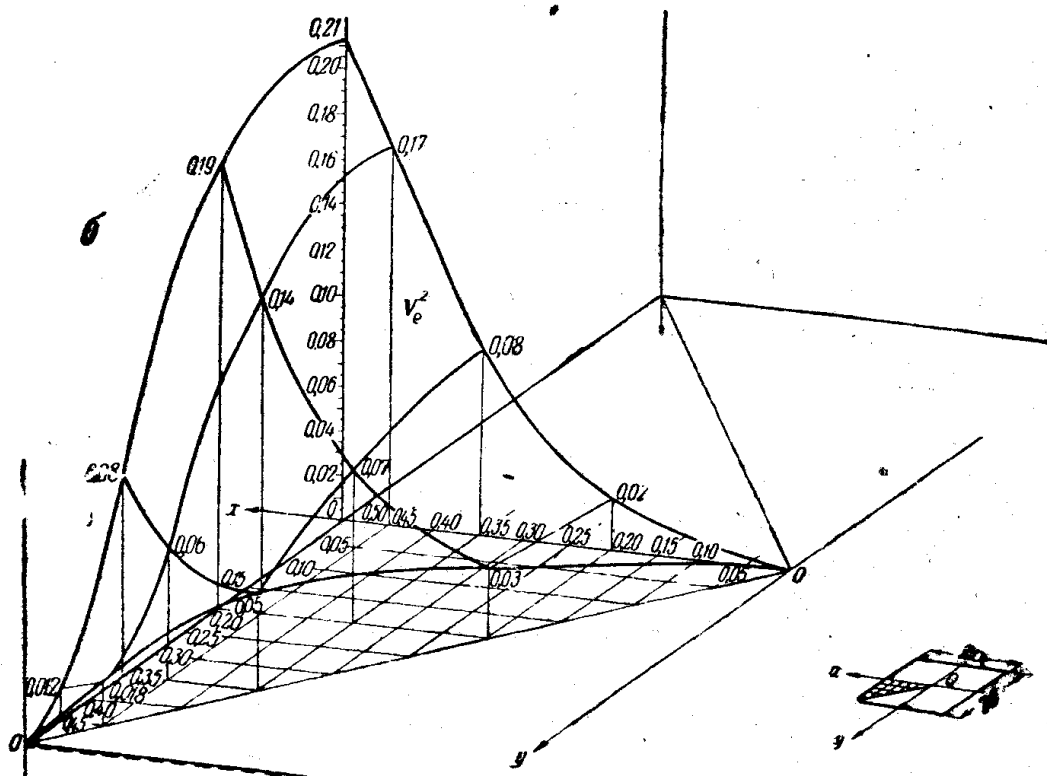
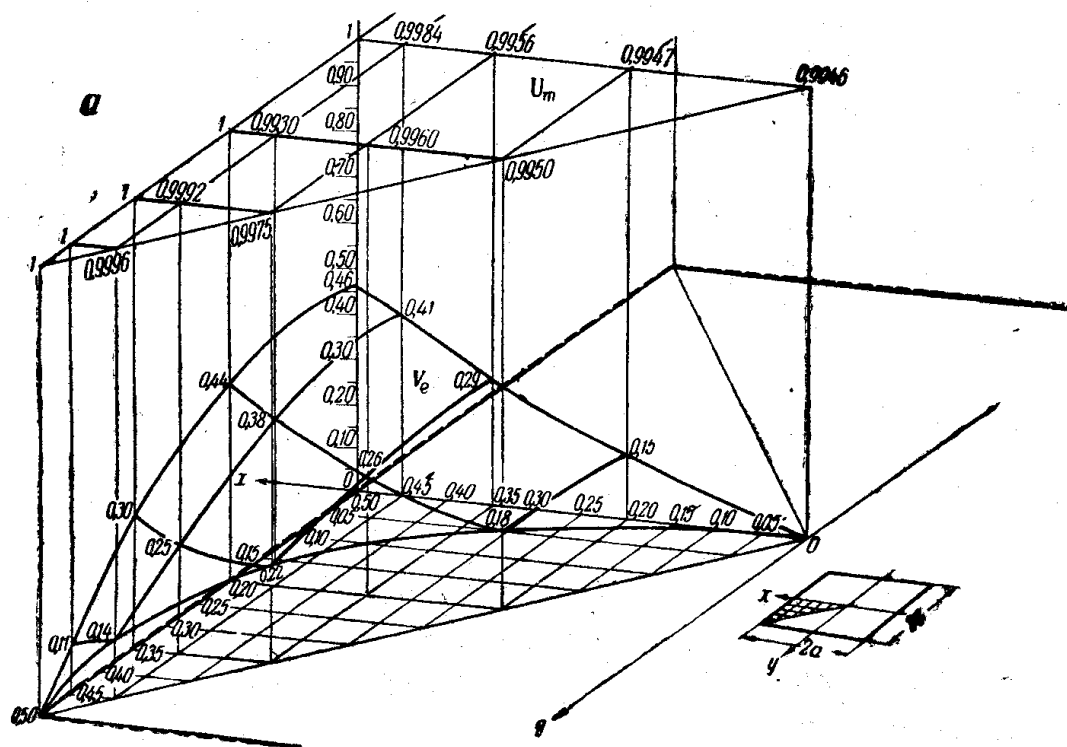
$$j_r = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial \varphi}; \quad j_\varphi = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial H}{\partial r}, \quad (\text{VI}, 32)$$

где j_x, j_y — составляющие вектора комплексной амплитуды плотности тока по осям x, y ;

j_r, j_φ — аналогичные составляющие в полярной системе координат, т. е. параллельная и перпендикулярная составляющая к радиусу-вектору r .

Эффективное значение плотности тока находится по значениям составляющих комплексной амплитуды:

¹ Ф. Франк и Р. Мизес, Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики, ОНТИ, 1937, гл. XXI.



Фиг. 84. Распределение в квадратной призме, когда глубина проникновения тока равна стороне квадрата.

α —амплитуды магнитного поля и эффективной плотности тока; β —амплитуда квадрата плотности тока.

в прямоугольных координатах

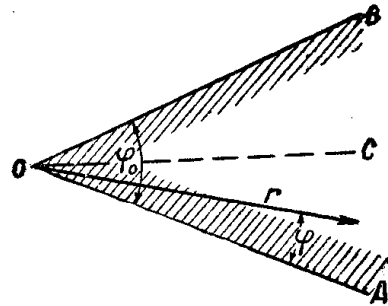
$$j_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\text{mod } j_x)^2 + \frac{1}{2} (\text{mod } j_y)^2} \quad (\text{VI, 33})$$

в полярных координатах

$$j_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\text{mod } j_r)^2 + \frac{1}{2} (\text{mod } j_\varphi)^2}. \quad (\text{VI, 34})$$

Опуская довольно сложные вычисления, необходимые для решения поставленной задачи, приведем некоторые результаты расчетов.

На фиг. 84 показаны результаты расчетов, выполненных инж. З. Е. Слепьян для случая призмы квадратного сечения со сторонами $2a=2b=\delta$; изображение дано в перспективе. В верхней части фиг. 84, а показана поверхность, расстояния точек которой от основания призмы пропорциональны амплитуде магнитного поля внутри призмы (цифры дают значения отношения $\text{mod } H/H_0$), а в нижней части — аналогичная поверхность, соответствующая эффективным значениям плотности тока (цифры дают значения величины $\frac{4\pi}{H_0} j_{\text{eff}}$). В то время как первая из этих поверхностей лишь незначительно отличается от плоскости в соответствии с относительно большой глубиной проникновения поля, вторая поверхность круто спадает как по направлению к центру призмы, так и по направлениям к ее ребрам, достигая максимальных значений лишь на серединах граней призмы. Еще круче спадает аналогичная поверхность, соответствующая квадрату плотности тока, как это показано на фиг. 84, б.



Фиг. 85. Ребро, образованное пересечением двух граней под острым углом.

Переходим к более общему случаю граней на поверхности какой-либо детали (фиг. 85). Если ширины двух смежных граней детали в несколько раз превосходят величину δ , поле вблизи ребра, образуемого пересечением этих граней, не зависит от расположения других ребер и граней.

Вдали от ребра O , на расстояниях, больших $\frac{2\delta}{\varphi_0}$, причем φ_0 выражено в радианах, для углов φ_0 , равных или меньших прямого, поле может быть определено по приближенной формуле.

При небольших углублениях внутрь тела, на расстояниях от грани O , больших $\frac{4\delta}{\varphi_0}$, эта формула совпадает с обычным выражением для скин-эффекта вблизи плоской поверхности (с ошибкой менее 4% при значениях z , меньших 2δ):

$$\left. \begin{aligned} r &\geq \frac{4\delta}{\varphi_0}; \quad z < 2\delta, \\ H &\approx H_0 e^{-(1-i)\frac{z}{\delta}}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI, 35})$$

где z — углубление внутрь тела по нормали к его поверхности.

На биссектрисе угла OC приближенная формула дает следующие значения поля:

$$r \geq \frac{2\delta}{\varphi_0}; \quad \varphi = \frac{\varphi_0}{2};$$

$$H \approx H_0 2e^{-(1-i)\frac{r\varphi_0}{2\delta}} \left[1 + \frac{1-i}{6} \frac{r}{\delta} \left(\frac{\varphi_0}{2}\right)^3 - \frac{1-i}{120} \frac{r}{\delta} \left(\frac{\varphi_0}{2}\right)^5 - \frac{i}{36} \left(\frac{\varphi_0}{2}\right)^6 + \dots \right]. \quad (\text{VI, 36})$$

Отсюда ясно, что H изменяется вдоль биссектрисы OC приблизительно по закону обычного скин-эффекта, но с эффективной глубиной проникновения $\frac{2\delta}{\varphi_0}$ вместо δ . Так как φ_0

меньше прямого угла, то убывание поля вдоль биссектрисы протекает медленнее, чем вдоль нормали к сторонам угла:

$$\varphi_0 \leq \frac{\pi}{2}; \quad \frac{2\delta}{\varphi_0} > \delta.$$

Принимая во внимание множитель 2, отсутствующий в обычной формуле скин-эффекта, и учитывая только первый член ряда (VI, 36), можно найти, что падение $\text{mod } H$ в $e=2,72$ раза, которое при обычном скин-эффекте достигается на глубине δ , в данном случае, при изменении H вдоль биссектрисы угла, достигается приблизительно на глубине

$$r_\delta \approx \frac{3,4}{\varphi_0} \delta. \quad (\text{VI, 37})$$

Для прямого угла, учитывая первые четыре члена ряда (VI, 36), можно найти, что

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2}; \quad r_\delta = 2,44\delta. \quad (\text{VI, 38})$$

По приближенной формуле (VI, 37) для прямого угла получается $r_\delta = 2,16\delta$; при малых углах φ_0 формула (VI, 37) дает более точные результаты: тем точнее, чем меньше угол φ_0 .

Фиг. 86. Эффективная глубина проникновения магнитного поля вблизи ребра.

- а — грани пересекаются под углом 90° ;
- б — грани пересекаются под углом 45° ;
- в — грани пересекаются под углом $22,5^\circ$.

На фиг. 86 показана подсчитанная по формулам (VI, 35), (VI, 37) и (VI, 38) эффективная глубина проникновения поля, т. е. примерный ход кривой, вдоль которой амплитуда поля равна $\frac{1}{e} = 0,368$ от амплитуды поля на наружной поверхности тела, для углов $90, 45, 22,5^\circ$ ($\varphi_0 = \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{8}$).

Для эффективного значения плотности тока $j_{\text{эф}}$ можно получить упрощенные соотношения, аналогичные соотношениям (VI, 35), (VI, 36), (VI, 37) и (VI, 38) для магнитного поля. Однако распре-

ление тока сложнее распределения магнитного поля. При углублении внутрь тела вдоль биссектрисы угла в случае углов, равных или меньших прямого, j_{eff} сначала возрастает, не достигая, однако, того максимального значения, которое имеется на наружной поверхности вдали от ребра, затем убывает приблизительно так же, как и магнитное поле.

Приведенные в настоящем параграфе уравнения и графики показывают, что решение задачи закалки тел, имеющих острые углы, невозможно осуществить тем путем, который предложен автором (см. главу VIII, п. 2).

Если исходить из написанных выше уравнений, то закалка в этом случае может быть осуществлена применением двух частот следующим образом: сперва ведется нагрев на такой частоте, которая создает достаточно равномерный нагрев всей поверхности, за исключением острого угла, затем немедленно тело подвергают нагреву в поле весьма высокой частоты, которое прогревает острый угол, после чего производится охлаждение.

Этот метод окончательно еще не доработан.

ГЛАВА VII

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА ПОДОБИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ, СВЯЗАННЫХ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКОЙ И ЗАКАЛОЧНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

1. Общие данные о подобии

При рассмотрении явлений, связанных с закалочными устройствами, большую наглядность дает применение метода подобия, который, кроме того, может быть широко использован для расчетов электрических и тепловых процессов, а также отдельных деталей закалочного устройства, в том числе индукторов и трансформаторов.

Метод подобия заключается в том, что, имея определенные соотношения между рядом величин, выражаемые математически, например в виде дифференциальных уравнений, определяют те же зависимости между другими, аналогичными величинами. При этом не прибегают к решению новой системы уравнений, а пользуются лишь определенными соотношениями между величинами одной и другой системы, так называемыми *коэффициентами подобия*.

Для того чтобы этот метод можно было использовать, необходимо следующее:

1) функция, связывающая величины системы, значения параметров которой мы ищем, должна быть тождественной с функцией, связывающей известные нам параметры другой системы;

2) конфигурация тел, в которых протекают процессы, должна быть подобна для той и для другой систем;

3) начальные моменты должны соответствовать в смысле того или другого состояния и в смысле пространства¹.

2. Подобие в теплопередаче. Критерий подобия и коэффициенты подобия

В наиболее интересном для нас случае теплового подобия в качестве основного уравнения, связывающего самые разнообразные тепловые поля, которые встречаются при поверхностном нагреве, имеем приведенное выше уравнение теплопроводности (I, 1)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}.$$

¹ Г. Гребер и С. Эрк, Основы учения о теплообмене, ОНТИ, НКТП, 1936, стр. 158.

В качестве подобных тел нас могут интересовать в первую очередь цилиндры различных радиусов.

Подставив в уравнение (1,1) вместо Θ , x , t и a выражения $\Theta' = n_\Theta \Theta$, $x' = n_x x$, $t' = n_t t$ и $a' = n_a a$, получим

$$\frac{n_\Theta}{n_t} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{n_a n_\Theta}{n_x^2} \cdot a \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}. \quad (\text{VII, 1})$$

Сравнивая уравнение (I, 1) с уравнением (VII, 1), получим выражение

$$\frac{n_a n_t}{n_x^2} = 1. \quad (\text{VII, 2})$$

Нетрудно показать, что уравнение (VII, 2) можно обобщить, получив так называемый «критерий подобия»

$$\frac{at}{x^2} = F_0.$$

Из выражения (VII, 2) вытекает: если имеем распределение температур в теле при нестационарном процессе в пространстве и по времени для тела какой-либо формы, например, цилиндра радиуса r , то можно легко определить интересующие нас температуры для любого цилиндра с радиусом $r' = nr$, или вообще линейные размеры которого в n раз больше, чем у первого тела. Если принять в этом случае $a = \text{const}$, то получим следующие соотношения, в которые входят так называемые «коэффициенты подобия»:

$$\left. \begin{aligned} x' &= nx; & t' &= n^2 t; & p' &= \frac{1}{n} p; & w' &= \frac{1}{n^2} w. \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII, 3})$$

При этом

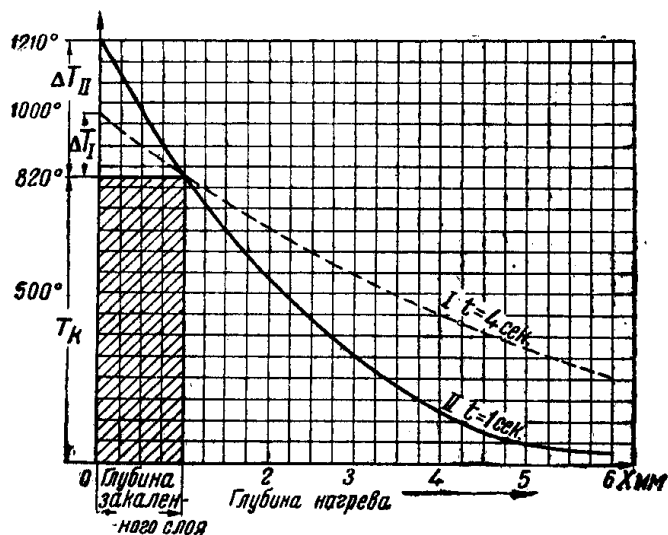
$$\Theta' = \Theta; \quad \Delta T' = \Delta T; \quad a' = a \quad \text{и} \quad \eta' = \eta.$$

Таким образом, переходя к нагреву тела с размерами в n раз большими, чем тело, для которого распределение температуры дано, например, на фиг. 87, исходя из соотношений (VII, 3), можем находить распределение температур, перегрев и к. п. д. из того же графика (фиг. 87), если за время нагрева t будем принимать не те величины, которые даны на графике, а в n^2 раз большие. Что касается удельной мощности p , то в этом случае она будет большей в $\frac{1}{n}$ раз.

Если необходимо изменять температуру на поверхности, или перегрев, то это изменение может быть произведено без изменения хода кривой распределения температур увеличением T до $T'' = mT$, где m — любое число. В этом случае необходимо лишь взять другие величины для p и w из соотношения

$$\frac{T''}{T} = \frac{p''}{p} = \frac{w''}{w} = m \quad (\text{VII, 4})$$

или $p'' = mp$, а также $w'' = mw$. При этом t и x остаются без перемены.



Фиг. 87. Распределение температуры в теле.

Выше были введены, с одной стороны, критерий подобия, а с другой, — коэффициенты подобия. Целесообразность использования обоих выражений диктуется тем, что критерий подобия дает *общую зависимость* между интересующими нас параметрами, вытекающую из основного уравнения, их связывающего.

Для каждого явления, выражаемого тем или другим уравнением, имеется лишь один критерий подобия.

Что же касается коэффициентов подобия, то они хотя и вытекают из критерия подобия, но могут относиться к частным случаям. При одном и том же критерии подобия часто можно иметь любое число различных коэффициентов подобия.

Для пояснения этого в табл. 9 дано несколько вариантов коэффициентов подобия для критерия подобия Фурье, исходя из зависимости

$$\frac{n a n t}{n_x^2} = 1.$$

Из табл. 9 следует, что для сохранения подобия при изменении линейных размеров в n раз и при сохранении той же стали, а значит, и ее теплопроводности ($a' = a$) время t должно быть увеличено

Таблица 9

Коэффициенты подобия для критерия подобия Фурье

Параметры	Коэффициенты подобия						
Размеры, x	n	n	1	n	1	$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$
Теплопроводность, a	1	n	$\frac{1}{n}$	n^2	n	n	1
Время, t	n^2	n	n	1	$\frac{1}{n}$	1	n

в n^2 раз. Однако при изменении материала, например при выборе стали с теплопроводностью в n раз большей, при таком же увеличении размеров достаточно увеличить время всего в n раз, и, наконец, при материале с теплопроводностью в n^2 большей нагрев потребует того же времени, что и при неувеличенных размерах.

Так же точно изменение коэффициентов теплопроводности в $\frac{1}{n}$ или в n раз при неизменных размерах тела влечет за собой изменение времени в n раз или в $\frac{1}{n}$ раз.

Здесь было рассмотрено подобие при независимом изменении одного из параметров x , t , a . При этом зависимость $\Theta = \varphi(x)$ или $\Theta = f(t)$ (фиг. 87) сохраняла свой вид, меняя лишь масштаб t или x . Иначе говоря, сказанное выше применимо для рассмотренных вопросов, относящихся к распределению температуры при нагреве и охлаждении.

Однако в главе IV, помимо распределения температуры при охлаждении, приведены также выражения для скорости охлаждения $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$, играющие основную роль в процессе закалки. Поэтому уместно задаться вопросом, применим ли метод подобия к решению задач, относящихся к скорости охлаждения, и каковы коэффициенты подобия. Ответ на этот вопрос дан в гл. VII п. 12.

3. Подобие электрических величин. Специальные единицы

Рассматривая вопросы прохождения переменного тока высокой частоты, а также низких частот при больших размерах проводов, возможно описывать распределение плотности тока, пользуясь не обычными единицами практической системы единиц, или системы CGSM, а специальными единицами. В последнем случае трактовка вопроса получает общность, при которой та или другая картина или те или другие соотношения будут справедливы для любых размеров тел.

В качестве такой единицы в данном случае может служить упомянутая выше (в главе I) глубина проникновения тока δ :

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

или

$$\delta = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

если ρ выражено в омсм.

Выражая размеры тела или провода и глубину закаленного слоя в единицах δ , получим распределение тока при его прохождении по индукторам и тот или другой тип закалки (см. фиг. 11), независимо от того, какие абсолютные значения примут размеры тела и величины ρ , f и μ .

Применение специальных единиц может быть использовано и при рассмотрении вопросов, связанных с постройкой индукторов и трансформаторов. Однако в этих случаях, кроме особых единиц, можно с успехом пользоваться описанным выше для тепловых явлений методом подобия.

4. Коэффициенты подобия для электрических величин R , L и M при отсутствии поверхностного эффекта

Рассматривая этот вопрос, укажем, что если не ставится каких-либо специальных условий, даваемых тем или другим уравнением, то коэффициенты подобия для наиболее употребительных в электротехнике величин могут быть легко найдены из основных уравнений, определяющих данные величины. Так, для величин сопротивления, индуктивности, взаимной индуктивности в зависимости от изменения линейных размеров проводника в n раз, исходя из уравнения Ома и уравнений, определяющих величины L и M через линейные размеры, при $x' = nx$; в качестве коэффициентов подобия имеем

$$R' = \frac{1}{n} R; \quad L' = nL; \quad M' = nM. \quad (\text{VII, 5})$$

Выражения (VII, 5) указывают на возможность ограничить работы по расчету приведенных выше величин для всех случаев проводящих тел, подобных по форме, расчетом данных для одного случая, например, для тела с одним из размеров, равным x . Для всех других случаев подобных тел или систем их с размерами $x' = nx$ все необходимые параметры можно получить по закону подобия из соотношений (VII, 5).

5. Коэффициенты подобия для R , L и M при поверхностном эффекте.

Первый случай: $\omega = 2\pi f = \text{const}$. Неполное подобие

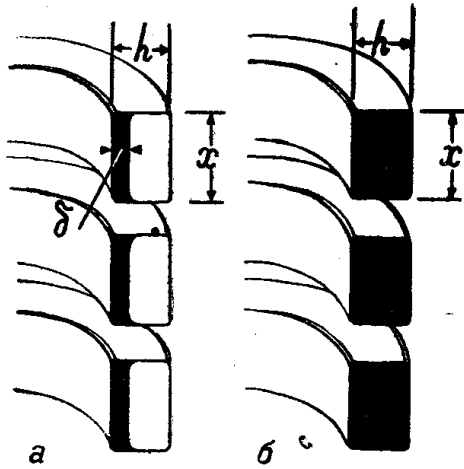
В тех случаях, когда, помимо основных соотношений из которых вытекали коэффициенты подобия, при расчете даны еще и другие зависимости, то для коэффициентов подобия получим также другие соот-

ношения, например, нас будет интересовать в дальнейшем случай, когда сопротивление зависит не только от геометрических размеров, но также и от явлений проникновения тока, которые ограничат площадь сечения провода, занятую током. В этом случае вместо уравнения (VII, 5) будем иметь следующие зависимости:

при $f = \text{const}$ ($\delta = \text{const}$) и $h > 4\delta$,
если $x' = nx$, то

$$R' = R, \quad L' \approx nL, \quad M' \approx nM, \quad (\text{VII}, 6)$$

где h — толщина провода (фиг. 88).



Фиг. 88. Распределение плотности тока в проводах.

a — при наличии поверхностного эффекта;
б — при отсутствии поверхностного эффекта.

6. Коэффициенты подобия для R , L и M при поверхностном эффекте. Второй случай: ω может меняться. Полное подобие

Если частота должна сохранять постоянную величину ($\omega = \text{const}$), как в первом случае, то полное подобие не может быть сохранено, так как толщина слоя, несущего ток h (фиг. 88), не меняет своей величины. Поэтому активная часть провода и не сохраняет подобия. Для сохранения полного подобия активной части провода необходимо при изменении линейных размеров x изменять также и частоту. Это изменение легко определяется из уравнения (I, 4) для глубины проникновения:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} = \sqrt{\frac{\rho}{4\pi^2 \mu \omega}} = \sqrt{\frac{k}{\omega}},$$

откуда

$$\omega = \frac{k}{\delta^2} \quad (\text{VII}, 7)$$

или, заменяя δ' на $n\delta$, получим

$$\omega' = \frac{k}{\delta'^2} = \frac{k}{n^2 \delta^2} = \frac{1}{n^2} \omega. \quad (\text{VII}, 8)$$

Из уравнения (VII, 8) следует, что коэффициент подобия для частоты ω в этом случае будет $\frac{1}{n^2}$ и для коэффициентов подобия всех интересующих нас величин, если $x' = nx$, получим

$$\omega' = \frac{1}{n^2} \omega; \quad R' = \frac{1}{n} R; \quad L' = nL; \quad M' = nM \quad (\text{VII}, 9)$$

откуда следует также

$$(\omega L)' = \frac{1}{n} \omega L.$$

Как следует из уравнения (VII, 9), коэффициенты подобия в этом случае будут те же, что и в первом случае, с той лишь разницей, что коэффициенты подобия L и M там были лишь приближенными, здесь же они точны.

7. Метод подобия при расчете трансформаторов и индукторов при наличии поверхностного эффекта

Если задаться вопросом, какие коэффициенты подобия будут применимы для серии подобных по форме приборов, работающих по принципу индукции, например для индукторов или трансформаторов, поста-

$$\frac{R}{\omega L} = \frac{R'}{\omega' L'} = \text{const.} \quad (\text{VII}, 10)$$
$$\frac{R}{\omega L} = \frac{R'}{\omega' L'} = \frac{\frac{1}{n} R}{\omega' n L} = \frac{R}{\omega' n^2 L}, \quad (\text{VII}, 11)$$
$$\omega' n^2 = \omega. \quad (\text{VII}, 11a)$$

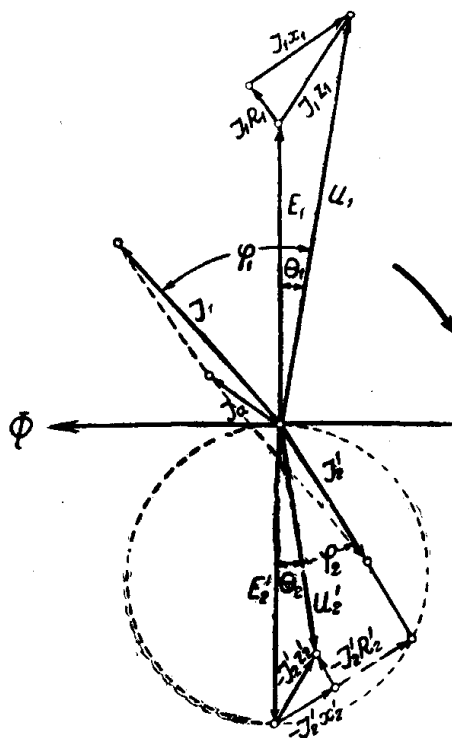
Иначе говоря, при увеличении линейных размеров устройств в n раз для сохранения всех характеристик необходимо уменьшение частоты в n^2 раз, или, как это видно по уравнению (VII, 7), необходимо изменить глубину проникновения в n раз, т. е. $\delta' = n\delta$.

Рассмотрим с этой точки зрения изменение линейных размеров в n раз у закалочного трансформатора и индуктора. Для коэффициентов подобия, согласно сказанному ранее и уравнению (VII, 9), при достаточно больших размерах провода, т. е. при $h > 4\delta$ получим:

$$\left. \begin{aligned} x' &= nx_0; & L' &= nL; & R' &= \frac{1}{n} R; & M' &= nM; \\ \omega' &= \frac{1}{n^2} \omega; & \omega' L' &= \frac{1}{n} \omega L; & \eta' &= \eta. \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII}, 12)$$

$$G' = n^3 G.$$
$$\frac{n_U}{n_I n_R} = 1, \quad (\text{VII}, 13)$$

135



Фиг. 89. Векторная диаграмма трансформатора или вообще прибора, работающего по принципу индукции.

$n_R = \frac{1}{n}$ для других величин из уравнения (VII, 13), получим также

$$I' = nI; \quad P' = U'I' = nP; \quad p' = \frac{1}{n} p; \quad w' = \frac{1}{n^2} w, \quad (\text{VII, 14})$$

так как

$$\frac{n_U}{n_I n_R} = 1 = \frac{1}{n_I \frac{1}{n}} = \frac{n}{n_I},$$

а значит,

$$n_I = n.$$

Кроме того, подобным же образом из уравнения индукции

$$U = k\Phi\omega \quad (\text{VII, 15})$$

можно получить $\Phi' = n^2\Phi$; $B = \text{const}$ и из

$$\frac{I}{q} = j$$

получим

$$j' = \frac{1}{n} j. \quad (\text{VII, 16})$$

Такой трансформатор будет менее нагружен в смысле использования материала. Это видно из соотношения

$$k = \frac{P}{G} \text{ и } k' = \frac{P'}{G'},$$

откуда, подставляя $P' = nP$ и $G' = n^3G$, получим для коэффициента использования трансформатора

$$k' = \frac{nP}{n^3G} = \frac{1}{n^2} k. \quad (\text{VII, 17})$$

Вследствие отхода от диаграммы фиг. 89 возможно получение более высокого использования.

Так как индуктор вместе с закаливаемым телом представляет собой тот же трансформатор, то все сказанное будет относиться с электрической стороны и к нему.

В табл. 10 приведены коэффициенты подобия для рассмотренного случая.

Таблица 10

Коэффициенты подобия для трансформатора при $\omega' = \frac{1}{n^2} \omega$, если $x' = nx$

Величина	Коэффициент подобия	Величина	Коэффициент подобия	Величина	Коэффициент подобия
U	1	IR	1	$I\omega L$	1
I	n	R	$\frac{1}{n}$	L	n
$P = UI$	n	$j = \frac{I}{q}$	$\frac{1}{n}$	w	$\frac{1}{n^2}$
$\frac{P}{G}$	$\frac{1}{n^2}$	$I^2 R$	n	$\frac{R}{\omega L}$	1
q	n^2	G	n^3	$\frac{I^2 R}{G}$	$\frac{1}{n}$
Φ	n^2	B	1	p	$\frac{1}{n}$

В табл. 10 видно, что в рассматриваемом случае, т. е. предполагая, что при изменении размеров трансформатора одновременно будет меняться и частота $\omega' = \frac{1}{n^2} \omega$ — кажущаяся мощность трансформатора UI или индуктора будет линейно возрастать с увеличением линейных размеров $P' = nP$. При этом использование трансформатора падает, так как

$$\frac{P'}{G'} = \frac{P}{G} \frac{1}{n^2}.$$

Поэтому понижение частоты хотя и дает полное подобие, однако оно невыгодно, и без особой надобности его не следует применять, заменяя подобием при постоянной частоте.

8. Коэффициенты подобия для величин, связывающих электрическую и тепловую задачи

Если возвратиться к коэффициентам подобия, приведенным выше для тепловой задачи, то окажется, что величины, связывающие электрическую и тепловую задачи, а именно, удельная поверхностная мощность p и объемная плотность мощности w , в соответствии с уравнениями (VII, 3) и (VII, 14), имеют одни и те же коэффициенты подобия и в тепловой и в электрической задачах. Отсюда следует, что при изменении линейных размеров трансформатора, индуктора и нагреваемого тела в n раз, $x' = nx$, получим в такой системе одни и те же электрические характеристики, выраженные графиками (фиг. 87 и 89), и те же кривые распределения температур, а следовательно, тот же перегрев, электрический и термический к. п. д. и, наконец, тот же тип нагрева под закалку.

Из описанного выше, кроме того, следует, что если подобие дает полное и широкое разрешение задачи быстрого и простого определения всех необходимых параметров при решении чисто тепловой задачи, то при разрешении электрической задачи возникает указанная выше необходимость изменения частоты. Это влечет за собой уменьшение коэффициента использования прибора. Также может возникнуть некоторое, хотя и небольшое, нарушение подобия в отношении ряда электрических параметров, если частоту оставлять неизменной, независимо от изменения линейных размеров.

9. Примеры использования подобия для определения параметров закалочного устройства.

Первый случай: частота может меняться при изменении размеров

В случае применения подобия при переменной частоте для определения размеров индуктора вместе с изменением размеров получаем также наиболее целесообразную для закали частоту. Поэтому в некоторых случаях изменение частоты вместе с размерами может нас удовлетворить. Особенно целесообразен этот путь при питании устройства ламповым генератором, где частота может сравнительно легко меняться в требуемых размерах. В машинных установках частота фиксирована, если установка уже закончена и приходится на ней вести закалку. Здесь метод подобия с изменением частоты можно с успехом применять при определении данных новой установки для закали тех или других объектов.

В качестве исходных данных при применении метода подобия могут быть использованы данные, полученные на модели, либо данные, полученные ранее для какого-либо размера посредством подсчета.

В качестве примера рассмотрим следующую задачу: требуется определить размеры трансформатора, индуктора и все электрические данные, относящиеся к закалке какого-либо объекта, например, цилиндра диаметром и высотой 100 мм при перегреве $\Delta T = 100^\circ$ и глубине закали 6 мм.

Из опыта известны (табл. 25 и 26 стр. 202) данные по закалке цилиндра $d = 50$ мм.

Коэффициент подобия для линейных размеров в данном случае

$$n = \frac{100}{50} = 2,$$

примем

$$x_k = \frac{6}{2} = 3 \text{ мм.}$$

Для этой толщины и $d = 50$ мм по табл. 25 получаем:

$$p_1 = 1,2 \text{ квт/см}^2;$$

$$p_2 = 2,7 \text{ квт/см}^2;$$

$$t_k = 3,4 \text{ сек.}$$

Пользуясь подобием, для диаметра 100 мм получим:

$$x'_k = 3 \cdot 2 = 6 \text{ мм.}$$

$$p'_1 = \frac{1,2}{2} = 0,6 \text{ квт/см}^2;$$

$$p'_2 = \frac{2,7}{2} = 1,35 \text{ квт/см}^2;$$

$$t'_k = 3,4 \cdot 2^2 = 15 \text{ сек.};$$

$$f = \frac{2000}{2^2} = 500 \text{ гц.}$$

В данном случае вполне целесообразно использовать подобие при переменной частоте.

10. Второй случай: использование метода подобия при постоянной частоте.

Применение в случае расчета трансформатора

Метод подобия используют при определении данных для закали самых разнообразных деталей на имеющейся машинной установке, когда частоту нельзя изменить. В этом случае иногда приходится производить закалку не на оптимальной частоте. Разберем, в какой мере может быть здесь использован метод подобия и какие он внесет неточности.

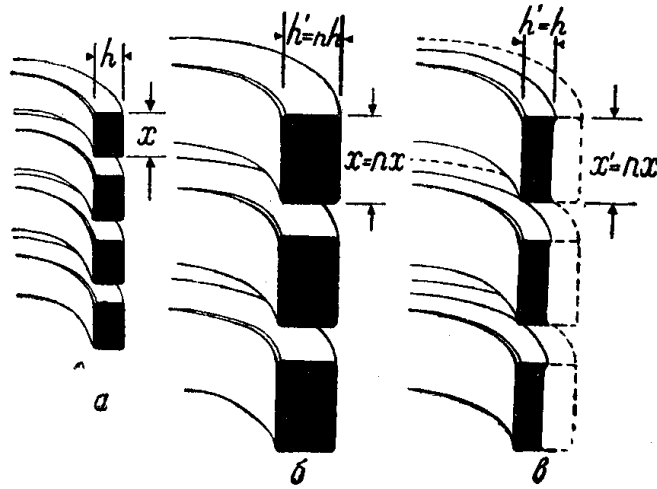
Прежде всего отметим, что для тепловой задачи он пригоден полностью, если не считать, что отказ от изменения частоты влечет за собой изменение активного слоя. Однако это оказывает сравнительно небольшое влияние на распределение температур, перегрев и к. п. д., особенно если отступления не выходят за некоторые пределы, что в данном случае часто и бывает. В этом можно убедиться по кривым распределения температуры, показанным на фиг. 15, 19, 21 и 24.

В тепловой задаче, пользуясь методом подобия и данными опыта или имеющегося подсчета, можно определить для заданного перегрева ΔT получаемый к. п. д., удельную мощность p и время нагрева t , а также потребную для закали энергию.

Переходя к электрической части — индуктору и трансформатору, можно использовать подобие, подбирая коэффициенты его для различных

параметров такими, чтобы отступление от точных значений было возможно малым.

В качестве примера, на котором установим возможность использования метода подобия при постоянной частоте, возьмем воздушный трансформатор.



Фиг. 90. К вопросу подобия. Распределение плотности тока в трансформаторах разного размера при постоянной частоте.

a—распределение плотности тока при линейных размерах x ; *б*—то же при $x'=nx$; $h'=nh$ и полном подобии; *в*—то же при $x'=nx$; $h'=h$ и неполном подобии.

Условие сохранения постоянства частоты влечет за собой сохранение постоянной толщины слоя, по которому идет ток, как бы ни увеличивали толщину меди. В этом заключается отступление в подобии размеров. Вместо $h'=nh$, как следовало бы при полном подобии (фиг. 90, *a*, *б*), получаем $h'=h$ (фиг. 90, *в*). В этом случае рабочее сечение меди растет пропорционально n , а не n^2 , поэтому

$$q' = nq \quad (\text{VII, 18})$$

и вес меди будет

$$G' = n^2 G, \quad (\text{VII, 19})$$

а не

$$n^3 G.$$

Если при изменении размеров основным условием сделать постоянство плотности тока, то легко получить коэффициент подобия для силы тока. Так как

$$\frac{I'}{q'} = \frac{I}{q} = \text{const}, \quad (\text{VII, 20})$$

критерий подобия

$$\frac{n_I}{n_q} = 1, \quad (\text{VII, 21})$$

то согласно уравнениям (VII, 18) и (VII, 20), для коэффициента подобия получим

$$I' = nI. \quad (\text{VII, 22})$$

Так же точно из условия сохранения постоянного отношения между индуктивным напряжением ωI и напряжением трансформатора U , что необходимо для хотя бы приближенного сохранения векторной диа-

граммы, для коэффициента подобия напряжения найдем значения, пользуясь следующими уравнениями:

$$\frac{\omega IL}{U} = \text{const}, \quad (\text{VII}, 23)$$

$$\frac{n_{\omega} n_L n_I}{n_U} = 1. \quad (\text{VII}, 24)$$

Подставляя значения $n_{\omega} = 1$, $n_L = n$ и $n_I = n$ из уравнения (VII, 6), получим

$$U' = n^2 U. \quad (\text{VII}, 25)$$

Таким образом коэффициент подобия для напряжений будет равен n^2 .

Исходя из полученных коэффициентов подобия для U и I , найдем все интересующие нас величины коэффициентов подобия (табл. 11).

Таблица 11

Коэффициенты подобия для трансформатора при $\omega = 2\pi f = \text{const}$.
Линейные размеры x за исключением размера h увеличены в n раз; $h' = h$.
Приближенное подобие

Величина	Коэффициент подобия	Величина	Коэффициент подобия	Величина	Коэффициент подобия
U	n^2	IR	n	$I\omega L$	n^2
I	n	R	1	L	n
$P = UI$	n^3	$j = \frac{I}{q}$	1	W	1
$\frac{P}{G}$	n	$I^2 R$	n^2	$\frac{R}{\omega L}$	$\frac{1}{n}$
q	n	G	n^2	$\frac{I^2 R}{G}$	1
Φ	n^2	B	1	p	1

Из приведенных данных ясно, что в векторной диаграмме для полученных вновь значений вектора, отвечающих падению напряжения IR и $I\omega L$, будут иметь различные коэффициенты подобия, тогда как $I\omega L$ и U , наоборот, будут иметь одинаковые коэффициенты подобия.

Посмотрим, какое влияние на численные значения окажет это отступление от подобия.

Для воздушного трансформатора 400 квт 300 000 гц имеем: $I_1 x_1 = 208$ в; $I_2 x_2' = 500$ в; $I_1 R_1 = 15,14$ в; $I_2 R_2' = 8,64$ в; при напряжении $U_1 = 5408$ в.

Из приведенных данных нетрудно убедиться, что влияние на напряжение короткого замыкания величины IR ничтожно, так как она не превышает 0,5% U . Поэтому изменение этой величины, не отвечающее подобию, не играет никакой роли, и в случае сохранения постоянного значения частоты для расчета процесса закалки можно использовать приведенные в табл. 11 значения коэффициентов подобия и в отношении закаливаемого тела, индуктора и трансформатора, так как индуктор в смысле зависимостей представляет собой также трансформатор, близкий к воздушному.

11. Метод подобия при моделировании

Хорошо известно, что подобие часто применяют в механике при моделировании, однако и в поверхностной закалке с успехом можно решать некоторые вопросы, применяя моделирование и метод подобия.

Моделированием можно здесь пользоваться в следующих случаях:

1. При закалке крупных предметов сложной формы, когда процесс в смысле закалки трудно свести к системе простых по форме тел, например, когда тело вращения имеет ряд диаметров и переходов между ними, или ряд выступов по образующей при наличии щек.

2. При одновременной закалке зубчатых колес, фрез, метчиков крупного размера.

3. При закалке тел с резьбой, с рифлением, с выточками.

4. При закалке тел значительного размера или большой стоимости из стали, отличающейся от наиболее исследованных, когда необходимо установить для этой стали режим закалки в смысле распределения температур.

При моделировании часто необходимо менять частоту, пользуясь коэффициентами подобия, приведенными в табл. 12.

Таблица 12

Коэффициенты подобия

Параметр	Обозначение	Коэффициент подобия	Параметр	Обозначение	Коэффициент подобия
Линейные размеры	x	n	Удельная мощность на 1 см^2	p	$\frac{1}{n}$
Частота	f	$\frac{1}{n^2}$	Плотность мощности на 1 см^3	w	$\frac{1}{n^2}$
Время нагрева	t	n^2			

Если меняется температуропроводность металла a , то увеличение ее в n раз должно быть компенсировано увеличением времени в $\frac{1}{n}$ раз или увеличением линейных размеров в $\sqrt{n}$ раз.

При увеличении линейных размеров в n раз возможно также одновременно увеличить t в n раз и a в n раз, что следует из выражения

$$\frac{n_a n_t}{n_x^2} = 1$$

и табл. 9, столбец 2.

При указанных изменениях параметров останутся постоянными ΔT , Θ и η .

12. Применения подобия в вопросах, связанных со скоростью охлаждения

При рассмотрении вопросов распределения температуры Θ в теле при его нагреве подобие дает возможность определить время t , удельную мощность p и температуропроводность a , пользуясь кривыми распределения температуры, найденными ранее для подобного тела, отличающегося своими размерами (коэффициенты подобия были приведены в табл. 9). Если стараться применить подобие для решения вопросов,

связанных со скоростью охлаждения, то прежде всего будет совершенно ясно, что коэффициенты подобия (табл. 9) здесь непосредственно нельзя использовать, так как подобие связано с размерностью величины, а размерность температуры отлична от размерности скорости охлаждения.

Однако, рассматривая уравнения (IV, 16), (IV, 17) и (IV, 18), видим, что если умножить обе части уравнения (IV, 18) на величину t , то правая и левая части будут иметь размерность температуры:

$$\begin{aligned}\Theta &= \varphi \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right); \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} &= \frac{1}{4 \sqrt{at^3}} \varphi_1 \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right); \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} t &= \frac{1}{4 \sqrt{at}} \varphi_1 \left(\frac{x}{2 \sqrt{at}} \right).\end{aligned}\quad (\text{VII, 26})$$

В этом случае, как и ранее, изменение величин x , a , t и p на x' , a' , t' и p' в правой части при использовании коэффициентов подобия (табл. 9) не повлечет за собой изменения ее величины. Следовательно, останется неизменной величина $\frac{\partial \Theta}{\partial t} t$, т. е.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} t = \varphi(x, t, a) = \varphi_1(x', t', a') = \text{const.}$$

Так как для t при $a'=a$ коэффициент подобия будет $t'=n^2 t$, то при изменении линейных размеров тела x на $x'=nx$ скорость охлаждения не будет оставаться неизменной, как температура Θ , а примет значение

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right)' = \frac{1}{n^2} \frac{\partial \Theta}{\partial t}.\quad (\text{VII, 27})$$

Таким образом увеличение размеров тела в n раз при условии $a'=a=\text{const}$ и при сохранении неизменным распределения температуры даст уменьшение скорости охлаждения для соответственных моментов времени в n^2 раз. При этом значения времени t , определяющие моменты, для которых берем скорости, будут $t'=n^2 t$.

Если в качестве примера взять случай, изображенный на фиг. 47, то на глубине $x=1$ см в момент времени $t=16,6$ сек. температура (согласно фиг. 48, а) примет значение $\Theta_x=400^\circ$, а скорость охлаждения (см. фиг. 48, б) будет иметь значение $\frac{\partial \Theta}{\partial t}=10,4$ град/сек.; $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right)_{550} =$

30 град/сек. Начальная температура на поверхности будет $\Theta_0=925^\circ$.

Зададимся теперь вопросом, какие значения будут иметь величины t , $\frac{\partial \Theta}{\partial t}$ и $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right)_{550}$, если линейные размеры x уменьшим в m раз. Пусть при этом температура на поверхности Θ_0 и температура на уменьшенной в m раз глубине сохраняет прежние значения:

$$x' = \frac{x}{m}\quad (\text{VII, 28})$$

и

$$\Theta_0 = 925^\circ \text{ и } \Theta_x' = 400^\circ.\quad (\text{VII, 29})$$

Так как для сохранения постоянства температур из критерия подобия [уравнения (VII, 2) и (VII, 3)] для коэффициентов подобия имеем

$x' = nx$ и $t' = n^2 t$, то из уравнения (VII, 28) для коэффициента подобия n получим

$$n = \frac{1}{m}. \quad (\text{VII, 30})$$

Кроме того, из уравнений (VII, 26) и (VII, 27) имеем

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} t = \text{const}$$

и

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)' = \frac{1}{n^2} \frac{\partial \theta}{\partial t},$$

откуда

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)' = m^2 \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (\text{VII, 31})$$

Возьмем, например, $n = \frac{1}{16} = 0,0625$; при $x = 1$ см, получим

$$x' = nx = 1 \cdot 0,0625 = 0,0625 \text{ см},$$

$$t' = n^2 t = (0,0625)^2 16,6 = 0,06 \text{ сек.};$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)' = \frac{\partial \theta}{\partial t} \frac{1}{n^2} = -10,4 \frac{1}{(0,0625)^2} = 2 \cdot 700 \text{ град/сек.}$$

По фиг. 48,в имеем

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{550} \approx -30 \text{ град/сек.},$$

откуда

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)'_{550} = \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{550} \frac{1}{n^2} = -7700 \text{ град/сек.}$$

ГЛАВА VIII

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОДОБИЯ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА И ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАЮЩИХ ПОЛНУЮ ЗАКАЛКУ БЕЗ ПЕРЕГРЕВА

1. Два рода процессов, происходящих при нагреве под закалку

При нагреве стали под закалку происходит ряд сложных физико-химических процессов. Основными параметрами, определяющими эти процессы, являются время и температура, при которых протекают эти процессы.

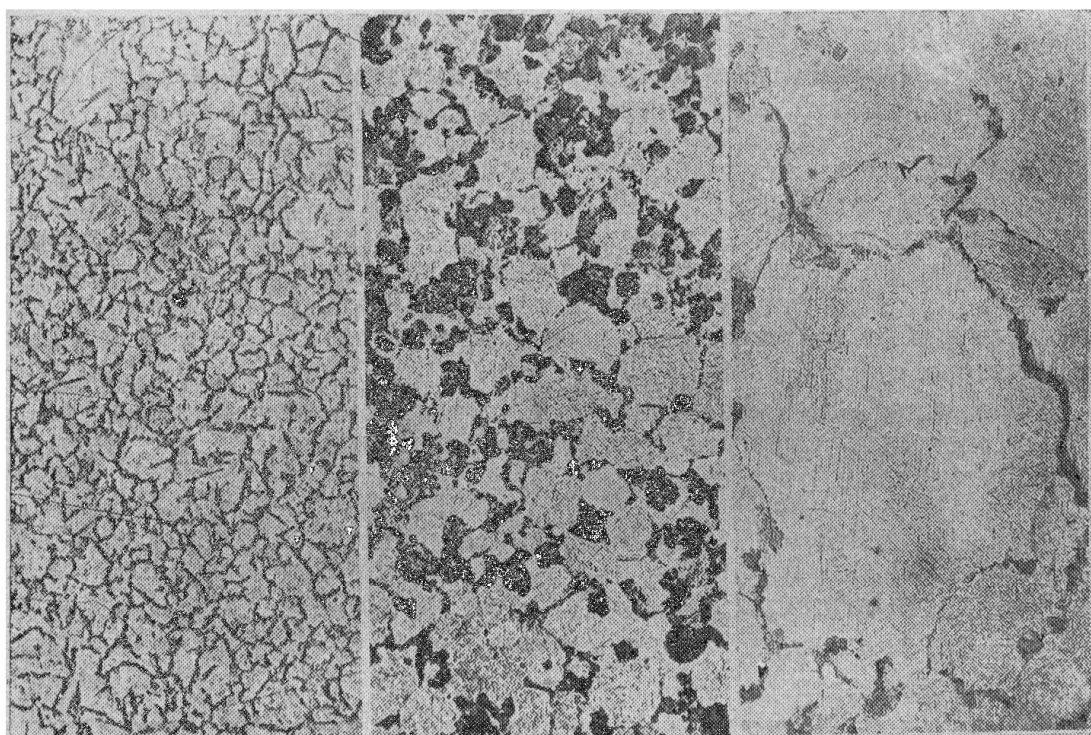
Указанные процессы можно, кроме того, разделить на две группы.

К первой группе относятся те процессы, которые являются целью нагрева под закалку. В конечном счете они приводят к превращению феррита, цементита и их смесей в аустенит, а также к выравниванию концентрации примесей, в первую очередь углерода в аустените. Ввиду этого должно быть использовано все, что возможно быстрее и совершеннее приводит к этому конечному состоянию при нагреве под закалку.

Вторая группа процессов, наоборот, является лишь сопутствующей. Эти процессы не только не способствуют конечным целям закалки, но вызывают лишь понижение качества закаленного слоя. Необходимость не допускать развития вредного влияния этих процессов вносит некоторые ограничения в условиях проведения процессов первой группы.

Нежелательные превращения заключаются в энергичном росте зерен аустенита, которые увеличивают свои размеры в сотни и тысячи раз и в значительной степени вытесняют зерна нормальной величины (фиг. 91). В результате после охлаждения получается структура перегретой стали, обладающей весьма пониженными механическими свойствами.

Все, что относится к превращениям первой и второй групп, достаточно разработано в специальной металлургической литературе, поэтому, казалось бы, оно не должно являться предметом содержания настоящей работы. Однако индукционный метод создает несколько отличную обстановку для этих превращений и необходимо остановиться на этом. Вызвано это также и тем, что во многих случаях взгляды и нормы, получившие практическое подтверждение и вполне рациональные в отношении сплошной закалки, или, вернее, в отношении закалки при сплошном нагреве, ошибочны для индукционной закалки. Такие взгляды дают неверные направления для развития индукционного метода.



Как показывает опыт, в большинстве случаев, особенно при углеродистых сталях, здесь никаких затруднений не встречается, так как короткое время нагрева компенсируется более высокой температурой. Однако при специальных сталях и при закалке тонких предметов на небольшую глубину бывает, что невозможно осуществить индукционную закалку из-за опасения сквозного прогрева или неполного растворения аустенита.

При составлении этой главы автор пользовался в области металловедения консультацией канд. техн. наук М. М. Замяткина.

2. Образование аустенита при нагреве под закалку. Зависимость между температурой и временем нагрева

Хотя образование аустенита и выравнивание его состава достаточно сложный процесс, однако в нем можно выделить основной процесс, обладающий наибольшей длительностью. Этим процессом является процесс диффузии и для нахождения основных закономерностей можно им ограничиться и из него вывести зависимость между временем нагрева, температурой и геометрическими соотношениями, относящимися к микроструктуре.

Дифференциальное уравнение, которому подчиняется явление диффузии, может быть выведено из первого закона Фика, аналогичного закону Фурье для потока тепла¹:

$$q = D \text{grad } C, \quad (\text{VIII, 1})$$

где q — поток вещества;

D — коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{сек}$;

C — концентрация.

Это уравнение, совершенно подобное уравнению теплопроводности, можно написать в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (\text{VIII, 2})$$

или для диффузии в одном направлении

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (\text{VIII, 3})$$

Что касается коэффициента диффузии D , то его можно представить следующим уравнением:

$$D = A e^{-\frac{Q}{RT}}. \quad (\text{VIII, 4})$$

Q и A — коэффициенты, из которых $A = D$ при $T = \infty$ называется *температуронезависимым фактором*, причем T выражено в $^\circ\text{K}$; Q — величина, выражающая энергию, которой должен обладать атом, чтобы иметь возможность переменить место с соседним атомом.

Обозначим

$$\frac{R}{Q} = K. \quad (\text{VIII, 5})$$

¹ В. С. Бугаков и В. Д. Нескучаев, Диффузия металлов, ОНТИ, НКТП 1937, стр. 5, 6, и 44.

Тогда из уравнения (VIII, 4) получим

$$D = Ae^{-\frac{1}{KT}} \quad (\text{VIII, 6})$$

Для решения поставленной в этой главе задачи, состоящей в определении температуры и отвечающего ей времени, при которых будет протекать процесс образования аустенита, воспользуемся данными, получаемыми из опыта закалки образцов, изготовленных из стали интересующей нас марки, и описанным в предыдущей главе методом, т. е. воспользуемся методом подобия.

Этот метод и в данном случае позволит достаточно просто и быстро определить температуру и время нагрева.

Так как основным уравнением, определяющим процесс, будет уравнение диффузии (VIII, 3), которое по своему виду тождественно с уравнением теплопроводности (I, 1), то здесь можно полностью использовать все приведенные выше указания о применении метода подобия к решению вопросов, связанных с теплопроводностью и уравнением (I, 1).

Так, из уравнения (VIII, 3), можно написать выражение, сходное с уравнением (VII, 2).

$$\frac{n_D n_t}{n_x^2} = 1. \quad (\text{VIII, 7})$$

На основании этого выражения можно определить коэффициенты подобия в виде любого числа вариантов, из которых в табл. 13 приведено пять наиболее простых. При этом предполагается, что либо линейные размеры x , относящиеся к размерам зерен (микроструктуры), как это дано в вариантах 1—3, изменятся в n раз и вместо x будет взято $x' = nx$, или же во столько же раз изменятся параметры t или D , как это принято в вариантах 4 и 5.

Из табл. 13 и уравнения (VIII, 6) следует, что если известно время нагрева закаливаемого слоя t_k то возможно определить время, необходимое для осуществления того же процесса при другой температуре.

Для пояснения, пользуясь данными табл. 13 и уравнением (VIII, 6), решим несколько задач, относящихся к нагреву стали под закалку, предварительно условившись, какую величину мы будем принимать за x .

Под величиной x , характеризующей линейную протяженность участков, которые должны быть заполнены примесями в результате диффузии, следует понимать среднее расстояние между отдельными включениями, подлежащими перераспределению. В случае наличия фазы, не содержащей примеси (например, феррита), под x следует понимать средний диаметр зерен этой фазы.

Так как размеры зерна принято определять по числу зерен, занимающих определенную площадь, например, находящихся в круге того

Таблица 13
Коэффициенты подобия для уравнения диффузии (VIII, 7)

Вариант	Параметры		
	x	t	D
1	n	n^2	1
2	n	n	n
3	n	1	n^2
4	1	n	$\frac{1}{n}$
5	1	$\frac{1}{n}$	n

или другого диаметра или на площади 1 см^2 , то величина x может быть связана с этим определением следующим приближенным соотношением:

$$x = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{ см}, \quad (\text{VIII, 7 а})$$

где N — число зерен на 1 см^2 . В том случае, если дано число зерен в круге $d \text{ см}$, то величина x будет

$$x = \frac{\pi d^2}{\sqrt{N}} \text{ см}. \quad (\text{VIII, 7 б})$$

При

$$\begin{aligned} d &= 1 \text{ см} \\ x &= \frac{\pi}{\sqrt{N}} \text{ см}. \end{aligned}$$

Один из методов определения среднего размера зерна приведен И. С. Гаевым («Металлург», 1936, № 11).

Задача 1. Известен режим нагрева для стали определенной марки со строением, характеризующимся определенным расстоянием между включениями x , т. е. известны температура нагрева T_k и время нагрева t .

Требуется найти время нагрева для стали той же марки с расстоянием между включениями $x' = nx$.

Здесь возможны три решения, согласно трем первым строкам табл. 16, для которых, как это и задано, величина x непостоянна.

Первое решение дает первая строка, из которой следует, что оставляя ту же температуру закалки T_k ($D = \text{const}$), согласно уравнению (VIII, 6), следует увеличить время в n^2 раз, взяв вместо t :

$$t' = n^2 t \text{ сек.}$$

Второе решение вытекает из второй строки табл. 13. Для получения того же результата, что и при первом решении, достаточно увеличить время t в n раз, взяв вместо t время $t' = nt$, и одновременно увеличить коэффициент диффузии D в n раз, взяв вместо D величину $D' = nD$. Увеличение коэффициента диффузии D можно осуществить в свою очередь согласно уравнению (VIII, 6), увеличив температуру. Значение температуры, дающее увеличение коэффициента диффузии в n раз, можно найти из уравнения (VIII, 6) в следующем виде:

$$T'_k = \frac{T_k}{1 - kT_k \ln n}, \quad (\text{VIII, 8})$$

где T'_k и T_k выражены в $^\circ\text{K}$.

Следует заметить, что всегда $D < A$, поэтому число n имеет верхний предел:

$$n < e^{\frac{1}{kT_k}}.$$

Третье решение. Сохранив время постоянным ($t = \text{const}$), можно получить нужный результат, если увеличить коэффициент диффузии в n' раз, согласно третьей строке табл. 13. Этого достигают, как и в предыдущем случае, увеличением температуры, определяемой из уравнения (VIII, 6).

Тогда для температуры получим

$$T'_k = \frac{T_k}{1 - 2kT_k \ln n}. \quad (\text{VIII, 9})$$

В этом случае по указанной выше причине число n имеет верхний предел

$$n < e^{\frac{1}{2kT_k}}.$$

Задача 2. Закаливается сталь определенной марки с определенной величиной зерна. Для режима нагрева известна температура выдержки T_k и время t .

Требуется определить температуру выдержки T'_k , если необходимо увеличить время выдержки в n раз.

Решение здесь будет лишь одно: согласно четвертой строке табл. 13. Оно будет заключаться в уменьшении коэффициента диффузии в n раз, что даст искомую температуру выдержки

$$T'_k = \frac{T_k}{1 + kT_k \ln n}. \quad (\text{VIII}, 10)$$

В данном случае число n может иметь любое значение.

Задача 3. Для тех же условий, что и в задаче 2, требуется увеличить температуру выдержки в n раз, взяв

$$T'_k = nT_k.$$

Решение получим из уравнения (VIII, 6) и, пользуясь пятой строкой табл. 13.

При увеличении температуры в n раз для коэффициента диффузии получим

$$D' = D e^{\frac{1}{kT_k} \left(1 - \frac{1}{n}\right)}. \quad (\text{VIII}, 11)$$

На основании пятой строки время выдержки будет

$$t' = t e^{-\frac{1}{kT_k} \left(1 - \frac{1}{n}\right)}. \quad (\text{VIII}, 12)$$

Приведенный метод расчета является лишь грубо ориентировочным, так как он вытекает из упрощенного рассмотрения вопроса, при котором все сложное явление образования аустенита сведено к явлению диффузии; это допустимо лишь в первом приближении. Однако этот метод может дать для ведения процесса индукционной закалки масштабы тех изменений, которые дает для интересующих нас параметров изменение одного из них. Надо считать некоторым шагом вперед введение математических зависимостей и числовых измерителей в ту область, в которой до сих пор все строилось на большом числе опытных данных, не дающих указаний на общие закономерности.

Этот недостаток особенно ощутим в тех случаях, когда режимы нагрева проводят в совершенно новых условиях по сравнению с теми, для которых накоплен опыт, как, например, при индукционной закалке.

Помимо этого, можно надеяться, что изучение образования аустенита в направлении нахождения основных закономерностей, которым это явление подчиняется, даст возможность внести в предложенный автором метод дополнения, позволяющие решать поставленную задачу столь же просто, но с большей точностью.

В этом направлении автор провел некоторые работы, которые позволят найти значения приведенных выше коэффициентов в уравнении (VIII, 6).

В настоящее же время для ориентировочных расчетов можно пользоваться данными Пашке и Гарттмана¹ для коэффициента диффузии углерода в железе при различных температурах (табл. 14).

Пользуясь приведенными в табл. 17, данными, можно из уравнения (VIII, 4) найти значения Q и коэффициента A :

$$Q = 37\,000 \quad \text{и} \quad A = 0,6.$$

В этом случае уравнение (VIII, 4) примет вид

$$D = 0,6 e^{-\frac{37\,000}{RT_k}} \text{ см}^2/\text{сек.}$$

Для определения времени t_k при разных температурах необходимо задаться временем t_1 , отвечающим одной из температур, например, взяв для 800° время 10 и 60 сек. Тогда для ряда температур получим значения, приведенные в табл. 15.

Таблица 14

Коэффициент диффузии
углерода в железе по Пашке

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Коэффициент диффузии D ($\text{см}^2/\text{сутки}$)
900	$0,7 \cdot 10^{-2}$
1000	$2,3 \cdot 10^{-2}$
1100	$6,5 \cdot 10^{-2}$

Таблица 15

Время, необходимое для
растворения и выравнивания
концентрации углерода при
нагреве под закалку, если
задаться температурой 800°
и временем 10 и 60 сек.

Температура T $^\circ\text{C}$	Время t сек.	
900	2,3	14
1000	0,7	4,2
1100	0,2	1,44
1200	0,1	0,56

3. Крупное зерно при перегреве. Время и температура нагрева, обуславливающие отсутствие перегрева

Остановимся на второй группе явлений, сопровождающих нагрев, которые выражаются в росте крупного зерна аустенита. Этот рост зависит от выдержки и, в особенности, от температуры. В результате при таком нагреве получается структура, типичная для перегретой стали.

Необходимость осветить этот вопрос в применении к индукционному нагреву и установить зависимости этого явления от параметров t и T_k вытекает из того, что при индукционном нагреве часто приходится ограничиваться очень малыми значениями времени, компенсируя его повышением температуры.

Ввиду этого здесь нельзя пользоваться теми нормами для перегрева и закалочной температуры, которые разработаны практикой сквозной закалки. Громадные же возможности вариации времени нагрева и доведение его до долей секунды требуют установить более точные зависимости между всеми параметрами, определяющими явление нагрева. Однако в основном здесь, как и раньше, нас будут интересовать зависимости между величинами t и T_k .

¹ Paschke u. Harttmann, Archiv für das Eisenhüttenwesen, 9, 1935/1936. S. 305—309.

Рост крупных зерен аустенита при перегреве представляет достаточно сложное явление. Для углеродистых сталей опытные данные дают кривые роста, которые можно выразить уравнением

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (\text{VIII}, 13)$$

где D_1 может быть представлено в следующем виде:

$$D_1 = C_1 e^{-\frac{A}{k_1 T_k}}, \quad (\text{VIII}, 14)$$

A , k_1 и C_1 — постоянные коэффициенты, а T_k — температура в °К.

Выше на фиг. 91 приведены микрофотографии, показывающие рост зерна в зависимости от времени¹, заимствованные у Digges, а на фиг. 92 показана зависимость величины зерна от температуры, полученная из опытов Гаева и Генлера и заимствованная из упомянутой выше статьи.

Так как образование аустенита и явление перегрева определяются уравнениями (VIII, 3) и (VIII, 13), которые имеют один и тот же вид, то при перегреве будет иметься тот же критерий подобия, который был дан для процесса образования аустенита.

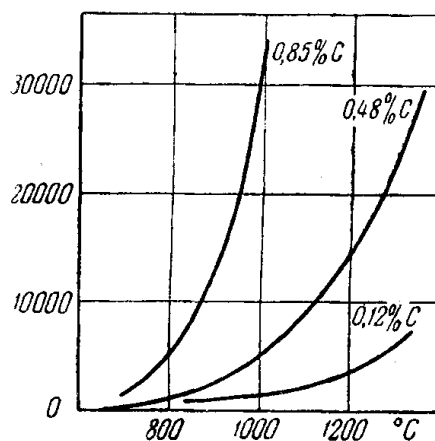
Для перегрева напишем его в следующем виде:

$$\frac{n_D n_t}{n_x^2} = 1. \quad (\text{VIII}, 14a)$$

Вытекающие из уравнения (VIII, 14a) коэффициенты подобия для этого случая напишем (табл. 16), исходя из того, что линейные размеры зерна должны оставаться постоянными, отвечающими неперегретой структуре, почему для коэффициента подобия для линейных размеров x возьмем величину, $x = 1 = \text{const}$. Эти коэффициенты дают ответ на вопрос — какое время t_k при заданной температуре T_k не даст перегрева, для данного металла, если известно, что некоторое время t_k при температуре T_k его не дает, или какая температура T_k допустима при времени t_k , если известно, что температура T_k при времени t_k не дает перегрева.

Возможно, конечно, поставить и более широкую задачу, принимая величину x также переменной, но здесь этого пока делать не будем.

Задача 1. На основе опытных данных известно, что при нагреве данной марки стали в течение t_k при температуре T_k зерно аустенита имеет допустимые в смысле перегрева размеры. Надо устано-



Фиг. 92. Кривые зависимости средней величины зерна от температуры для стали с различным содержанием углерода.

Таблица 16

Коэффициенты подобия для T_k и t_k при условии получения неперегретой структуры $x' = x = \text{const}$

Вариант	Параметры		
	x	t_k	D_1
1	1	n	$\frac{1}{n}$
2	1	$\frac{1}{n}$	n

¹ См. И. С. Гаев, Физические основы процессов структурного изменения и рост зерен, „Металлург“, 1936, № 11, стр. 28.

вить, какое время заковки даст те же условия перегрева, если необходимо температуру выдержки взять равной T_k .

Задачу решим следующим образом:

1. Определим отношение $\frac{T'_k}{T_k} = n$.

2. Из уравнения (VIII, 14) определим коэффициент подобия для коэффициента D'_1 :

$$D_1 = C_1 e^{-\frac{A}{k_1 T_k}}; \quad D'_1 = C_1 e^{-\frac{A}{nk_1 T_k}}, \quad (\text{VIII, 15})$$

откуда

$$D'_1 = D_1 e^{\frac{A}{k_1 T_k}} e^{-\frac{A}{nk_1 T_k}} = D_1 e^{\frac{A}{k_1 T_k} \left(1 - \frac{1}{n}\right)} \quad (\text{VIII, 16})$$

или коэффициент подобия для

$$\frac{D'_1}{D_1} = e^{\frac{A}{k_1 T_k} \left(1 - \frac{1}{n}\right)}. \quad (\text{VIII, 17})$$

3. Так как из второй строки табл. 16 для коэффициента подобия времени t имеем величину $\frac{1}{n}$, то для времени t из уравнения (VIII, 17)

получим коэффициент $e^{-\frac{A}{k_1 T_k} \left(1 - \frac{1}{n}\right)}$.

Поэтому при температуре T_k потребуется время нагрева

$$t' = t e^{\frac{A}{k_1 T_k} \left(\frac{1}{n} - 1\right)}. \quad (\text{VIII, 18})$$

Задача 2. Если по предыдущему известна температура T_k и время t , и требуется определить, при какой температуре вести нагрев, причем время его по условиям заковки должно быть равным также t .

Решение. 1. Определим коэффициент подобия для времени из данных задачи

$$\frac{t'}{t} = n. \quad (\text{VIII, 19})$$

2. Из первой строки табл. 16 имеем для коэффициента подобия для D'_1 значение $\frac{1}{n}$, если коэффициент подобия для t' будет иметь значение n .

3. Из уравнения (VIII, 14) найдем температуру T_k , если вместо t будем иметь время t' :

$$\frac{t'}{t} = n; \quad \frac{D'_1}{D_1} = \frac{1}{n}. \quad (\text{VIII, 20})$$

Так как

$$D_1 = C_1 e^{-\frac{A}{k_1 T_k}} \quad \text{и} \quad D'_1 = C_1 e^{-\frac{A}{k_1 T'_k}},$$

то

$$\frac{D'_1}{D_1} = \frac{1}{n} = e^{\frac{A}{k_1} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T'_k} \right)}. \quad (\text{VIII, 21})$$

Отсюда найдем

$$T'_k = \frac{T_k}{1 + \frac{k_1}{A} T_k \ln n}. \quad (\text{VIII, 22})$$

В заключение необходимо еще раз отметить, что описанный метод является лишь первым приближением, открывающим только один путь к решению данной задачи. Этот метод должен помочь занимающимся поверхностной закалкой быстро ориентироваться и дать им хотя бы приближенные, но ясные зависимости между теми величинами, к которым часто приходится обращаться.

ГЛАВА IX

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОДОБИЯ К РАСЧЕТУ ЗАКАЛОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Воздушный трансформатор. Особенности трансформаторов, применяемых для закалки индукционным методом

В наиболее часто встречающемся случае данные для расчета воздушного трансформатора определяются из предварительно проделанного электрического расчета системы индуктор — закаливаемый объект. Эти данные следующие:

1. Частота f гц.
2. Напряжение на зажимах нагрузки U_2 в.
3. Активное сопротивление нагрузки R_n ом (или полное сопротивление нагрузки Z_n ом).
4. Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi$.
5. Активная мощность, потребляемая нагрузкой P_a квт (или активная мощность, подводимая к трансформатору P_1 квт).
6. Первичное напряжение трансформатора (обычно определяется выбранным типом генератора) U_1 в.

Помимо этого, должны быть примерно заданы:

7. Величина тока холостого хода в процентах от рабочего тока I_0 (обычно не выше 30% от I_1).
8. Ориентировочные габариты трансформатора, определяемые конструкцией закалочного станка, конфигурацией и размерами обрабатываемой детали.
9. Желательная величина к. п. д. трансформатора η_2 .

Воздушный закалочный трансформатор в основном состоит из первичной и вторичной обмоток.

Первичная обмотка представляет спираль, изготовленную из полый медной трубки, прямоугольного сечения.

Отверстие трубки должно быть достаточно большим для пропуска охлаждающей воды. Выбранные предварительно размеры трубки после определения величины потерь в первичной обмотке, полученной из электрического расчета, должны быть проверены на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление для обеспечения надежного охлаждения.

Вторичная обмотка. При сравнительно больших мощностях, применяемых в закалочных устройствах (сотни и даже тысячи киловольт-ампер) и низких напряжениях на зажимах нагрузки (обычно 20—50 в), токи, протекающие по вторичной обмотке закалочного трансформатора, весьма велики (десятки тысяч ампер). Поэтому, желательно, чтобы высота витка вторичной обмотки была возможно больше.

Однако высота трансформатора обычно ограничена главным образом соотношением между высотами вторичной обмотки и индуктора. Значительная по сравнению с высотой индуктора высота вторичной обмотки вызывает неравномерное по высоте распределение токов, вследствие чего к. п. д. трансформатора ощутимо понижается. Помимо этого, закалочный трансформатор является составной частью закалочного станка, вследствие чего размеры его должны быть возможно малыми.

Наличие этих противоречивых требований, а также трудность конструктивного изготовления в закалочном трансформаторе целесообразной многовитковой вторичной обмотки заставляют делать трансформатор с одновитковой вторичной обмоткой.

Вторичная обмотка представляет собой цилиндр, изготовленный из ряда незамкнутых колец прямоугольной медной трубки, спаянных между собой серебром, или цилиндр из медного листа, к которому с наружной стороны через определенный интервал припаяно несколько колец из медной трубки прямоугольного сечения, служащих для пропускания охлаждающей воды. Такое решение, однако, не совсем благоприятно. Одновитковым осуществлением вторичной обмотки при заданных напряжениях автоматически задается число первичных витков, которое при большом коэффициенте трансформации может быть значительным. Это в свою очередь может вызвать увеличение высоты трансформатора до нежелательных пределов, так как, стремясь к эффективному охлаждению, первичную обмотку необходимо делать из трубки достаточно большого сечения и обязательно однослойной. Многослойная первичная обмотка для закалочного трансформатора совершенно неприемлема, так как, согласно уравнению (V, 73), сопротивление второго слоя будет примерно в 5 раз больше, чем первого; сопротивление же третьего слоя превысит сопротивление первого в 13 раз.

Кроме того, желательно, чтобы первичная и вторичная обмотки были по возможности равны по высоте, иначе неизбежны большие добавочные потери и падение напряжения вследствие усиления концевого эффекта (см. фиг. 72).

Высота трансформатора должна быть равна или не должна превышать более чем в полтора раза диаметр вторичной обмотки. В этом случае отношение высоты к диаметру будет оптимальным с точки зрения противоречивых условий, связанных, с одной стороны, с током холостого хода, с другой — наибольшим к. п. д.

Для междувитковой изоляции, а также для изоляции обмоток часто употребляют эксцельсиоровую ленту. В более же мощных трансформаторах для изоляции между первичной и вторичной обмотками можно применять миканит в виде гильзы.

Число витков первичной обмотки в первом приближении может быть найдено из следующих соображений.

Задаемся величиной падения напряжения в обмотках трансформатора, которая для высокочастотных трансформаторов лежит обычно в пределах 12—20% от величины U_2 . Отсюда определяют величину U'_1 — приведенное первичное напряжение

$$U'_1 \approx U_2 \left(1 + \frac{I_1 Z_k [\%]}{100} \right).$$

Тогда

$$n_1 = \frac{U_1}{U'_1}. \quad (\text{IX, 1})$$

Правильность выбора величины падения напряжения определяют после окончания электрического расчета.

2. Расчет электрических параметров обмоток воздушного трансформатора

Вследствие наличия в обмотках закалочного трансформатора явления поверхностного эффекта можно с достаточной для расчета точностью считать, что в каждой из обмоток ток распределяется исключительно по одной стороне трубки, причем по стороне, расположенной вблизи соседней обмотки, куда вытеснено и магнитное поле (см. фиг. 72).

Так как в закалочном трансформаторе первичная обмотка расположена внутри вторичной, то при рабочем режиме за расчетный диаметр первичной обмотки следует принять ее наружный диаметр, а за расчетный диаметр вторичной обмотки — внутренний.

Величиной глубины проникновения тока ввиду ее незначительности по отношению к диаметрам обмоток можно пренебречь.

Активное сопротивление обмоток

$$R = \frac{\pi \rho D n}{q} k_R \text{ ом}, \quad (\text{IX, 2})$$

где ρ — удельное сопротивление, *омсм*;

D — расчетный диаметр обмотки, *см*;

n — число витков обмотки;

q — сечение витка меди, *см²*;

$q = ha$;

k_R — коэффициент увеличения сопротивления

$$k_R = \frac{R}{R_0} = \varphi(\xi).$$

В случае высоких частот $\xi > 2,5$; тогда, согласно уравнениям (V, 69) и (V, 70), получим

$$k_R = \varphi(\xi) \approx \xi \approx \frac{h}{\delta},$$

так как по уравнению (V, 61)

$$\xi = \frac{h}{\delta}.$$

В виду того, что для трансформатора можно принять $a = b$, для активного сопротивления из уравнений (IX, 2), (V, 70) можно также написать

$$R = \frac{\pi D \rho n}{\delta a}.$$

Коэффициент самоиндукции обмоток можно определить по формуле Лоренца

$$L = 0,5 D n^2 Q, \quad (\text{IX, 3})$$

где D — расчетный диаметр обмотки, *см*;

n — число витков;

H — высота обмотки, *см*;

$Q = f\left(\frac{D}{H}\right)$ — находят по табл. 17.

Таблица 17

Значение функций $Q=f\left(\frac{D}{H}\right)$

$\frac{D}{H}$	Q	$\frac{D}{H}$	Q	$\frac{D}{H}$	Q	$\frac{D}{H}$	Q
0,20	3,6324	0,80	11,6079	1,80	19,5794	3,00	25,4161
0,30	5,2337	0,90	12,6306	2,00	20,7463	3,20	26,1891
0,40	6,7102	1,00	13,5889	2,20	21,8205	3,40	26,9018
0,50	8,7470	1,20	15,3380	2,40	22,8150	3,60	27,5855
0,60	9,3389	1,40	16,8984	2,60	23,7401	3,80	28,2349
0,70	10,5135	1,60	18,3035	2,80	24,6048	4,00	28,8533

Индуктивное сопротивление обмоток

$$X = \omega L = 2\pi f L 10^{-9} \text{ ом}, \quad (\text{IX}, 4)$$

где L — в см;
 f — в гц.

Коэффициент взаимной индукции можно определить по формуле Эсмарха

$$M = \frac{\pi^2 D_1^2}{2H_1} n_1 n_2 \left[\sqrt{\left(1 + \frac{H_1}{H_2}\right)^2 + \left(\frac{D_2}{H_2}\right)^2} - \sqrt{\left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right)^2 + \left(\frac{D_2}{H_2}\right)^2} \right] \text{ см}, \quad (\text{IX}, 5)$$

где D_1 и H_1 — расчетные диаметр и высота первичной обмотки, см;
 D_2 и H_2 — то же вторичной обмотки;
 n_1 и n_2 — число витков обмоток;
или по формуле Нагаока

$$M \approx 19,74 \frac{D_1^2 n_1 n_2}{0,25 \sqrt{H_2^2 + D_2^2}} \text{ см}, \quad (\text{IX}, 6)$$

где D_2 и H_2 в см.

Сопротивление связи

$$X_{\text{св}} = \omega M = 2\pi f M 10^{-9} \text{ ом}, \quad (\text{IX}, 7)$$

где M — в см; f — в гц.

Расчет трансформатора, работающего на данную нагрузку

Сопротивление нагрузки

$$R_{\text{н}} = Z_{\text{н}} \cos \varphi \text{ ом}; \quad X_{\text{н}} = \sqrt{Z_{\text{н}}^2 - R_{\text{н}}^2} \text{ ом}. \quad (\text{IX}, 8)$$

Сопротивление вторичной обмотки трансформатора с учетом нагрузки

$$\begin{aligned} R_{\text{II}} &= R_2 + R_{\text{н}} \text{ ом}; \\ X_{\text{II}} &= X_2 + X_{\text{н}} \text{ ом}; \\ Z_{\text{II}} &= \sqrt{R_{\text{II}}^2 + X_{\text{II}}^2} \text{ ом}, \end{aligned} \quad (\text{IX}, 9)$$

где R_2 и X_2 — сопротивления вторичной обмотки.

Коэффициент приведения параметров вторичной обмотки к первичной

$$k^2 = \frac{X_{св}^2}{Z_{II}^2}. \quad (IX, 10)$$

Эквивалентные сопротивления первичной обмотки

$$\left. \begin{aligned} R_I &= R_1 + k^2 R_{II} \text{ ом;} \\ X_I &= X_1 + k^2 X_{II} \text{ ом;} \end{aligned} \right\} \quad (IX, 11)$$

где R_1 и X_1 — сопротивления первичной обмотки.
Электрический к. п. д. трансформатора

$$\eta = \frac{k^2 R_{II}}{R_I}. \quad (IX, 12)$$

Коэффициент мощности системы с учетом индуктивности трансформатора

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi'_1 &= \frac{R_I}{Z}; \\ Z &= \sqrt{R_I^2 + X_I^2}, \end{aligned} \right\} \quad (IX, 13)$$

где Z — полное эквивалентное сопротивление трансформатора.
Ток во вторичной обмотке трансформатора

$$I_2 = \frac{U_2 \cos \varphi}{R_{II}} \text{ а.} \quad (IX, 14)$$

Активная мощность, отдаваемая трансформатором,

$$P'' = U_2 I_2 \cos \varphi \text{ вт.} \quad (IX, 15)$$

Ток в первичной обмотке трансформатора

$$I_1 = \frac{I_2}{k}, \quad (IX, 16)$$

где, согласно уравнению (IX, 10)

$$k = \frac{X_{св}}{Z_{II}}. \quad (IX, 17)$$

Первичное напряжение трансформатора

$$U_1 = I_1 Z. \quad (IX, 18)$$

Активная мощность, подводимая к трансформатору,

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= I_1 U_1 \cos \varphi'_1; \\ \frac{P_2}{\eta} &= I_1^2 R_I. \end{aligned} \right\} \quad (IX, 19)$$

Реактивная мощность, подводимая к трансформатору,

$$P_{1 \text{ ква}} = I_1^2 X_I \text{ ва.} \quad (IX, 20)$$

Режим холостого хода

В случае расчета трансформатора, работающего в режиме холостого хода, за расчетный диаметр первичной обмотки следует считать внутренний диаметр ее.

Сопротивления и коэффициент самоиндукции рассчитывают по формулам (IX, 2), (IX, 3) и (IX, 4).

Ток холостого хода

$$I_0 = \frac{U_1}{Z_0}, \quad (\text{IX, 21})$$

где Z_0 — полное сопротивление первичной обмотки в режиме холостого хода:

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}. \quad (\text{IX, 22})$$

Режим короткого замыкания

Коэффициент приведения параметров вторичной обмотки к первичной в режиме короткого замыкания

$$k^2 = \frac{X_{\text{св}}^2}{Z_2^2}; \quad (\text{IX, 23})$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}. \quad (\text{IX, 24})$$

Величины R_2 и X_2 известны из уравнения (IX, 9), а $X_{\text{св}}$ — из уравнения (IX, 7).

Вторичный ток трансформатора в режиме короткого замыкания

$$I_{2k} = I_{1k}. \quad (\text{IX, 25})$$

Эквивалентные сопротивления в режиме короткого замыкания

$$R = R_1 + k^2 R_2 \text{ ом} \quad (\text{IX, 26})$$

и

$$X = X_1 - k^2 X_2 \text{ ом}. \quad (\text{IX, 27})$$

Величины R_1 , R_2 , X_1 , X_2 можно получить из уравнений (IX, 9) и (IX, 10).

Полное сопротивление трансформатора в режиме короткого замыкания

$$Z_k = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ ом}. \quad (\text{IX, 28})$$

Номинальное напряжение трансформатора в режиме короткого замыкания

$$U_k = I_1 Z_k \text{ в}, \quad (\text{IX, 29})$$

где I_1 — находят из уравнения (IX, 16).

Потери в трансформаторе в режиме короткого замыкания

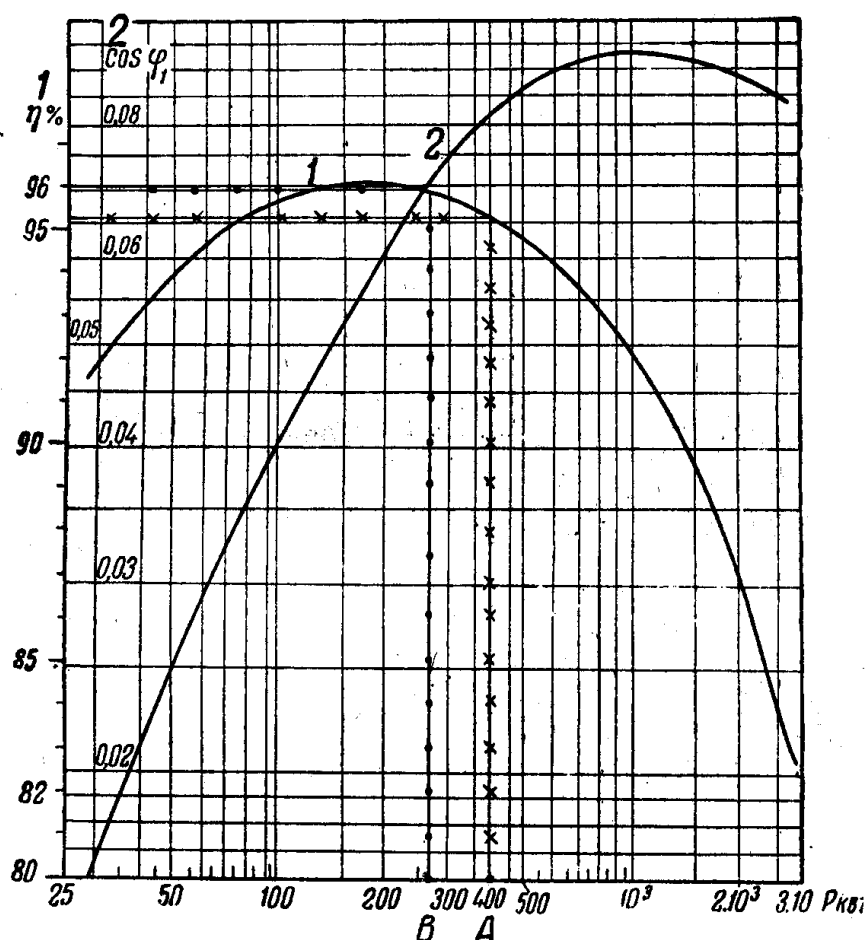
$$\Delta P_k = I_{2k}^2 R \text{ вт}, \quad (\text{IX, 30})$$

где I_{2k} — вторичный ток трансформатора в режиме короткого замыкания, отнесенный к первичной стороне

$$I_{2k} = I_{2k} \frac{1}{n_1}. \quad (\text{IX, 31})$$

Приведенный расчет дает возможность построить векторную диаграмму, подобную приведенной на фиг. 89.

Имея расчет трансформатора, сделанный по приведенным выше формулам для какой-либо мощности и напряжения, например для 400 квт, можно, пользуясь методом подобия, получить непосредственно данные электрических и конструктивных параметров для трансформаторов другой мощности.


$$1) \text{ к. п. д. } \eta = f(P_1); \quad 2) \cos \varphi'_1 = f(P_1).$$

В качестве примера такого расчета ниже дано несколько графиков, построенных на основании метода подобия, исходя из расчета одного из трансформаторов.

Основные данные этого трансформатора следующие:

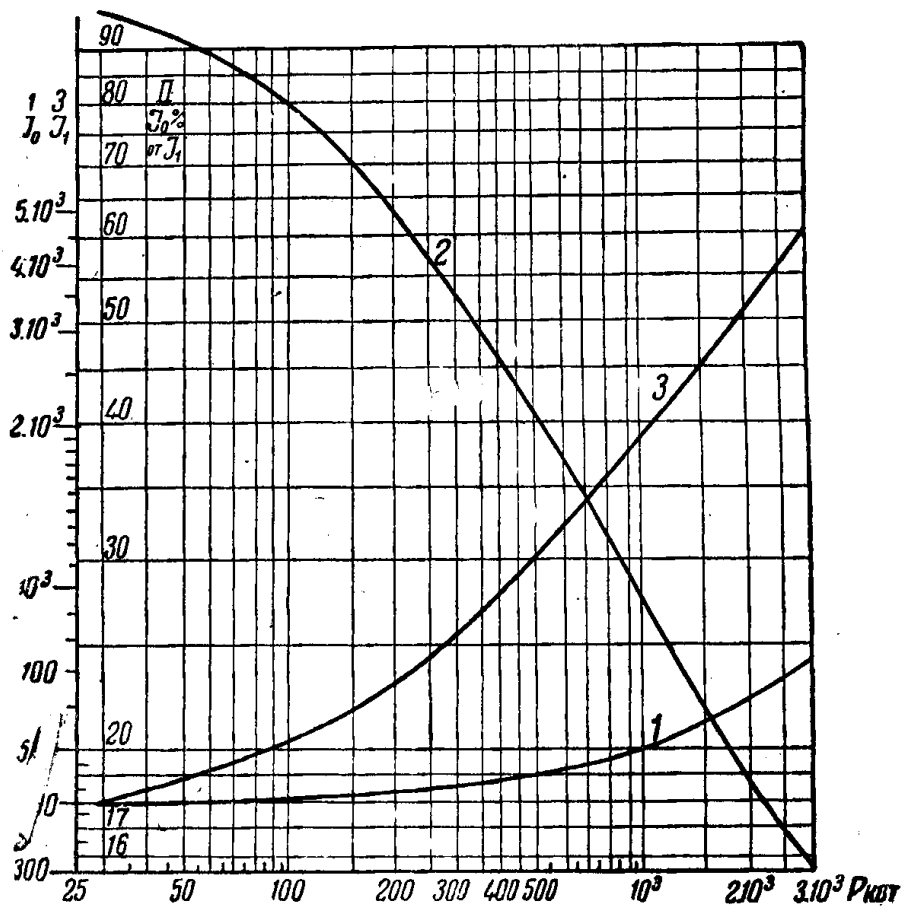
Мощность (с первичной стороны)	400 квт
Частота	300000 гц
cosφ нагрузки	0,15
напряжение: первичное	5400 в
вторичное	800 "
к. п. д. [уравнение (IX, 12)]	95,25%

Конструктивные

Диаметр первичной обмотки (внутренний) $D_1 = 30 \text{ см}$
 число витков:
 первичной обмотки $n_1 = 6$
 вторичной обмотки $n_2 = 1$
 Размер провода первичной обмотки:
 высота в осевом направлении $a_1 = 5,6 \text{ см}$
 размер в радиальном направлении $h_1 = 0,8 \text{ .}$

Важнейшие характеристики этого трансформатора приведены на фиг. 93—95.

Графики для определения параметров трансформаторов, подобных приведенному выше, изображены на фиг. 96.



Фиг. 94. Зависимость тока I_1 и I_0 от мощности P_2 для трансформатора, характеристики которого приведены на фиг. 93.

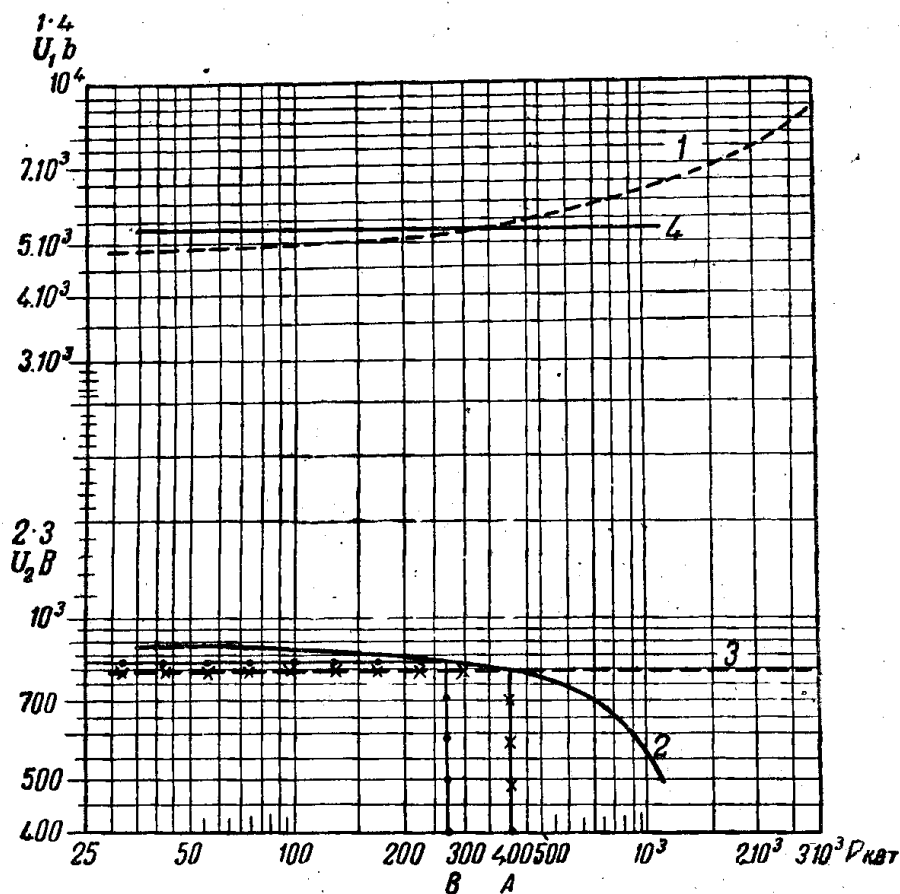
1) $I_0 = f(P_2)$ в а, 2) $I_0 = f(P_2)$ в % от I_1 ; 3) $I_1 = f(P_2)$ в а.

Использование графиков, изображенных на фиг. 96

Эти графики дают возможность отыскать основные размеры трансформатора при заданной активной или реактивной первичной мощности.

На оси абсцисс, имеющей два масштаба, расположена активная подводимая мощность в киловаттах (масштаб $P \text{ квт}$) и реактивная подводимая мощность в киловольтамперах (масштаб $P \text{ ква}$).

По оси ординат даны два и три масштаба, определяющие искомые размеры (М-I, М-II и М-III), причем единицы, в которых выражены искомые размеры, даны на каждой прямой непосредственно за условным обозначением искомой величины.



Фиг. 95. Зависимость первичного и вторичного напряжения от мощности для трансформатора, характеристики которого приведены на фиг. 93.

- 1) $U_1 = f(P_1)$; при 3) $U_1 = \text{const.}$
 2) $U_2 = f(P_2)$; при 4) $U_2 = \text{const.}$

На фиг. 96 приняты следующие обозначения:

- D_1, D_2 — внутренние диаметры первичной и вторичной обмоток;
 H — высота трансформатора, равная высоте каждой обмотки;
 a_1 — высота витка первичной обмотки;
 h_1 — радиальная ширина первичной обмотки.

Для нахождения размеров трансформатора из точки на оси абсцисс, соответствующей заданной активной или реактивной мощности, проводят прямую, перпендикулярную оси абсцисс. Ордината точки пересечения ее с одной из прямых, обозначенных буквами h_1, H_1, D_1 и т. д., дает соответствующий размер.

Пример. Дано $P_{\text{квв}} = 1400 \text{ квв}$. Найти размеры h_1, a_1 и D_1 . Из точки A , соответствующей 1400 квв , на шкале $P_{\text{квв}}$, проводим вертикальную прямую AB . Проекция на ординату из точки B в месте пересечения вертикали с прямой h_1 дает радиальную ширину первичной обмотки в миллиметрах. Масштаб по оси ординат, как это указано на прямой h_1 , берем М-II и получаем $h_1 = 5,22 \text{ мм}$.

Проекция из точки C на ординату в месте пересечения вертикали AB с прямой a_1 дает высоту витка первичной обмотки в сантиметрах по тому же масштабу. М-II на оси ординат, т. е. $a_1 = 3,68 \text{ см}$.

Точно так же точка D дает высоту трансформатора, но по масштабу $M-I$, как это указано на прямой H_1 , т. е. $H_1=22,8$ см.

Точка E дает внутренний диаметр вторичной обмотки $D_2=21,4$ см по прямой D_2 ; масштаб здесь $M-I$. Точка F дает внутренний диаметр первичной обмотки $D_1=19,2$ см по прямой D_1 с масштабом $M-I$.

На фиг. 96,б можно находить первичный и вторичный токи трансформатора и ток намагничивания.

Принцип этого графика и пользование им те же, что и на фиг. 96,а.

Для трансформатора на 1400 ква, взятого в виде примера, величины токов будут:

$$I_1 = 604 \text{ а по прямой } AB \text{ и } I_1 \text{ а}$$

$$I_2 = 2100 \text{ а по прямой } AD \text{ и } I_2 \text{ а}$$

$$I_0 = 286 \text{ а по прямой } AC \text{ и } I_0 \text{ а}$$

График, изображенный на фиг. 96,в, дает возможность определять первичное и вторичное напряжения трансформатора и вес всего трансформатора в целом и обеих его обмоток в отдельности. Пользование этим графиком аналогично предыдущему.

Для трансформатора на 1400 ква график дает следующие величины:

$$U_1 = 2300 \text{ в по прямой } AC \text{ и } U_1 \text{ в}$$

$$U_2 = 347 \text{ в по прямой } AE \text{ и } U_2 \text{ в}$$

$$G_1 = 3400 \text{ г по прямой } AB \text{ и } G_1 \text{ г}$$

$$G_2 = 5,6 \text{ кг по прямой } AF \text{ и } G_2 \text{ кг}$$

$$G_T = 9,0 \text{ кг по прямой } AD \text{ и } G_T \text{ кг}$$

Определение размеров трансформатора для заданного вторичного напряжения

Из описанного порядка использования графиков, приведенных на фиг. 96, а также из того, что в данном случае взят трансформатор с одним витком во вторичной обмотке, на основании табл. 18, следует, что при пользовании подобием напряжение U'_2 (если $x'=nx$) связано с мощностью выражением

$$U'_2 = U_2 \sqrt[3]{\left(\frac{P'}{P}\right)^2}. \quad (IX, 32)$$

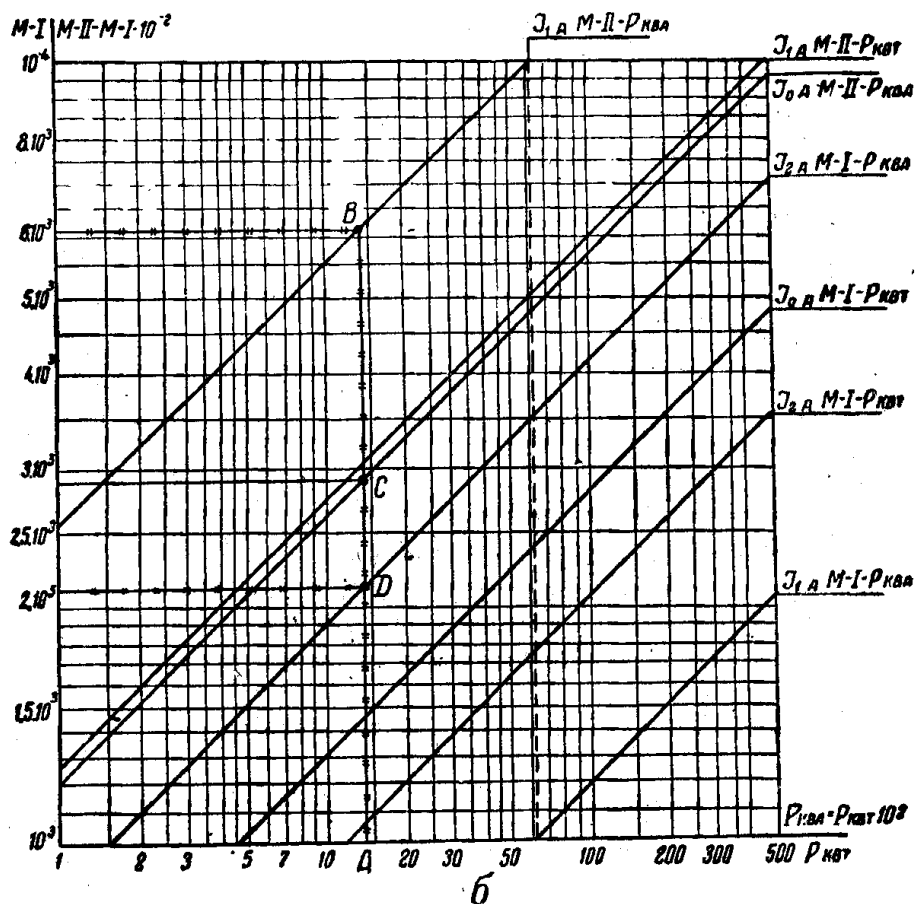
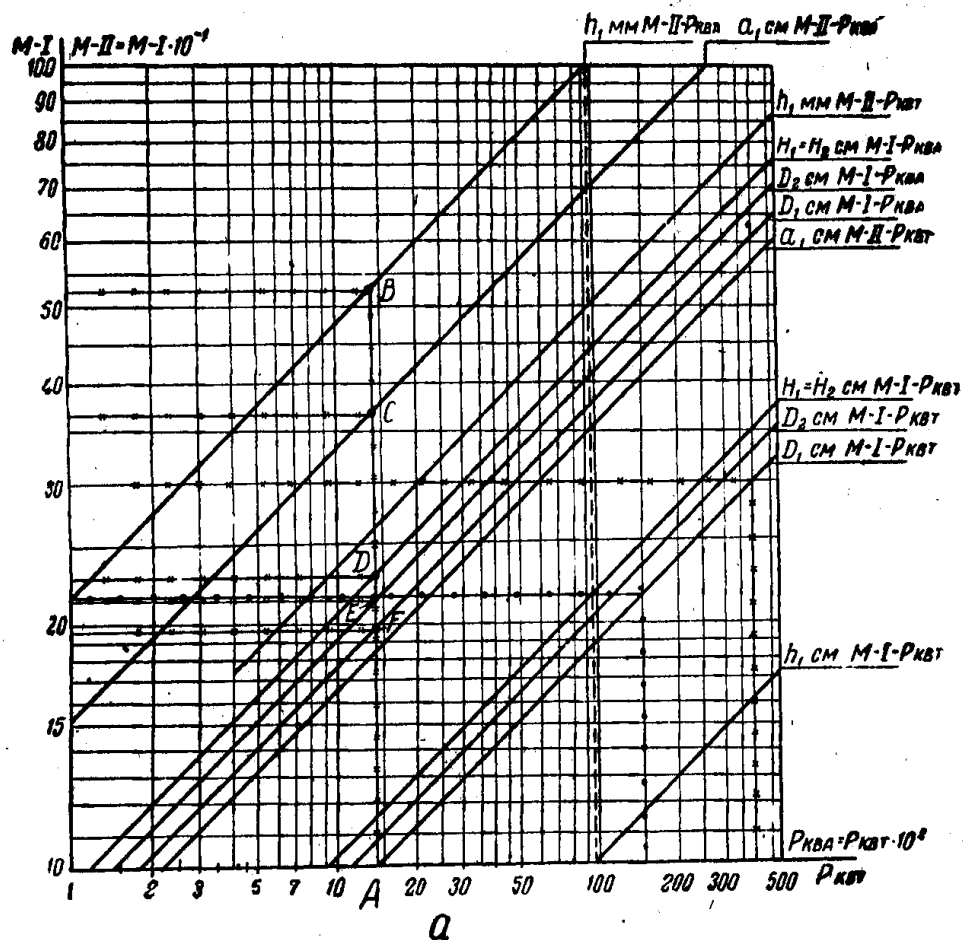
В этом можно убедиться и по фиг. 96,а,в.

В значительном числе случаев практики такая зависимость является приемлемой, так как с уменьшением мощности при обычно употребляемых удельных мощностях одновременно в той же зависимости, какую дает уравнение (IX, 32), падает напряжение. Однако при закладке предметов, отступающих от подобия, или при переходе к другой форме предметов выступает требование найти данные для трансформатора с любым заданным в известных пределах напряжением U_2 .

В этом случае также можно пользоваться приведенными графиками (фиг. 96), но необходимо допустить возможность изменения некоторых ранее заданных параметров, в частности, к. п. д.

Поясним сказанное на примере. Изображенные на фиг. 93, 95 и 96,а линии с крестиками показывают, что трансформатор с диаметром $D_1=30$ см при $P_1=400$ квт будет иметь вторичное напряжение $U_2=800$ в при к. п. д. $\eta_2=95,25\%$. Эти данные были положены в основу построения графиков 96,а, б и в.

Зададимся теперь вопросом, какие размеры и электрические данные должен иметь трансформатор с одним витком вторичной обмотки



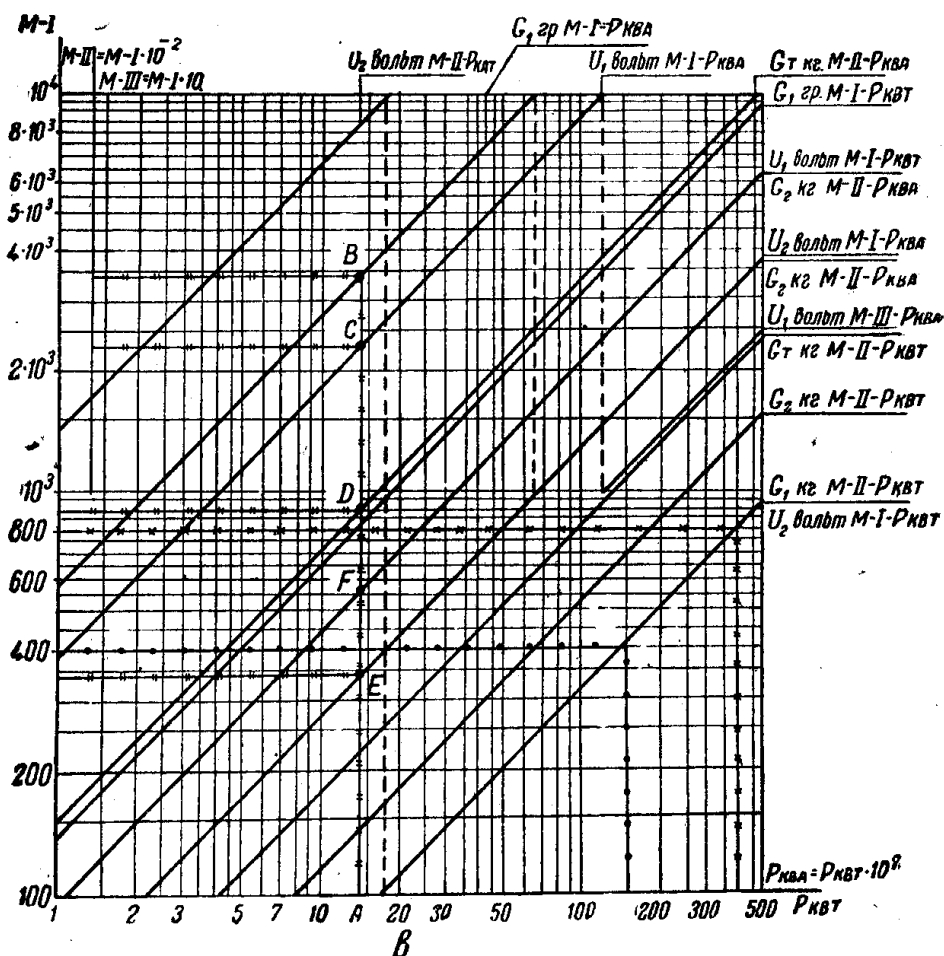
Фиг. 96. График для определения по методу подобия электрических
График построен на основе трансформатора $P = 400$ кВт;
 a —размеры: D_1 , D_2 , H_1 , h_1 , a_1 ; b —токи I_1 , I_2 , I_0 ;

и вторичным напряжением 400 в при мощности 100 кВт, сохраняя характеристики, приведенные на фиг. 93.

Согласно линии с точками на фиг. 96а,в находим, что подобный трансформатор будет иметь напряжение $U_2=400$ в при мощности $P_1=150$ кВт, причем его диаметр будет $D_1=22$ см. К. п. д. этого трансформатора и другие электрические параметры можно найти по фиг. 93, если взять на этом графике $P_1=400$ кВт(!), так как при сохранении подобия к. п. д. η не меняется (уравнение VII, 12). Точка абсциссы (фиг. 96,а) при уменьшенном до 22 см диаметре будет отвечать 150 кВт, для которых сохранится прежний к. п. д.

Так как здесь задались целью найти данные для трансформатора 100 кВт и 400 в, то с успехом можно взять трансформатор $D_1=22$ см, уменьшив его нагрузку со 150 до 100 кВт. При этом к. п. д. его несколько повысится, как в этом можно убедиться, взяв на фиг. 93 точку по абсциссе не 400 кВт (точка А), а $\frac{400 \cdot 100}{150} = 266$ кВт (точка В). Для этой точки, отвечающей трансформатору $D_1=22$ см и $P_1=100$ кВт, к. п. д. будет уже другой, а именно $\eta_2=95,9$, так как мы отошли от подобия.

Что касается напряжений U_1 и U_2 , то согласно фиг. 95 при переходе от 400 кВт (точка А) к 266 кВт (точка В) напряжение U_2 увеличится с 800 до 820 в, или при переходе от 150 кВт до 100 кВт с 400 до 410 в.



параметров и размеров воздушного трансформатора при $f = \text{const.}$
 $f = 300\,000$ гц при $D_1 = 30$ см, $H_1 = H_2 = 35$ см и $\eta_2 = 95,25\%$.
 а — напряжения U_1 , U_2 и веса G_1 , G_2 , G_T .

Такое отклонение несущественно, почему и не стоит применять для более точного напряжения (400 в) метод последовательного приближения, который дал бы требуемое точное напряжение.

Аналогичным способом по фиг. 96,б или по известным соотношениям, или, наконец, по табл. 18, можно найти значения токов и других параметров.

Размеры провода и высота будут отвечать данным, находимым по графику на фиг. 96,а для диаметра 22 см или из соотношения $x' = nx$,

$$\text{где } n = \frac{22}{30} \approx 0,73.$$

Определение параметров трансформатора для заданного первичного напряжения U_1

Для построения графиков (фиг. 93—96) за основу было взято напряжение $U_1 = 5400$ в при мощности $P_1 = 400$ квт и первичной обмотке в 6 витков ($n_1 = 6$).

В случае перехода к другим мощностям первичное напряжение U_1 по табл. 11 и графику (фиг. 96,в) будет меняться согласно уравнению (VII, 25).

$$U'_1 = n^2 U_1.$$

Отсюда следует, что графики (фиг. 93—96) дадут для каждой мощности совершенно определенное напряжение U_1 , так же, как это было для U_2 .

Однако для получения какого-либо другого заданного напряжения здесь больше возможностей, чем при решении этой же задачи для U_2 , так как, помимо соотношения (VII, 25), для первичного напряжения U_1 можно еще использовать соотношение

$$U'_1 = \frac{n'_1}{n_1} U_1, \quad (\text{IX, 33})$$

где n_1 — число витков при напряжении U_1 (в случае графиков, приведенных на фиг. 95—96, $n_1 = 6$);

n'_1 — число витков при заданном напряжении U'_1 .

Имея соотношение (IX, 33), нетрудно получить любое заданное напряжение U'_1 , выбирая соответствующее число витков n'_1 .

Необходимо отметить, что с изменением числа первичных витков с n_1 на n'_1 изменятся также и параметры I_1 и I_0 :

$$I'_1 = \frac{n'_1}{n_1} I_1; \quad I'_0 = \frac{n'_1}{n_1} I_0. \quad (\text{IX, 34})$$

Что касается размеров обмоток, то здесь изменится лишь размер a :

$$a'' = \frac{n'_1}{n_1} a. \quad (\text{IX, 35})$$

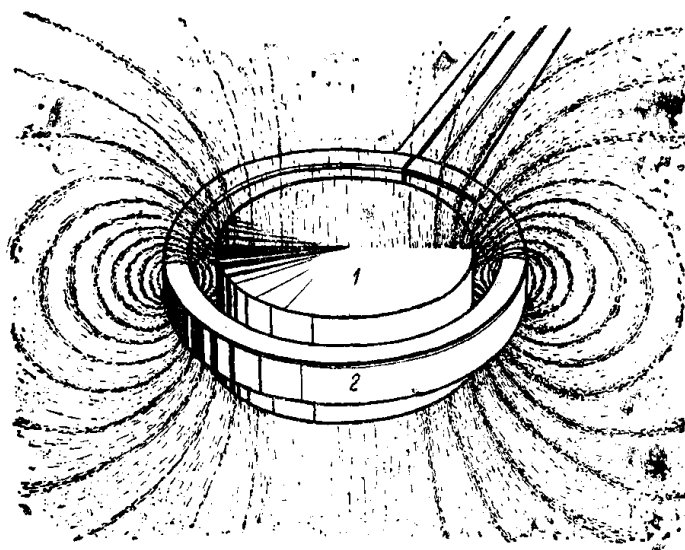
Остальные размеры трансформатора, так же как к. п. д. η и $\cos \varphi'_1$ останутся без изменения.

ГЛАВА X

ОСНОВЫ РАБОТЫ ИНДУКТОРА В ЗАКАЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

1. Система индуктор—нагреваемое тело как трансформатор

Создать токи на поверхности закаливаемого тела, вызывающие нагрев этой поверхности, лишь в редких случаях можно посредством пропускания их непосредственно через контакты, соединяющие нагреваемую поверхность с источниками тока. Препятствием здесь служит трудность осуществления контактов при малом сопротивлении нагреваемого слоя, обуславливающим необходимость работать при громадных силах тока (десятки тысяч ампер) и малом напряжении. Непосредственно пропускать ток можно лишь при весьма длинных телах, например, валах одного сечения, при одновременной закалке, что, однако, требует значительной мощности. Преимуществом контактного способа является лишь большая независимость от частоты. Однако при достаточно малых диаметрах и сравнительно большой глубине закаленного слоя понижение частоты до 50 гц встречает затруднение главным образом в области индуктирования тока и в громоздкости трансформаторов, а следовательно, и подводящих концов, необходимых при индуктировании. Получение же слоя достаточно малой глубины, как это видно по табл. 7 и фиг. I, возможно и при низких частотах.



Фиг. 97. Магнитный спектр поля высокой частоты.

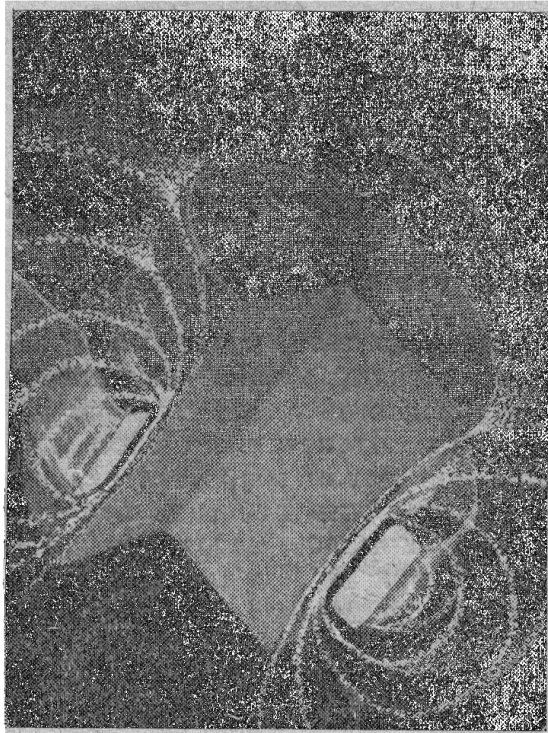
Ввиду этого почти всегда для создания тока на поверхности для закалки употребляют индукционный метод.

Этот метод состоит в том, что тело, на поверхности которого должны быть вызваны токи большой силы, помещают в сильное магнитное поле, образованное прямым или кольцеобразным, а иногда и спираль-

ным проводом, по которому пропускают ток чаще значительной частоты.

На фиг. 2 и 97 показан магнитный спектр, указывающий на характер и форму магнитного поля при токе повышенной частоты. Магнитный поток главным образом входит в поверхностный слой тела 1 из-за поверхностного эффекта. Магнитный поток, согласно уравнению (V, 1), индуцирует в теле э. д. с. E , которая в свою очередь создает ток I .

Поверхностный эффект для тока тесно связан с распределением магнитного потока, и, согласно уравнению (V, 22), дает сосредоточивание тока на поверхности тела.



Фиг. 98. Токи в индукторе и нагреваемом теле.

Распределение токов при взаимном расположении провода 2 и тела 1, показанном на фиг. 97, может быть представлено в виде схемы (фиг. 98), где для наглядности вырезана часть кольцевого провода и нагреваемого тела. Представленное здесь распределение токов, помимо поверхностного эффекта, является также следствием эффекта близости и катушечного эффекта.

Рассматривая фиг. 98, нетрудно убедиться, что индуктор вместе с закаливаемым телом представляет трансформатор, работающий в режиме короткого замыкания. При этом первичной обмоткой здесь служит индуктор, вторичной — поверхностный слой закаливаемого тела толщиной δ , где δ — глубина проникновения тока в металл закаливаемого тела, определяемая уравнением (I, 4).

Поэтому расчет и условия работы индуктора и поверхностного слоя нагреваемого тела при его нагреве можно свести к трансформатору.

2. Особенности работы индуктора по сравнению с обычным трансформатором

Необходимо отметить, что в данном устройстве имеются особенности, отличающие его от обычного трансформатора. Эти особенности не нарушают основных принципов теории трансформатора, но их все же надо учитывать при изучении и расчете системы, изображенной на фиг. 98. Заключаются они в следующем:

1. Активная толщина провода вторичной обмотки трансформатора (равная δ) постоянна при любых размерах устройства.

2. Эта толщина зависит от частоты, от материала тела, а также от температуры поверхностного слоя (f , ρ , μ , T).

3. Устройство имеет два предельных режима: 1) холодный до достижения наружной поверхностью тела температуры точки Кюри (As_1); 2) горячий, когда слой глубиной δ имеет температуру выше As_1 . Между этими двумя режимами имеются переходные режимы.

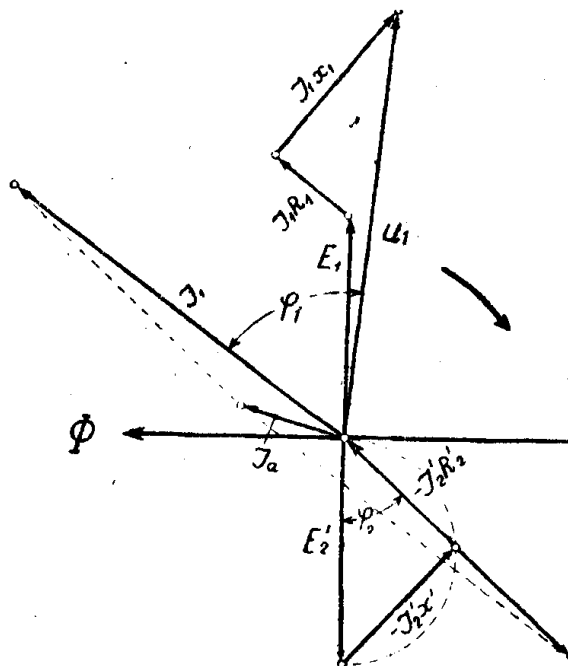
При первом режиме толщина вторичной обмотки трансформатора равна $\delta_{2\text{хол}}$. Кроме того, при этом режиме магнитный поток, в отличие от обычных трансформаторов, идет лишь по слою, равному проводящему слою, тогда как более глубокие слои тела свободны от потока; они как бы имеют магнитную проницаемость, равную не единице, а нулю. Эти слои практически полностью закрыты сплошной массой закаливаемого тела. Независимо от этого провод вторичной обмотки почти всегда является магнитным, хотя обычно довольно сильно насыщенным ($\mu = 5 \div 30$).

Отсутствие потока внутри тела влияет на величину самоиндукции и взаимной индукции данной системы и должно быть учтено при расчете. Что касается индуктора, то проводящим слоем является лишь внутренний слой меди индуктора толщиной около δ_1 . По этому слою идет главная часть потока, тогда как остальная часть меди индуктора практически не имеет потока, так как это пространство ширмовано хорошо проводящей медью индуктора. Здесь практически $\mu = 0$. Последнее надлежит учитывать при расчете рассеяния индуктора. Картина распределения поля в индукторе показана на фиг. 98.

При втором режиме вторичная обмотка трансформатора по толщине равна приблизительно $h \approx x_k$. В зависимости от применяемой частоты она равна $h \approx \delta_{2\text{гор}}$ (при $\delta_2 < x_k$ — высокая частота) или $h \approx x_k + \delta_{2\text{хол}}$.

В этом случае провод вторичной обмотки (или вернее проводящий слой) имеет проницаемость $\mu = 1$, и мы приближаемся к воздушному трансформатору. Здесь также внутренняя часть как бы имеет проницаемость $\mu = 0$.

Приняв во внимание все эти особенности, разберем работу заключенной системы. Для нее как трансформатора можно начертить векторную диаграмму, соответствующую короткозамкнутому трансформатору (фиг. 99).



Фиг. 99. Векторная диаграмма системы: индуктор—закаливаемое тело.

В. Основания расчета цилиндрического индуктора большой длины, приведенного к 1 см высоты

Рассмотрим второй режим для случая $h_2 = \delta_2$.

В трансформаторе для толщины проводящей части первичной цепи получим $h_1 = \delta_1$, а для вторичной цепи трансформатора (нагреваемый слой) $h_2 = \delta_2$.

Для упрощения возьмем индуктор большой длины, что допустимо для многих случаев практики.

Прежде всего определим необходимые для построения диаграммы трансформатора величины активных сопротивлений R_1 и R_2 , а также

коэффициенты самоиндукции L_1 и L_2 . Ведя расчет на 1 см высоты индуктора и закаливаемого тела, согласно фиг. 100, можно написать:

$$R_1 = \frac{2\pi r_1 \rho_1}{\delta_1}; \quad (X, 1)$$

$$R_2 = \frac{2\pi r_2 \rho_2}{\delta_2}. \quad (X, 2)$$

Так как магнитный поток проходит в нагреваемом теле лишь по той части, где идет ток, т. е. по узкому кольцу шириной δ_2 , а площадь, по которой идет ток, равна $q = 2\pi r_2 \delta_2$, то для коэффициента самоиндукции L_2 будем иметь:

$$L_2 = \frac{2\pi r_2 \delta_2 4\pi\mu}{2} = 4\pi^2 r_2 \delta_2 \mu. \quad (X, 3)$$

Так же точно для L_1 возьмем упрощенные формулы для длинной катушки

$$L_1 = \frac{4\pi q_1 n^2}{l} \quad (X, 4)$$

Казалось бы, такое упрощение является слишком грубым даже для ориентировочного расчета. Однако в нашем случае прохождения вторичного потока лишь по тонкому кольцу и по условиям, которые имеются для прохождения потока по индуктору, в значительной степени сглаживаются ошибки, связанные с принятым допущением. Этот расчет приемлем для многих случаев практики.

Так как чаще всего $n=1$ и расчет ведется на 1 см, то $l=1$ см.

В данном случае

$$q = \pi [r_1^2 - (r_2 - \delta_2)^2], \quad (X, 5)$$

так как δ мало.

Отсюда

$$L_1 = 4\pi^2 [r_1^2 - (r_2 - \delta)^2] \quad (X, 6)$$

или, обозначая $r_1 - r_2 = \Delta$, можно написать

$$L_1 = 8\pi^2 r_1 (\Delta + \delta_2). \quad (X, 7)$$

Из уравнений (X, 2) и (X, 3) получим для фазы вторичного тока I_2

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\omega L_2}{R_2} = \frac{4\pi^2 r_2 \delta_2^2 \omega \mu}{2\pi r_2 \rho_2} = 1, \quad (X, 8)$$

так как из уравнения (I, 4a)

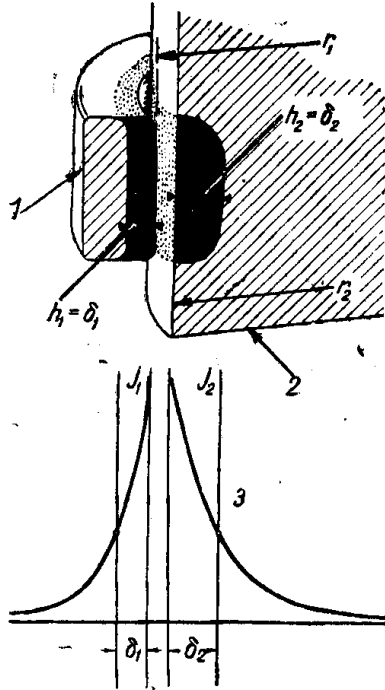
$$\delta_2^2 = \frac{\rho_2}{2\pi\omega\mu}$$

или

$$\cos \varphi_2 = \frac{1}{2} \sqrt{2} = 0,707, \quad (X, 9)$$

т. е. $\varphi = 45^\circ$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2} = \frac{2\pi r_2 \rho_2 \sqrt{2}}{\delta_2} = 4\pi r_2 \sqrt{\pi \omega \rho_2}. \quad (X, 10)$$



Фиг. 100. Схематическое изображение системы: индуктор—закаливаемое тело.

1—индуктор; 2—закаливаемое тело; 3—плотности тока при малой удельной мощности p .

Отсюда вытекает очень важное следствие: сдвиг фазы вторичного тока не зависит ни от частоты, ни от постоянных материала закаливаемого тела.

Отсюда же следует, что наибольший коэффициент мощности индуктора не может превысить 0,7, так как не может быть больше коэффициента мощности вторичной цепи, который, кроме того, не зависит от частоты и материала нагреваемого тела.

Для коэффициента взаимной индукции примем также упрощенную формулу, отвечающую длинной катушке

$$M \approx 4\pi q_2 n_1 n_2, \quad (X, 11)$$

где q_2 — площадь, пересекаемая вторичным потоком.

В данном случае n_1 и $n_2 = 1$.

Тогда

$$M \approx L_2$$

и коэффициент приведения вторичного тока к первичному k будет

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}} \approx \frac{\omega L_2}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}}. \quad (X, 12)$$

Подставляя значения L_2 и R_2 из уравнений (X, 2) и (X, 3), получим

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{2} \sqrt{2}, \quad (X, 13)$$

откуда

$$I_1 = \sqrt{2} I_2. \quad (X, 14)$$

Так как для M взяты наибольшие значения из возможных, то ток I_1 , найденный из уравнения (X, 14), будет несколько меньше действительной величины. Однако с учетом небольшого расстояния между индуктором и нагреваемым телом ($\Delta = r_1 - r_2$) ошибка будет невелика даже и при коротком индукторе.

Для тока намагничивания найдем значения из треугольника (фиг. 99)

$$I_0 = 0,518 I_2 \approx 0,5 I_2. \quad (X, 15)$$

Найденное значение также будет меньше действительной величины.

Определим теперь общее сопротивление всей системы из треугольника короткого замыкания

$$Z_1 = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + \omega (L_1 + L'_2)^2}, \quad (X, 16)$$

где

$$R'_2 = k^2 R_2 = \frac{1}{2} \frac{2\pi r_2 \rho_2}{\delta_2} = \frac{\pi r_2 \rho_2}{\delta_2}, \quad (X, 17)$$

$$L'_2 = k^2 L_2 = \frac{1}{2} 4\pi^2 r_2 \delta_2 = 2\pi^2 r_2 \delta_2 \quad (X, 18)$$

и первичное напряжение на индукторе

$$U' = Z I_1. \quad (X, 19)$$

Коэффициент мощности всей закалочной системы определим из уравнения (X, 20).

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1}}, \quad (X, 20)$$

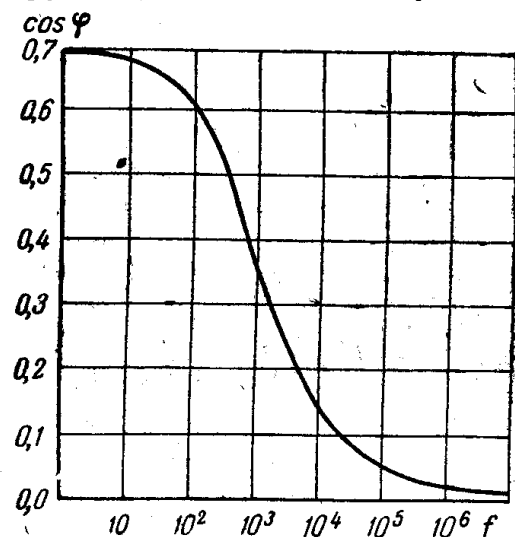
где

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega (L_1 + L_2')}{R_1 + R_2'}, \quad (\text{X}, 21)$$

или при частотах больше 2000 гц с ошибкой не более 5%

$$\cos \varphi_1 \approx \operatorname{ctg} \varphi_1 \approx \frac{R_1 + R_2}{\omega (L_1 + L_2')}. \quad (\text{X}, 22)$$

Подставляя в уравнение (X, 22) значения R_1 , R_2' , L_1 , L_2' и ω , нетрудно убедиться, что при высоких частотах выражение (X, 22) может быть заменено выражением для $\cos \varphi_2$, известным из теории индукционных печей [уравнение (X, 23)]



Фиг. 101. Сравнительная величина $\cos \varphi$ системы индуктор—нагреваемое тело в зависимости от частоты f .

$$\cos \varphi_1 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{f} \frac{r_2}{r_1^2 - r_2^2}}. \quad (\text{X}, 23)$$

Это выражение достаточно точно и для закалочных устройств при высоких частотах.

Как следует из уравнения (X, 23), коэффициент мощности изменяется обратно пропорционально корню квадратному из частоты, однако при пониженных частотах уравнение (X,23) дает слишком высокие значения для $\cos \varphi_1$, так как в этом уравнении не учитывается индуктивность, нагреваемого тела.

На фиг. 101 даны значения $\cos \varphi_1$ в зависимости от частоты. В пределе (при $f \rightarrow 0$) $\cos \varphi_1$ системы индуктор — нагреваемое тело стремится к значению около 0,7, так как он не может быть больше $\cos \varphi_2$ нагреваемого тела.

До сих пор для наглядности принимали значение вторичного тока I_2 равным единице. Определим теперь его абсолютную величину, а также значения первичного тока I_1 и напряжения U , исходя из необходимой для нагрева закаливаемого слоя мощности

$$P_2 = I_2^2 R_2 \quad (\text{X}, 24)$$

и

$$P_2 = \frac{2\pi r^2 x_k C_0 t}{240 t \eta}, \quad (\text{X}, 25)$$

откуда

$$I_2 = \sqrt{\frac{C_0 t \delta_2 x_k}{240 \rho t_k \eta}}, \quad (\text{X}, 26)$$

где t_k — время нагрева;

η — термический к. п. д.;

$C_0 t$ — количество тепла, необходимое для нагрева 1 кг на 1° С.

При $x_k = \delta_2$

$$I_2 = \delta_2 \sqrt{\frac{C_0 t}{240 \rho t_k \eta}}. \quad (\text{X}, 27)$$

Для к. п. д. индуктора получим

$$\eta_1 = \frac{I_2^2 R_2}{I_2^2 R_2 + I_1^2 R_1} = \frac{1}{1 + 2 \frac{r_1}{r_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu}}}. \quad (X, 28)$$

В приведенном выше расчете, получен несколько преуменьшенный первичный ток I_1 , вследствие чего получаются несколько преувеличенные $\cos \varphi_1$ и η_1 ; однако этот расчет вполне пригоден для практического применения. При очень коротких индукторах здесь надлежит внести поправки, более точно подсчитав величины M и L .

4. Изменение параметров индуктора при изменении длины и частоты

Все величины в расчете (R_1 , R_2 , L_1 , L_2 и P_1) относятся к 1 см длины индуктора. При длине его, равной l см, получим следующее:

$$\left. \begin{aligned} R_{1l} &= \frac{1}{l} R_1; \quad R_{2l} = \frac{1}{l} R_2; \quad I_{1l} = I_1; \quad I_{2l} = I_2 \\ L_{1l} &= \frac{1}{l} L_1; \quad L_{2l} = \frac{1}{l} L_2; \quad P_{1l} = l P_1. \end{aligned} \right\} \quad (X, 29)$$

$\cos \varphi_1$, $\cos \varphi_2$, η_1 и η_2 останутся постоянными.

Если задаться вопросом, как меняются все перечисленные величины при изменении частоты в n раз, то получим зависимости, приведенные в табл. 18.

Таблица 18

Коэффициенты для электрических величин индуктора или воздушного трансформатора при $f' = nf$, $x' = x = \text{const.}$

Величина	Коэффициент	Величина	Коэффициент	Величина	Коэффициент
U	n	IR	$\sqrt{n^{**}} I^*$	$I\omega L$	n
I	1	R	$\sqrt{n^{**}} I^*$	L	1
$P = UI$	n	$j = \frac{I}{q}$	$\sqrt{n^{**}} I^*$	w	$\sqrt{n^{***}} n^*$
$\frac{P}{G}$	n	$I^2 R$	$\sqrt{n^{**}} I^*$	$\frac{R}{\omega L}$	$\frac{1}{\sqrt{n^{**}}} \frac{I^*}{n}$
q^{***}	$\frac{I^{**}}{\sqrt{n}} I^*$	g	1	$\frac{I^2 R}{G}$	$\sqrt{n^{**}} I^*$
Φ	1	B	1	p	n

5. Индуктор для плоских предметов без железа

При закалке плоских предметов условия работы индуктора значительно ухудшаются, если не применять железных магнитопроводов, предложенных автором совместно с А. А. Фогелем (авторское свидетельство № 54496).

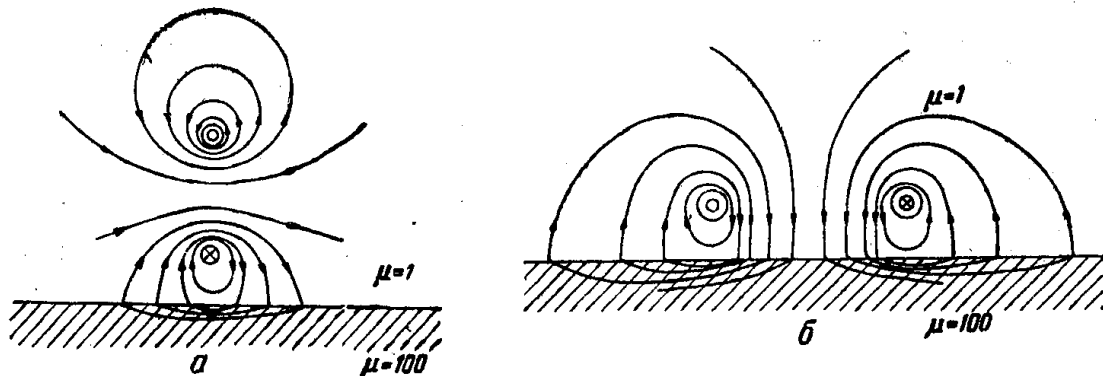
* При низких частотах.

** При высоких частотах.

*** Сечение, занятое током.

Рассмотрим здесь несколько разновидностей индуктора.

Для понимания их особенностей приведем общую схему работы плоского индуктора. В простейшем случае это будет индуктор в виде петли. Для упрощения сперва примем ток, сосредоточенным не равномерно по проводу, а в тонкой нити, расположенной в середине наружной поверхности провода.



Фиг. 102. Петлевой индуктор.

а—стороны петли лежат одна над другой; б—обе стороны петли лежат на одном расстоянии от поверхности.

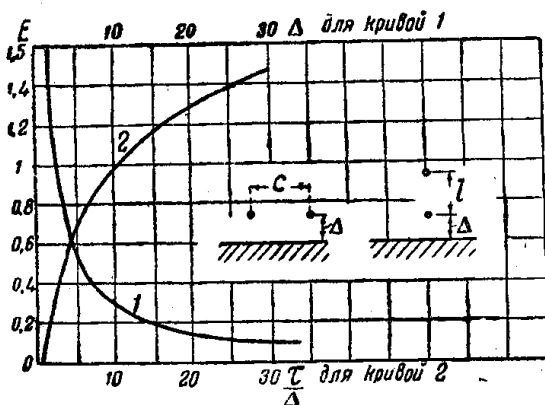
Такой индуктор может иметь вид, показанный на фиг. 102,б, когда обе стороны петли лежат на одном расстоянии от закаливаемой поверхности. Однако возможно и расположение петли, показанное на фиг. 102,а.

Электродвижущая сила, создаваемая петлей, выражается уравнением (1,5), причем значительную роль играет отношение расстояний

между сторонами петли $\frac{h_1}{h_2}$.

С уменьшением этого отношения до $\frac{h_1}{h_2} = 1$ э. д. с. падает до нуля.

При практическом применении нас интересует расстояние между сторонами петли или шаг ее τ и расстояние между нижним проводом и нагреваемым телом Δ , которое играет большую роль. На фиг. 103 приведены кривая 1, показывающая зависимость э. д. с. в точке нагреваемой поверхности, ближайшей к петле, от расстоя-



Фиг. 103. Зависимость э. д. с. от $\frac{\tau}{\Delta}$ и Δ .

ния Δ при $\frac{\tau}{\Delta} = \text{const}$, и кривая 2, изображающая зависимость от отношения $\frac{\tau}{\Delta}$ при постоянном расстоянии Δ .

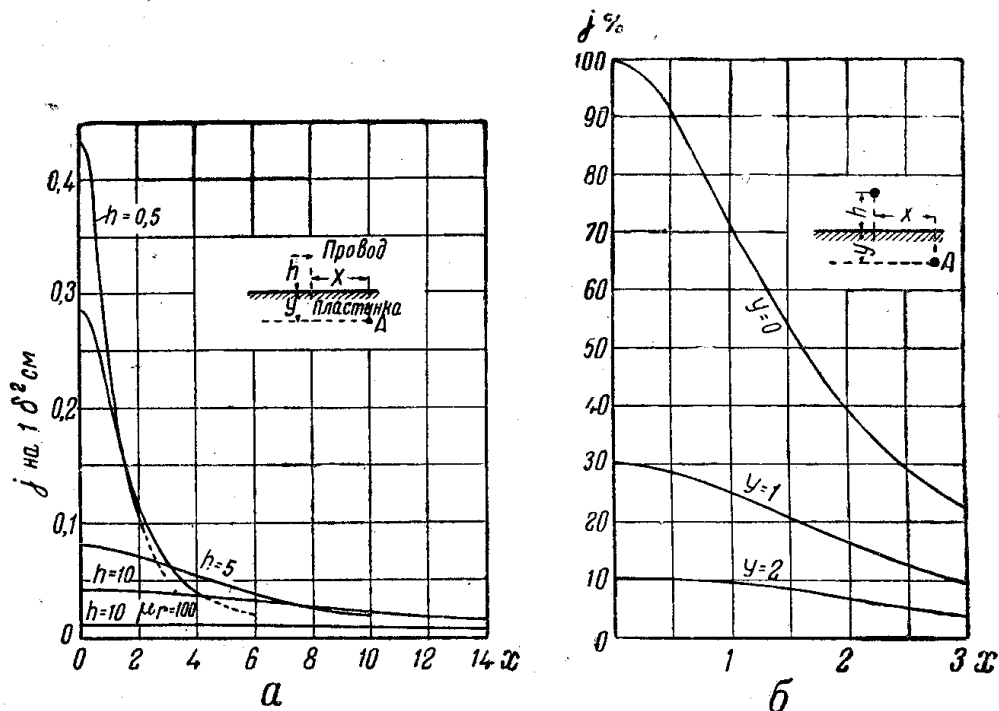
С уменьшением $\frac{\tau}{\Delta}$ э. д. с. быстро падает.

В соответствии с уравнением (1, 5) для э. д. с. и зависимостью от показанного на фиг. 103 отношения $\frac{\tau}{\Delta}$ в проводящей поверхности будет проходить ток, который нагреет ее.

Величина этого тока для упрощенного случая, который рассматриваем, а именно тока в виде нити, может быть определена по уравнению, данному Беннетом.

Распределение плотности тока, отвечающее этому случаю, показано на фиг. 104,а, где для общности расстояния даны в единицах проникновения δ .

С увеличением расстояния плотность тока быстро падает. Так, при $h=0,58$ плотность тока равна $0,43 \text{ а}/\delta^2 \text{ см}$, а при $h=18$ плотность тока равна лишь $0,28 \text{ а}/\delta^2 \text{ см}$ (здесь плотность также рассчитана не на квадратные сантиметры, а на площадь, измеренную в единицах проникновения $\delta^2 \text{ см}$). Индуктированный в проводящем теле ток тоже падает по мере удаления от поверхности вглубь (в направлении y), а также по мере удаления от точки, лежащей непосредственно под проводом в направлении x .



Фиг. 104. Распределение плотности тока, индуктируемого в проводящем теле, в зависимости от расстояния x , $j = \varphi(x)$, где x —в единицах δ .

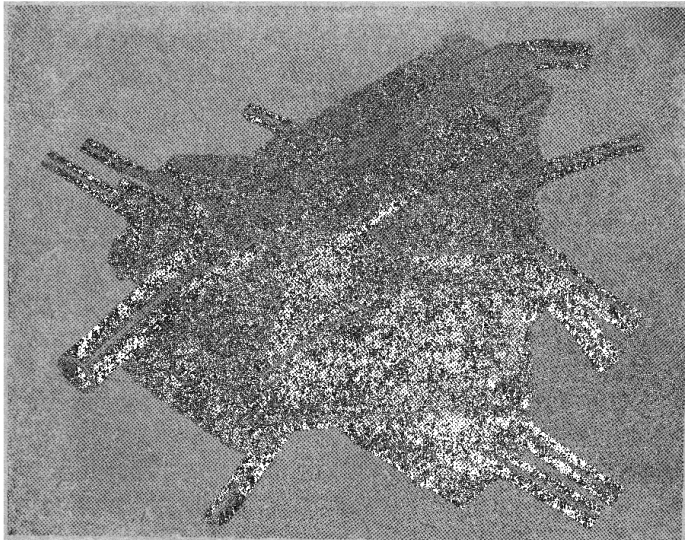
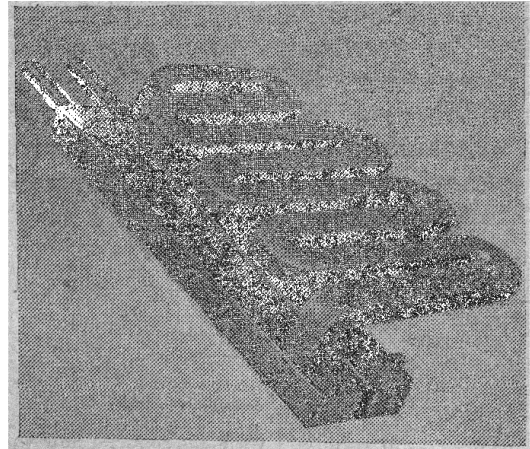
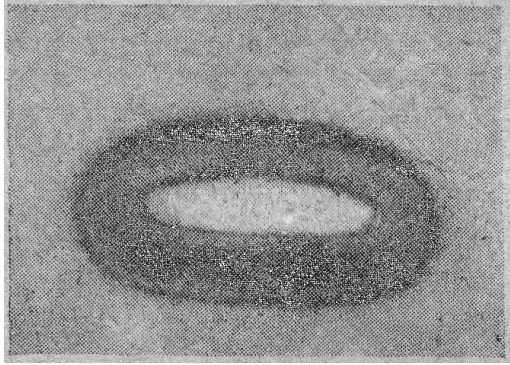
а—для различных h ; б—для различных y .

Графики, дающие зависимость плотностей от расстояний, измеренных в этих направлениях, приведены на фиг. 104. Для плотности также взяты значения, рассчитанные на площади, измеренные в единицах проникновения. Поэтому для перерасчета на плотность на 1 см^2 приведенные данные необходимо умножить на δ^2 .

Как видим по этим графикам, ток в нагреваемой поверхности распределяется не сосредоточенно, в виде тонкой линии, а в виде размытой широкой полосы. Но так как тепловое действие тока пропорционально квадрату плотности, то тепловая плотность мощности будет идти более сосредоточенно, по более крутой кривой.

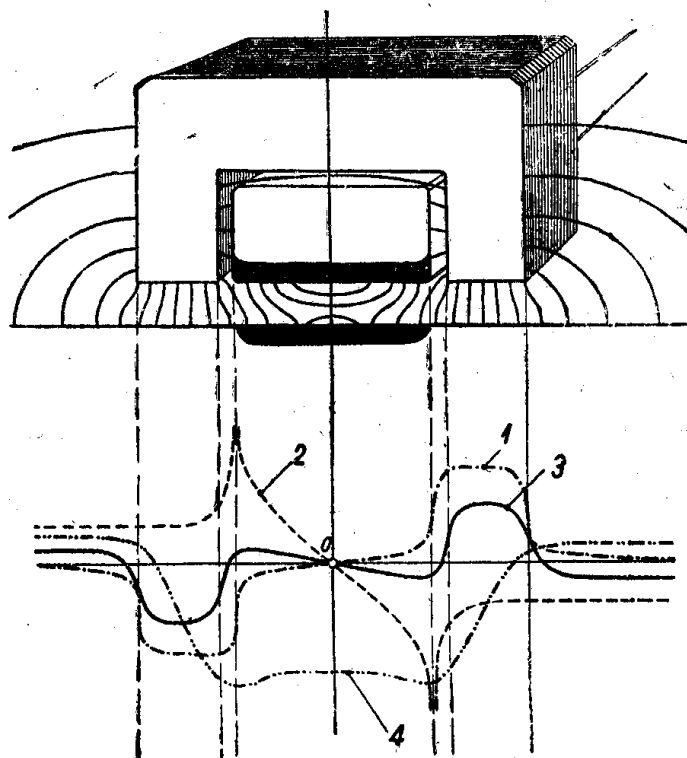
Несмотря на это, даже при токе, сосредоточенном в нити, трудно получить требуемое сосредоточение тока ввиду закономерностей, относящихся к магнитному потоку. Эти закономерности обуславливают получение э. д. с. и тока в нагреваемой поверхности.

Однако сосредоточение тока при нагреве плоских поверхностей крайне желательно.



6. Индуктор с железной магнитной цепью

Вопрос о создании индуктора для плоских предметов, особенно для последовательной закалки, не имеющего описанных выше недостатков, был разрешен автором посредством применения железной магнитной цепи для концентрации магнитного потока, уменьшения тока намагничивания и потока рассеяния, и тем самым увеличения связи между индуктором и закаливаемой поверхностью. Схематически такой индуктор показан на фиг. 107.



Фиг. 108. Распределение (схематическое) магнитного потока в индукторе, изображенном на фиг. 107.

1—основное поле, создаваемое током индуктора; 2—поле реакции от тока в нагреваемом теле; 3—результатирующее поле полей 1 и 2; 4—поток, идущий через кольцевое сечение толщиной δ .

На фиг. 108 показано распределение магнитного поля, магнитного потока индуктора, закаливаемого тела и результирующего потока.

Для такого индуктора получается следующее соотношение для распределения потерь в железе и меди:

частота	2000 гц
потери в железе на 1 см длины	15 вт/см
потери в меди на 1 см длины	820 вт/см

Приведенные данные показывают, что устройство железной магнитной цепи почти не вносит потерь.

Железная магнитная цепь, помимо устранения недостатков, присущих плоскому индуктору, обладает еще многими преимуществами. Поэтому ее можно с успехом применять не только для плоских индукторов, но и для индукторов цилиндрической формы, особенно при закалке внутренних поверхностей, где условия работы значительно тяжелее.

ГЛАВА XI

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗАКАЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

1. Частота

Один из важнейших параметров закалочного устройства — частота. Ее влияние на работу устройства сказывается на чисто термической и на электрической стороне. Хотя выбор частоты был рассмотрен ранее (гл. II п. 11), однако целесообразно здесь сделать сводку всех вопросов, связанных с частотой.

Металловедческая и термическая стороны

Ранее было указано (в главах I и V), что от выбора частоты зависит глубина проникновения тока в металл, а следовательно, и глубина активного слоя, в котором происходит выделение тепла. От величины этого слоя зависит тип нагрева, обуславливающий, как показано в табл. 5, следующее: 1) величину перегрева, 2) скорость нагрева, 3) производительность, 4) термический к. п. д.

Электрическая сторона

1. От выбора частоты зависит, прежде всего, коэффициент мощности ($\cos \varphi$) системы индуктор—нагреваемое тело. Чем выше частота, тем ниже коэффициент мощности, как это видно по уравнениям (X, 22) и (X, 23), и тем больше kva конденсаторной батареи и трансформатора.

2. Размеры и вес закалочного трансформатора зависят от частоты, уменьшаясь с ее увеличением:

$$G = \frac{m_2 kva}{\sqrt{f}} \quad (XI, 1)$$

3. При закалке цилиндрических поверхностей частота должна быть такой, чтобы удовлетворялось следующее неравенство:

$$f > \frac{20\,000}{d^2}. \quad (XI, 2)$$

Если это условие не будет соблюдено, электрический к. п. д. резко падает (фиг. 109). Эта кривая $\eta_1 = \varphi(f)$ построена для диаметра

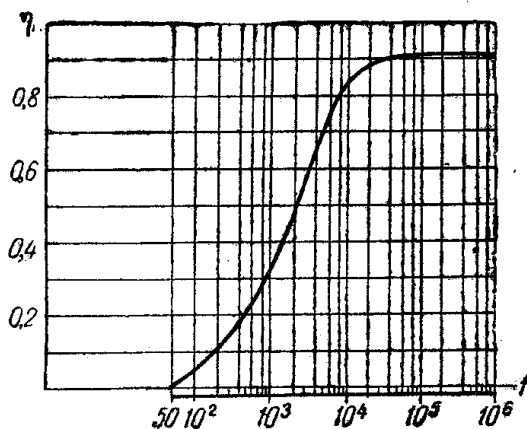
$d=60$ мм, однако если взять за постоянную частоту $f=\text{const}$, то можно построить кривую $\eta_1=\varphi(d)$, имеющую тот же вид.

4. При частотах свыше 15 000 гц к. п. д. генератора составляет около 35—50%, так как здесь можно применить лишь ламповый генератор.

При частотах 2000—5000 гц к. п. д. генератора с двигателем составляет около 78—82%, который дает применяемый в этих случаях машинный генератор.

5. При закалке тел сложной конфигурации, когда возможно их сечение представить в виде системы кругов, равномерный закаленный слой обеспечивается лишь некоторой определенной частотой, удовлетворяющей уравнению (VI, 31).

6. Выбор частоты в зависимости от типа нагрева можно сделать при помощи табл. 5 и в зависимости от рода детали и других данных, приведенных в табл. 19.



Фиг. 109. Зависимость электрического к. п. д. от частоты при нагреве цилиндрических тел диаметром 60 мм.

Таблица 19

Частота закалочного устройства в зависимости от глубины закаливаемого слоя, размеров детали и рода закаливаемого предмета

Частота гц	Система генератора	Глубина закали- ваемого слоя мм	Диаметр закали- ваемой детали мм	Название закаливаемой детали	
Звуковая частота	50	Сеть	10 и выше	300	Прокатные валы, крупные шейки, ролики тракторов
	150	Трансформатор умножитель	8 и выше	300	Прокатные валы, крупные шейки, ролики тракторов
	500	Машина	5—20	200—400	Прокатные валы, ролики, крупные валы, плоские предметы больших размеров при большой глубине
	2000	„	1—2	30—300	Пальцы, валики, калибры, шариковые подшипники, инструмент, шестерни крупного модуля ($m>7$) при большой производительности (около 1000 шт. в час.)
	2000	„	3—15	30—300	Коленчатые и другие валы, распределительные валы, шейки крейцкопфа, рельсы, стрелки, крестовины, бандажи, плоские предметы при глубине слоя 3—15 мм, кольца шарикоподшипников диаметром свыше 100 мм, зубья шестерен модуля выше 10, шпиндели

Радиочастота	Частота гц	Система генератора	Глубина закали- ваемого слоя мм	Диаметр закали- ваемой детали мм	Название закаливаемой детали
	5000	Машина	1—5	20—300	Те же объекты, что и при частоте 2000 гц, но при меньших производительностях, а также больших р (чугун); гильзы цилиндров двигателей
	15000	"	1,5	15—300	Коленчатые валы, шейки при небольшой глубине, шестерни модуля 3, плоские предметы при глубине 1—2 мм, гильзы цилиндров
	10 ⁵ —10 ⁶	Ламповые генераторы (дуга, искра)	0,2—3	5—300	Шейки, валики, коленчатые валы при малой производительности (около 40 шт. в час), инструмент, гильзы цилиндров, шестерни модуля 0,5—2
	10 ⁷	Лампа	0,2—0,5	1—5	Закалка любых объектов при малой производительности, изделий малого диаметра, проволоки

2. Напряжение

Если генератор машинный, то при использовании параллельной схемы включения в большинстве случаев напряжение генератора целесообразно выбирать равным 750—850 в, так как только тогда закалочный трансформатор может быть построен достаточно компактным. Напряжение конденсаторов здесь будет то же, что и генератора.

Если генератор ламповый с промежуточным контуром, то напряжение на трансформаторе выбирают 3000—5000 в, причем большее значение берут при больших мощностях.

3. Коэффициент мощности системы: индуктор — закаливаемое тело

Величина коэффициента мощности зависит от частоты, а в случае нагрева цилиндрических поверхностей — также и от размеров тела. При увеличении диаметра $\cos \varphi$ обычно увеличивается, так как значение величины $r_1^2 - r_2^2$, определяемой расстоянием между индуктором и нагреваемым телом, может быть сделано малым по отношению к величине r_2 :

$$\cos \varphi_1 \approx \operatorname{ctg} \varphi_1 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{f} \frac{r_2}{r_1^2 - r_2^2}}. \quad (\text{XI}, 3)$$

В случае применения железных магнитных цепей в индукторе, например, согласно фиг. 107, $\cos \varphi$ получает большое значение. Однако величина $\cos \varphi$ никогда не превосходит 0,7, так как уравнение (XI, 3) вполне справедливо лишь тогда, когда частота велика и $\cos \varphi$ зависит главным образом, как видно на фиг. 99 и 101, от рассеяния индуктора. При низких же частотах основную роль играет $\cos \varphi_2$ нагреваемого тела, который согласно уравнению (X, 9) не зависит от частоты и имеет значение около 0,7. К этому значению $\cos \varphi$ системы приближается при частоте около 50 гц.

Величина $\cos \varphi_1$ определяет величину конденсаторной батареи и ее стоимость.

Для машинного генератора величина батареи будет

$$P_c \approx P \left(\frac{1}{\cos \varphi_1} + 0,5 \right). \quad (\text{XI}, 4) \quad \text{Руб./кВа}$$

Стоимость конденсаторной батареи составляет

$$G' = g F_c. \quad (\text{XI}, 5)$$

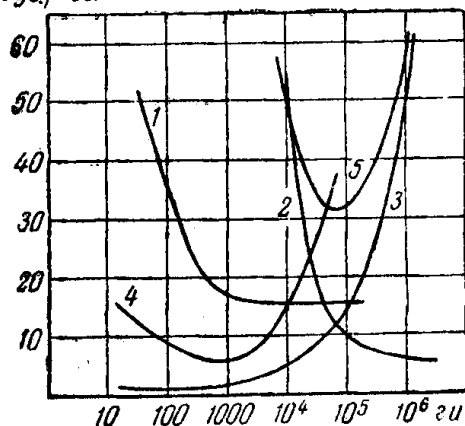
где g — стоимость 1 кВа конденсатора — берут по кривым, изображенным на фиг. 110.

4. Коэффициент мощности генератора

Для лучшего использования машинного генератора и увеличения его к. п. д. целесообразно настраивать контуры таким образом, чтобы генератор работал при $\cos \varphi$ около 0,7—0,8 при опережающем токе (фиг. 111).

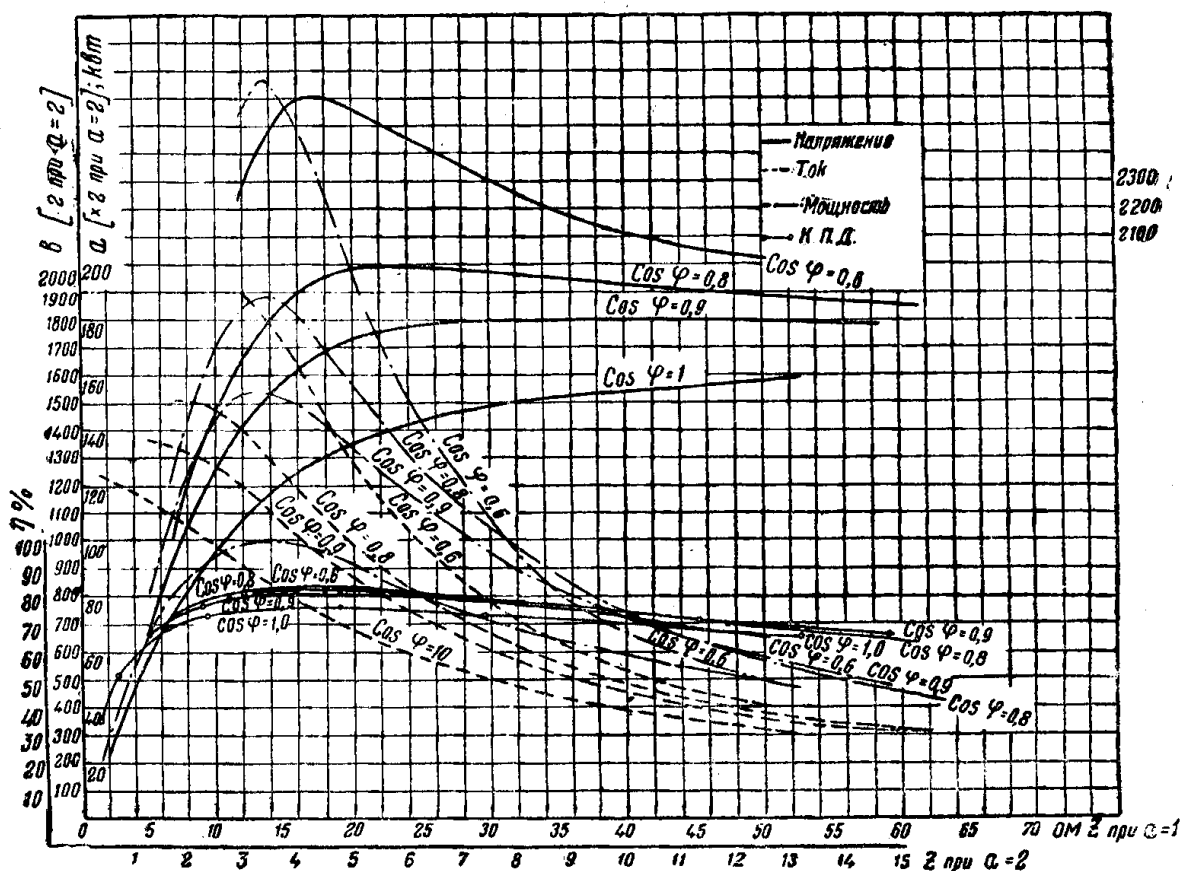
5. Коэффициент полезного действия различных частей закалочного устройства

Мощность и стоимость генератора и других устройств, а также стоимость расходуемой на закалку электроэнергии определяются к. п. д. закалочного устройства в целом.



Фиг. 110. Стоимость 1 кВа конденсатора.

1—бумажный конденсатор; 2—слюдяной конденсатор; 3—общее количество кВа установки в зависимости от частоты; 4—общая стоимость всех бумажных конденсаторов установки; 5—общая стоимость всех слюдяных конденсаторов установки.



Фиг. 111. Зависимость напряжения генератора и мощности его от нагрузки Z при разных $\cos \varphi$.

В свою очередь стоимость закалки определяется в основном стоимостью электроэнергии и амортизацией, зависящей от стоимости закалочного устройства. Ввиду этого к. п. д. заслуживает особого внимания.

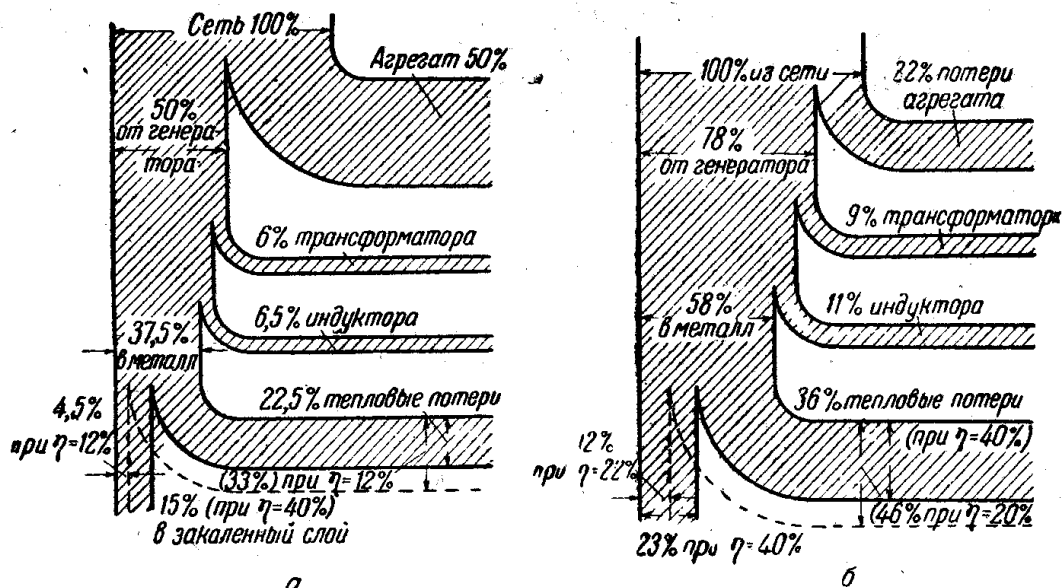
Потери, обуславливающие тот или другой к. п. д. всего устройства, распределяются по отдельным его частям неравномерно и, кроме того, значительно зависят от рода закаливаемой детали и ее размеров, а также от частоты и рода генератора. Поэтому целесообразно рассмотреть, кроме к. п. д. всего устройства, также к. п. д. отдельных его частей.

Общий к. п. д. можно представить в виде выражения

$$\eta_t = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4,$$

где η — термический к. п. д.;
 η_1 — электрический к. п. д.;
 η_2 — к. п. д. трансформатора;
 η_3 — к. п. д. генератора;
 η_4 — к. п. д. двигателя.

Потери в проводах, конденсаторах и пр. обычно незначительны. В отдельных же случаях их можно прибавить к потерям в генераторе, несколько уменьшив его к. п. д.



Фиг. 112. Потери и к. п. д. закалочной установки.

а—при радиочастоте; б—при 2000 гц.

На фиг. 112 приведен график, дающий представление о распределении потерь в отдельных частях машинной и ламповой установок.

Термический к. п. д. Одновременная закалка

Величина η имеет наименьшее значение сравнительно с к. п. д. других частей установки и на него приходится обращать особое внимание.

Величина η зависит от примененного в устройстве типа нагрева; к. п. д. мал при первом типе (чисто поверхностный нагрев) и достаточно велик при третьем типе нагрева (глубинный нагрев). Кроме того, термический к. п. д. зависит от допущенного перегрева. При большом перегреве он сравнительно велик и мал при малом перегреве,

особенно при первом типе нагрева, когда он определяется уравнением (III, 23)

$$\eta \approx 1,25 \frac{\Delta T}{\theta_0}.$$

Это уравнение показывает, что η не зависит от скорости нагрева и удельной мощности. В интересующих нас пределах η почти линейно зависит от ΔT .

В табл. 20 приведены данные для термического к. п. д. при чисто поверхностном ($\xi=0$) и глубинном нагреве, относящихся к закалке плоских предметов значительной толщины по сравнению с глубиной закаленного слоя. Эти данные можно принять для случаев закалки каких-либо других поверхностей, например цилиндрических или плоских ограниченной толщины, в том случае, если радиус кривизны достаточно велик, удовлетворяя уравнению (III, 24), а при плоскостях ограниченной толщины отношению

$$\frac{x_k}{h} < 20. \quad (XI, 6)$$

Таблица 20

Зависимость термического к. п. д. от перегрева ΔT

ΔT °C	К. п. д., %	
	чисто поверхностный нагрев	глубинный нагрев
50	7	20
100	13	35
150	17	50
200	21	55

Если эти условия не соблюдены, то термический к. п. д. можно определить из уравнений (III, 30), (III, 42) и (III, 44), учитывающих кривизну и толщину закаливаемой поверхности.

Термический к. п. д. η' . Последовательная закалка

Значения термического к. п. д., определяемые уравнением (III, 23) и табл. 20, полностью отвечают закалке с одновременным нагревом. При последовательной закалке явление, определяющее распределение температуры в закаливаемом слое и глубинных слоях, весьма сильно усложняется, особенно при закалке на больших удельных мощностях и частотах, соответствующих третьему типу нагрева. Процесс в этом случае зависит от переменных параметров μ , ρ и α еще больше, чем при одновременном нагреве, и представляет с математической стороны большие трудности. Обычно здесь к. п. д. η' имеет меньшие значения, чем при одновременной закалке, так как значительная часть тепла, передаваемого телу, уносится закаливающей водой с той части поверхности, которая уже подверглась закалке. В этом случае для к. п. д. можно брать в самых ориентировочных подсчетах значения на 40% меньшие, чем те, которые относятся к одновременной закалке. Более точные данные для термического к. п. д. при последовательной закалке можно получить, используя данные таблиц, приведенных в главе XIV (пп. 3, 4, 5 и 6), относящихся к последовательной закалке различных объектов. На основе данных этих таблиц, сопоставляя их с уравнениями (XI, 11), (XI, 12) и (XI, 13), можно определить значения η' для последовательной закалки.

Электрический к. п. д. (к. п. д. индуктора η_1)

Этот к. п. д. учитывает потери в индукторе и определяется отношением

$$\eta_1 = \frac{\text{вся энергия, передаваемая в закаливаемое тело}}{\text{энергия, подводимая к индуктору}}$$

Несоблюдение для цилиндрических предметов неравенства

$$f > \frac{20\,000}{d^2}$$

вызывает быстрое понижение к. п. д. η_1 до весьма малой величины. Кроме того, в этом случае к. п. д. зависит не только от диаметра закаливаемого тела и параметров (ρ_1 , ρ_2 и μ), но и от зазора между индуктором и закаливаемой поверхностью, или отношения $\frac{r_1}{r_2}$.

В первом приближении для нагрева цилиндрических предметов при соблюдении условий указанного неравенства электрический к. п. д. η_1 можно определить из уравнения

$$\eta_1 \approx \frac{0,9d_2 \sqrt{\rho_2}}{0,9d_2 \sqrt{\rho_2} + d_1 \sqrt{\rho_1}} = \frac{1}{1 + 1,11 \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}}, \quad (\text{XI, 7})$$

или упрощенно

$$\eta_1 \approx \frac{1}{1 + 0,1 \frac{d_1}{d_2}}, \quad (\text{XI, 8})$$

где d_2 и d_1 — диаметры закаливаемого тела и индуктора;
 ρ_2 — удельное сопротивление закаливаемого тела в горячем состоянии;
 ρ_1 — удельное сопротивление меди индуктора.

Обычно в холодном состоянии $\rho_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ омсм, а в горячем состоянии $\rho = 80 \cdot 10^{-5}$ омсм; для меди $\rho_1 = 0,2 \cdot 10^{-5}$ омсм.

Величина электрического к. п. д. для цилиндрических предметов колеблется в пределах 70—90%. Чаще всего η_1 можно принять равным 75%.

Уравнение (XI, 8) дает значения, близкие к тем, которые можно получить из уравнения (X, 28).

При закалке плоских предметов электрический к. п. д. значительно больше, чем при цилиндрических поверхностях, и зависит от конструкции и соотношений между размерами индуктора. Так, наличие железной магнитной цепи у индуктора значительно повышает электрический к. п. д. При наиболее часто встречающихся случаях, например для индуктора, изображенного на фиг. 107, электрический к. п. д. при частоте 2000 гц составляет около 80%. В этом случае лучше всего определять к. п. д. из опытных данных, приведенных в таблицах главы XIV.

В случае петлевого индуктора без железа электрический к. п. д., особенно при узкой меди индуктора, зависит от соотношения $\frac{\tau}{\Delta}$. При этом индукторе электрический к. п. д. падает с уменьшением частоты при одном и том же соотношении $\frac{\tau}{\Delta}$, так как вследствие увеличения глубины проникновения δ увеличивается эффективное расстояние между током индуктора и током нагреваемого тела.

При частотах звукового диапазона петлевой индуктор без железной магнитной цепи может иметь достаточно высокий электрический к. п. д. лишь при большой ширине меди индуктора, достигая здесь 60%.

Коэффициент полезного действия η_2 закалочного трансформатора

При чисто активной нагрузке ($\cos \varphi = 1$) к. п. д. можно сделать очень большим, особенно при высоких частотах. Однако в последнем случае $\cos \varphi$ обычно весьма низок, что сильно увеличивает потери, вносимые трансформатором. Обычно к. п. д. трансформатора лежит в пределах 80—93%. В большинстве случаев его можно принять для радио и для повышенных частот равным 85%.

Для избежания ошибок необходимо отметить, что ввиду работы трансформатора в настроенном контуре для простоты здесь, как и везде в этой книге, под к. п. д. трансформатора понимается, если это не оговорено особо, выражение

$$\eta_2 = \frac{kva}{kva + w},$$

где w — потери при тех kva , которые имеют место в трансформаторе при данном закалочном режиме.

Что касается kva , то здесь разумеется активная мощность, отдаваемая трансформатором.

Ввиду этого принятый нами к. п. д. η_2 будет

$$\eta_2 \approx \frac{kva}{kva + \frac{w}{\cos \varphi}}. \quad (XI, 9)$$

Коэффициент полезного действия η_3 генератора и η_4 двигателя

Для агрегата, состоящего из машинного генератора и двигателя, к. п. д. лежит в пределах 72—85%. Для наиболее употребительного случая генератора (150 kva , 2000 $гц$) $\eta_{3,4} = 78\%$. При ламповом генераторе полный к. п. д. генератора лежит в пределах 35—60%.

Сводка к. п. д. различных частей установки

Для большей наглядности данные к. п. д. всех главных частей закалочной установки сведены в табл. 21.

Таблица 21

Величины к. п. д. различных составных частей установки

К. п. д.	Обозначение	Пределы %	Наиболее часто встречающийся к. п. д., %
Термический	η	12—50	30
Электрический (индуктора)	η_1	60—90	85
Закалочного трансформатора	η_2	80—93	88
Агрегата, состоящего из генератора машинного типа, вместе с двигателем . . .	$\eta_{3,4}$	72—83	78
Лампового генератора вместе с выпрямительным устройством	$\eta_{л}$	35—50	40

6. Мощность

Мощность — наиболее важный параметр, так как она определяет стоимость установки и стоимость потребляемой энергии. В соответствии со сказанным выше о к. п. д. представляет интерес полезная мощность, мощность, отдаваемая генератором и, наконец, мощность, употребляемая из сети.

Полезная мощность, сообщаемая закаливаемому слою

Эта величина является исходной при подсчете мощности генератора и потребляемой из сети и определяется уравнением

$$P = \frac{V \gamma c_{0t} \theta_1}{0,24 \cdot 1000 t_k} \approx \frac{5V}{t_k} \approx \frac{0,5 S x_k}{t_k} \text{ квт}, \quad (\text{XI}, 10)$$

где V — объем закаливаемого слоя, см^3 ;

x_k — в мм ;

c_{0t} — средняя теплоемкость, равная 0,17 в пределах $T_0 - T_k$;

θ_1 — повышение температуры закаливаемого слоя;

d — в см ;

S — площадь закаливаемого слоя.

Для одновременной заковки цилиндрических деталей полезная мощность, сообщаемая закаливаемому слою, будет

$$P = \frac{0,5 \pi d l x_k}{t_k} = \frac{1,6 d l x_k}{t_k} \text{ квт}. \quad (\text{XI}, 11)$$

Для последовательной заковки цилиндрических предметов та же величина будет

$$P = 1,6 d x_k v \text{ квт}. \quad (\text{XI}, 12)$$

Для последовательной заковки плоских предметов

$$P = 0,5 b x_k v \text{ квт}, \quad (\text{XI}, 13)$$

d и b — в см ; v — в см/сек .

Мощности, передаваемые закаливаемому телу; мощность генератора и мощность, потребляемая из сети

Для получения полной мощности, передаваемой всему закаливаемому телу, используем приведенное выше значение термического к. п. д. η , подставляя его в уравнение

$$P' = \frac{P}{\eta}. \quad (\text{XI}, 14)$$

Так же точно для мощности, подводимой к индуктору, найдем значение из уравнения

$$P'' = \frac{P}{\eta \eta_1}, \quad (\text{XI}, 15)$$

где η_1 — электрический к. п. д., определяемый из уравнения (XI, 8).

Наконец для мощности генератора и мощности, потребляемой из сети, аналогичным образом напишем

$$P_1 = \frac{P}{\eta \eta_1 \eta_2} \quad (\text{XI}, 16)$$

и

$$P_2 = \frac{P}{\eta \eta_1 \eta_2 \eta_{3,4}}. \quad (\text{XI}, 17)$$

Во всех этих уравнениях P берут из уравнения (XI, 10), а η , η_1 , η_2 и $\eta_{3.4}$ можно взять также из табл. 21.

Помимо только что описанного определения мощности генератора и сети, можно пользоваться данными, помещенными в таблицах главы XIV для удельных мощностей. В этом случае мощность генератора и из сети может быть получена из уравнений

$$P_1 = p_3 S \text{ и } P_1 = p'_3 s; \quad (\text{XI, 18})$$

$$P_2 = p_2 S \text{ и } P_2 = p'_2 s, \quad (\text{XI, 19})$$

где S — площадь закаленного слоя, см^2 ;
 s — длина периферии, см ;
 p_2 , p'_2 , p_3 и p'_3 — удельные мощности из таблиц (p_2 и p_3 — на 1 см^2 поверхности; p'_2 и p'_3 — на 1 см периферии).

7. Энергия, потребляемая на закалку

Этот параметр в основном определяет стоимость эксплуатации устройства. Он может быть найден из данных для мощности и времени нагрева по уравнению

$$W_2 = P_2 t. \quad (\text{XI, 20})$$

Однако потребителя обычно более интересует не расход энергии при непрерывной полной нагрузке генератора, а средний расход энергии на закалку той или другой детали с учетом холостого хода генератора во время промежутка между закалкой. Этот расход определяет стоимость заделки детали. Для получения этих данных необходимо учесть коэффициент загрузки генератора k и мощность его холостого хода P_0 .

Для средней мощности установки получим

$$P'' = k(P_2 - P_0) + P_0. \quad (\text{XI, 21})$$

Для расходуемой на данную деталь энергии с учетом холостых потерь генератора получим

$$W_3 = [k(P_2 - P_0) + P_0] t_k, \quad (\text{XI, 22})$$

где t_k — время заделки одной детали.

Для машинного генератора $P_0 = 10\% P_2$, а для лампового $P_0 = 30\% P_2$.

ГЛАВА XII

ЗАКАЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

1. Схема закалочного устройства

Общая схема закалочного устройства приведена на фиг. 5, 6 и 113 для случая использования машинного и лампового генераторов. При этом на фиг. 5 и 6 даны схемы для одновременной и на фиг. 113 для последовательной закалки.

Главные составные части устройства следующие: 1) генератор высокой или повышенной частоты, машинной или ламповой системы; 2) конденсаторная батарея; 3) понижающий закалочный трансформатор; 4) индуктор; 5) станок, на котором обычно монтируют закалочный трансформатор и индуктор; 6) устройство для подачи закалочной и охлаждающей воды; 7) включающие и регулирующие устройства.

Составные части устройства и основные их данные приведены ниже. Ламповый генератор показан на фиг. 114.

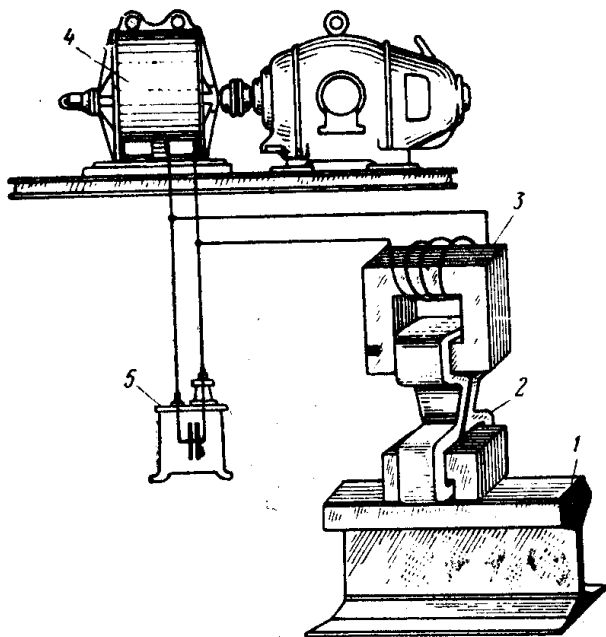
2. Генераторы машинного типа

Так как в большинстве случаев закалку целесообразнее всего производить на частотах звукового диапазона (500—10000 гц), то основным источником питания здесь можно считать машинный генератор звуковой частоты.

Типы машинных генераторов, изготовлявшихся до войны, приведены в табл. 22.

Что касается генераторов, применяемых в настоящее время в США, то основным здесь надо считать генератор 125 квт, 9600 гц, как это следует из таблицы на стр. 269.

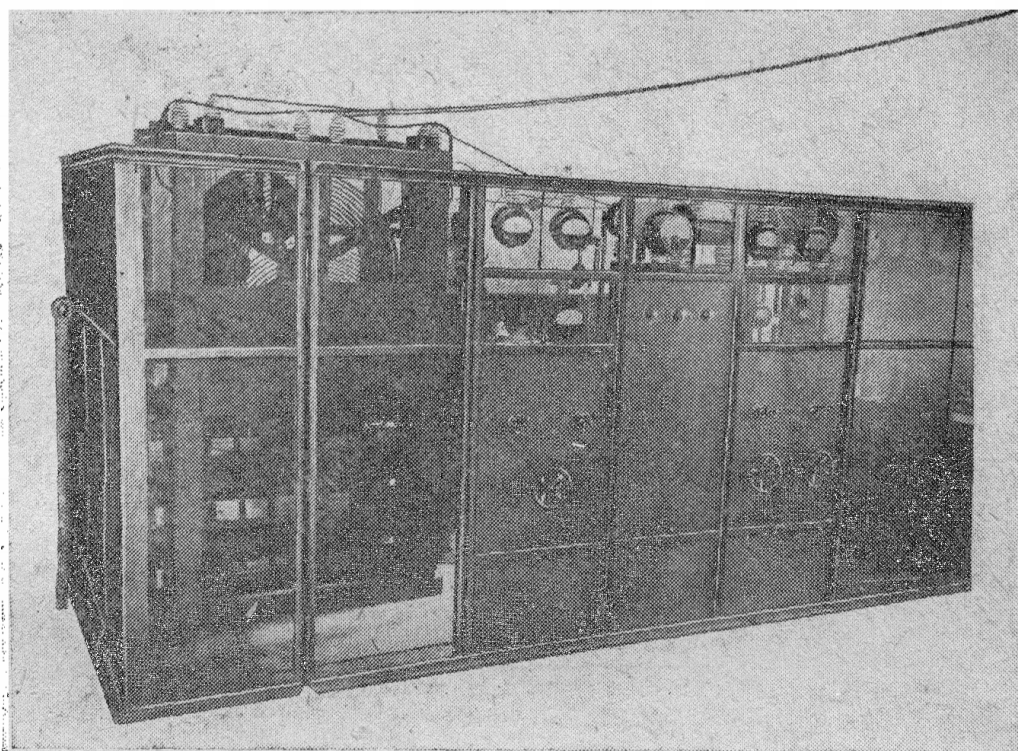
При работе от нашей сети 50 гц он дает 8000 гц, так как 9600 гц относятся к частоте двигателя 60 гц.



Фиг. 113. Схема закалочного устройства с машинным генератором для последовательной закалки.

1—закаливаемое изделие; 2—индуктор; 3—закалочный трансформатор; 4—генератор; 5—конденсатор.

Из приведенных в табл. 22 генераторов генератор типа МС-394-АН-2/5 строил ХЭТЗ по расчету и при технической помощи лаборатории автора.



Фиг. 114. Ламповый генератор.

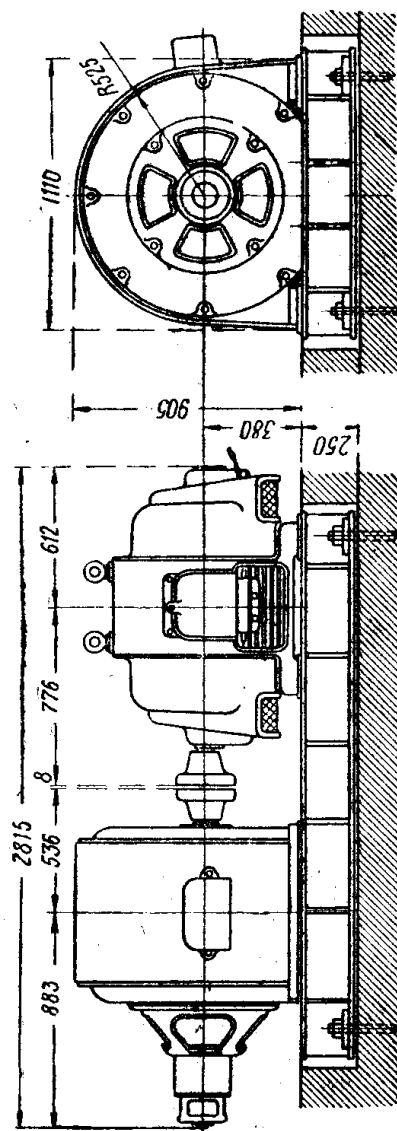
Размерные чертежи генераторов приведены на фиг. 115.

На фиг. 116 и 117 показаны общие виды генераторов 0-150 завода «Электросила» и МС-394-АН-2/5 ХЭТЗ.

Таблица 22

Генераторы завода «Электросила» и ХЭТЗ

Тип генератора	ВГ-2000-150	ВГ-2000-500	ВЧО-500-650	МС-394-АН-2/5
Частота, <i>гц</i>	2000	2000	500	5000
Мощность, <i>квт</i>	150	500	650	250
Напряжение, <i>в</i>	1500/750	2000	2000	1200/600
Ток статора, <i>а</i>	100	278	325	208/416
К. п. д., % (ориентировочно)	85	89	90	—
Число оборотов, об/мин	3000	3000	1500	1500
Двигатель, тип	БАМО-117-2 асинхронный	СМ-3000-2 синхронный	БАМО-158-4 асинхронный	МА-224-АН-8/4 асинхронный
Напряжение, <i>в</i>	380	3000	6000	6000
К. п. д., %	91,5	88	92	—
Возбудитель, тип	ПН-5	ПН-17,5	В-165	ПН-45
Подвозбудитель, тип	—	ПН-5	—	—
Агрегат в целом				
К. п. д., %	77,7	78,3	82,8	82
Вес, <i>т</i>	4,1	22	18,3	11,07
Цена без пускового приспособ- ления (ориентировочная), руб.	62500	225500	171500	—
Цена пускового приспособления (ориентировочная), руб.	—	13000	1600	—

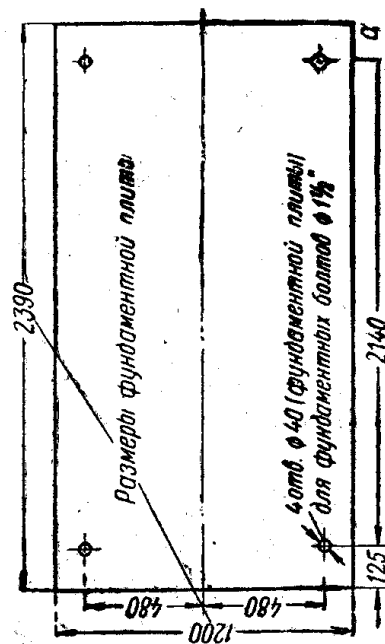


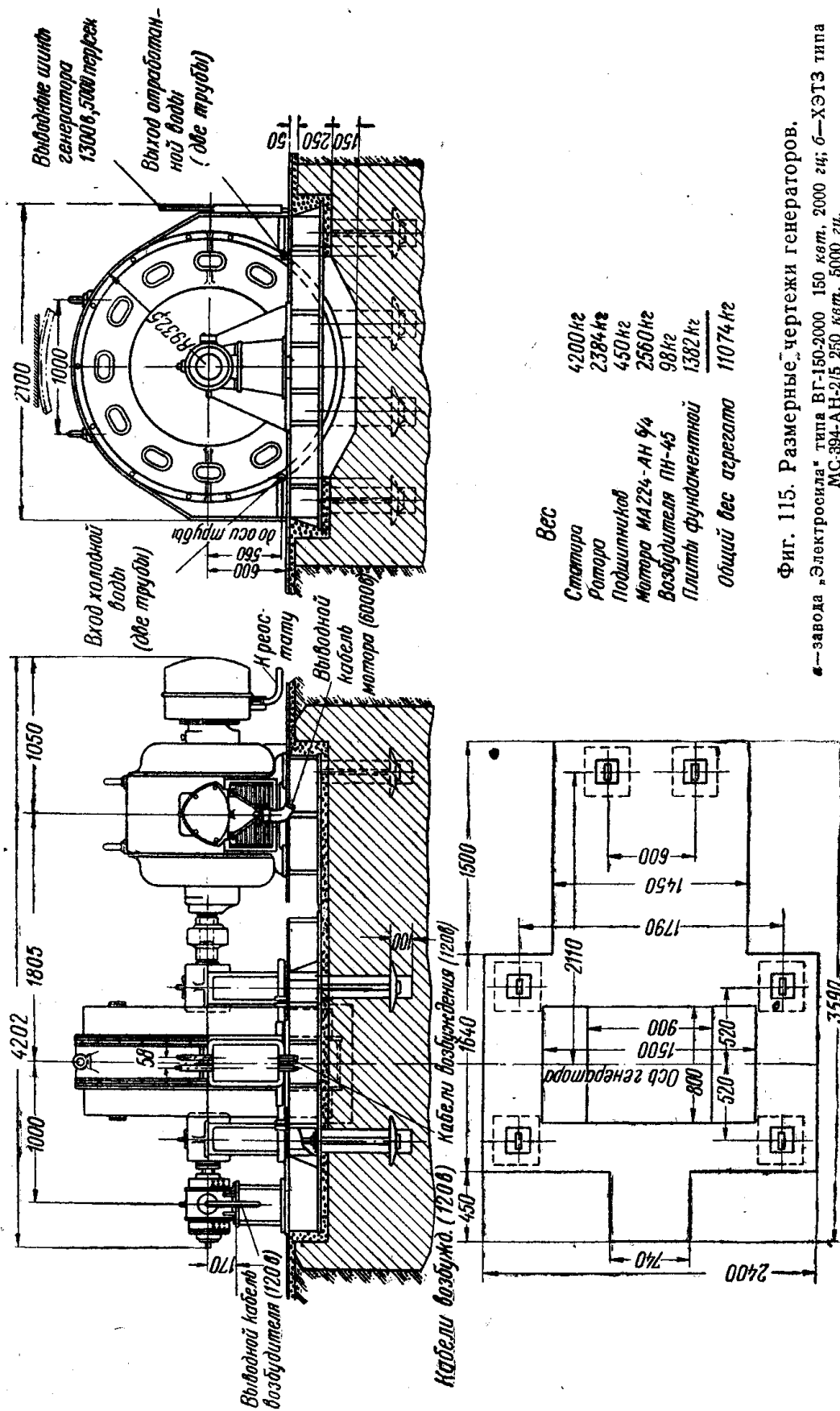
Вес агрегата

Вес генератора ВГ-2000-150-2200 кг

Вес двигателя БМД 117-2-1160 кг

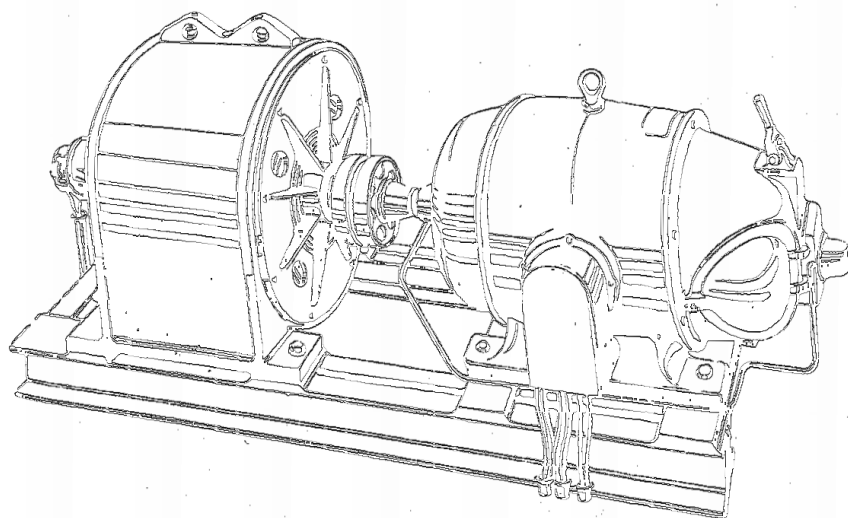
Вес фундаментной плиты - 670 кг



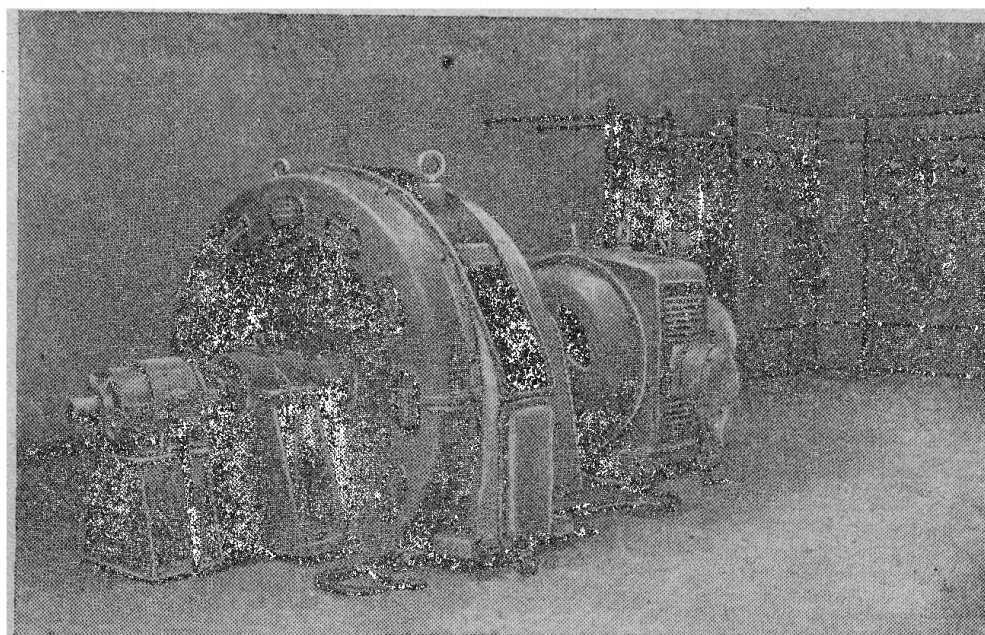


Фиг. 115. Размерные чертежи генераторов.

а—завода „Электросила“ типа ВГ-150-2000 150 кет, 2000 гц; б—ХЭТЗ типа МС-394-АН-2/5 250 кет, 5000 гц.



Фиг. 116. Генератор типа ВГ-150-2000 150 квт завода „Электросила“.



Фиг. 117. Генератор типа МС-394-АН-2/5 1500 об/мин., 250 квт, 1200 в, 5000 гц завода ХЭТЗ.

3. Замечания о машинных генераторах повышенной частоты

Обычно для генераторов повышенной частоты в самом типе генератора уже указана его мощность. Эта типовая мощность относится к работе генератора при безиндукционной нагрузке ($\cos\varphi=1$). При другом коэффициенте мощности мощность генератора будет другой. Чтобы внести в это ясность, необходимо, кроме того, указать, что для генератора повышенной частоты, помимо типовой, надо различать электрическую мощность в киловаттах (под этой мощностью надо понимать мощность, которую данный тип генератора может развивать в течение очень короткого времени без вреда для электрической прочности изоляции, при заданном коэффициенте мощности и данной схеме) и тепловую мощность (под этой мощностью разумеют ту мощность, которую генератор может развивать при заданном коэффициенте мощности в течение указанного времени, например в течение 1 часа или при непрерывной работе). Обе эти мощности сильно отличаются от типовой.

В тех случаях, когда генератор работает непрерывно при полной нагрузке неограниченное время, тип генератора выбирают по тепловой мощности для того $\cos\varphi$, при котором генератор будет работать. Однако в большинстве случаев при питании закалочных установок генераторы работают при повторно-кратковременной нагрузке на настроенный контур, в котором нетрудно осуществить $\cos\varphi$, равный 0,8 и даже 0,7 при опережающем токе. Здесь почти всегда возможно нагружать генератор, считаясь с электрической его мощностью.

На графике (см. фиг. 111) даны зависимости мощности и напряжения генератора от сопротивления Z , на которое он работает, при разных коэффициентах мощности. По этому графику видно, что генератор 0-150 при типовой мощности 150 *квт* можно использовать при закалке в том случае, если кратковременно мощность будет достигать 190 *квт*; настройка при этом должна создавать опережающий ток при $\cos\varphi=0,8$. Кроме того, параметры должны быть подобраны такими, чтобы при включении генератора на две параллельные ветви сопротивление нагрузки Z было равно 3,5 *ом*.

Что касается напряжения генератора, то надо учесть, что с понижением коэффициента мощности при опережающем токе, как видно на фиг. 111, оно значительно повышается. Это необходимо учитывать при расчете закалочного трансформатора.

4. Ламповые генераторы

В тех случаях, когда неизбежно надо применять для закалки радиочастоты, почти всегда целесообразно пользоваться ламповым генератором, который дает возможность получать частоты от десятков тысяч герц до 10^6 *гц* и выше. В основном у ламповых генераторов интересен диапазон частот в $f=100-300$ тыс. *гц* ($\lambda=3000-1000$ *м*), а в коротковолновом диапазоне $f=10^6$ *гц* ($\lambda=30$ *м*).

Однако в некоторых случаях, например при описанной в главе VI закалке тел сложной конфигурации, необходимо применять тот или иной диапазон частоты, выходящий за указанные пределы. Тогда с успехом можно использовать сравнительную легкость построения лампового генератора на любые частоты, если они не слишком низки. При закалке тел сложной конфигурации может идти речь о частотах примерно 50—20 тыс. *гц*.

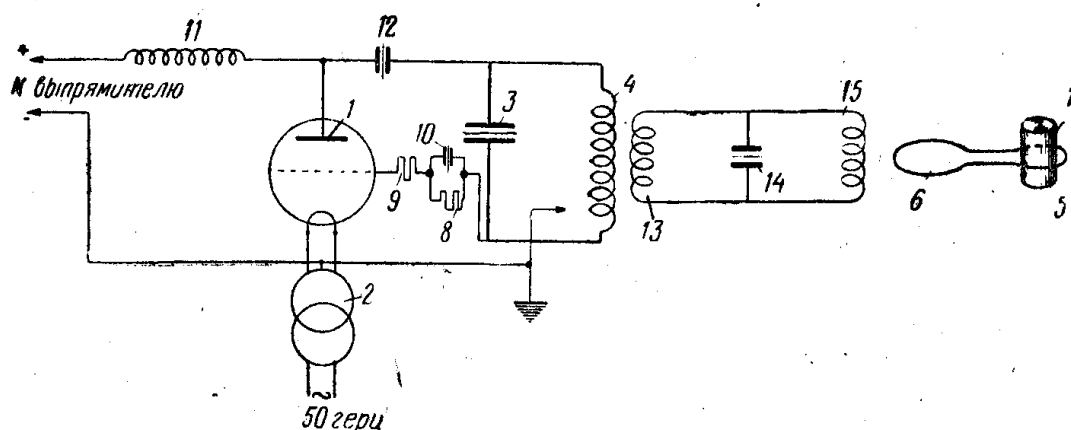
После сделанных указаний можно было бы не останавливаться на вопросах, относящихся к самому ламповому генератору, так как эта книга предназначена не для специалистов-радиотехников. Тем не менее да-

дим некоторые указания, необходимые конструкторам-радиотехникам, вытекающие из применения этих генераторов, что, как показала практика, совершенно необходимо.

Хотя ламповый генератор можно построить для любого диапазона, но было бы ошибочным думать и утверждать, что практически легко, без особых затрат и трудностей, менять частоту у любого установленного лампового генератора в пределах от десятков до сотен тысяч герц. Такая перестройка либо невозможна, либо вызовет при постройке генератора весьма большие и ничем не оправданные затраты.

Схема генератора

В качестве основной схемы, при которой работает генератор, надо считать приведенную на фиг. 118 схему с самовозбуждением и промежуточным контуром, хотя целесообразность этой схемы часто оспаривали. Преимущество применения промежуточного контура сказывается в том, что при неизбежных изменениях параметров закалочного устройства, происходящих вследствие изменения R и L нагреваемой поверхности закаливаемого тела без каких-либо специальных устройств, уже действием самой схемы до некоторой степени парализуется изменение вносимого закалочным устройством сопротивления. Поэтому мощность, сообщаемая закаливаемому телу, значительно сохраняется постоянной, что увеличивает использование лампового генератора. Эта схема особенно целесообразна при мощных устройствах.



Фиг. 118. Схема лампового генератора с промежуточным контуром.

1—анод; 2—трансформатор накала; 3—контурный конденсатор; 4—индуктивность контура; 5—закаливаемое тело; 6—вторичная обмотка трансформатора; 7—индуктор; 8—гридлик; 9—сопротивление сетки; 10—конденсатор гридлика; 11—индуктивность; 12—блокировочный конденсатор; 13—обмотка связи; 14—конденсатор промежуточного контура; 15—обмотка трансформатора.

В некоторых случаях, в частности у генераторов, работающих на коротких волнах, а также при небольших мощностях, лаборатория ЛЭТИ с успехом применяет схему, в которой закалочное устройство составляет часть генераторного контура (см. фиг. 213). Эта схема проще и дает экономию в стоимости генератора, так как в ней нет конденсаторной батареи промежуточного контура.

Хотя последнюю схему широко пропагандировал завод «Светлана», как наиболее целесообразную для всех случаев, однако надо считать, что в каждом частном случае необходимо обследование, особенно при сооружении мощных и ответственных установок, какую из схем надлежит применять. При этом необходимо подсчитать, покроет ли экономия, даваемая более простой схемой, те неудобства, которые с ней, несомненно, связаны.

Питание лампового генератора

Хотя неоднократно делали предложения питать генераторные лампы переменным током без его выпрямления, однако связанное с этим плохое использование ламп заставляет и у закалочных устройств пользоваться выпрямителями.

Частота

Если частота не диктуется требованиями, связанными с самим процессом закалки, то для генератора ее выбирают из соображений наименьшей стоимости устройства, в том числе батареи конденсаторов.

Для генератора мощностью около 150 *квт* такой частотой надо считать $f=100\text{—}300$ тыс. *гц*.

Необходимо, кроме того, заметить, что выбор частоты неизбежно связан также с мощностью генератора: с увеличением мощности надо выбирать меньшую частоту, если не хотят столкнуться с рядом затруднений. Это следует из того, что напряжение на индукторе и закалочном трансформаторе из соображений электрической прочности не может быть выбрано произвольно высоким. При больших же мощностях, малых напряжениях и высоких частотах невозможно осуществить конструкции с нужными для выбранной частоты параметрами закалочного устройства. При этом пассивные части устройства (соединения, подводы) приобретают значения для сопротивления и индуктивности не только соизмеримые, но и преобладающие над таковыми же для активных частей устройства.

Ориентировочно можно для зависимости $f = \varphi(P)$ или $\lambda = \varphi(P)$ взять зависимость, выраженную уравнениями (XII, 1) и (XII, 2), если к частоте не предъявляется специальных требований, связанных с закалкой тел того или другого размера или конфигурации:

$$f = \frac{3 \cdot 10^6}{\sqrt{P}} \quad (\text{XII, 1})$$

и

$$\lambda = 100 \sqrt{P}, \quad (\text{XII, 2})$$

где λ — длина волны, *м*;

P — мощность генератора, *квт*.

5. Конденсаторные батареи закалочного устройства

Необходимой частью каждого закалочного устройства является конденсаторная батарея, независимо от того, будет ли ток для питания установки получаться от машинного или от лампового генератора. Причиной этого является низкий коэффициент мощности системы индуктор — закаливаемое тело, никогда не превышающий значения 0,7. Обычно же, особенно при высоких частотах, $\cos \varphi$ составляет всего несколько сотых.

Генераторы во всех случаях могут работать с хорошим использованием и при высоком к. п. д. лишь на нагрузку с коэффициентом мощности $\cos \varphi \approx 1$, или даже опережающим (0,7—0,8). Значения для $\cos \varphi$ системы: индуктор — закаливаемое тело даны уравнением (XI, 3).

При ламповом генераторе конденсаторы применяют, кроме того, для колебательного контура.

Конденсаторы устройства с ламповым генератором (слюдяные)

Так как в этом случае частота лежит в пределах $300 \cdot 10^3$ — $100 \cdot 10^3$ гц и лишь в редких случаях может спускаться до $30 \cdot 10^3$ гц или подниматься до 10^6 гц, то в качестве конденсаторов до сих пор применяли почти исключительно слюдяные, так называемые «контурные», конденсаторы типа Дюбилле завода им. Козицкого.

В табл. 23 приведены некоторые данные для таких конденсаторов, а на фиг. 119, а изображен общий вид одного из контурных конденсаторов.

Для коротковолновых генераторов, кроме того, можно применять керамиковые конденсаторы.

Конденсаторы для установок с машинными генераторами (бумажно-масляные)

Так как частота тока, питающего установку с машинным генератором, чаще всего составляет 2000 гц и лишь значительно реже поднимается до 5000 (ХТЗ) или даже 15 000 гц, то в этом случае с успехом применяют бумажно-масляные конденсаторы типа КИП. Некоторые данные о наиболее ходовых из этих конденсаторов приведены в табл. 23. Общий вид целого ряда различных бумажно-масляных конденсаторов показан на фиг. 119, в.

Таблица 23

Конденсаторы типа КИП (данные 1939 г.)

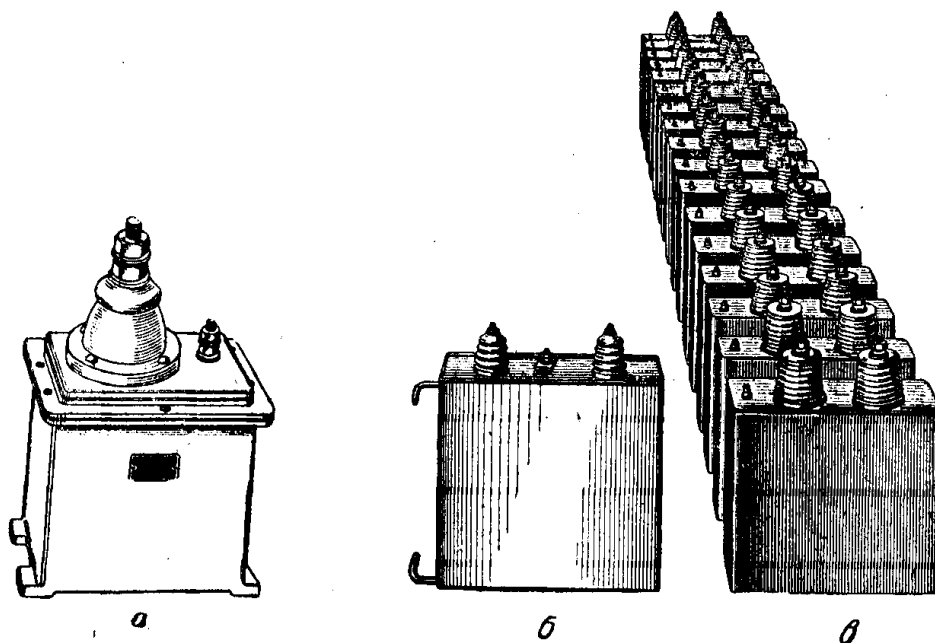
Тип КИП	Мощность квт	Рабочее напряжение в	Сила тока а	Емкость мкф	Частота гц	Стоимость 1 квт, руб.	Габаритные размеры, мм			Вес, кг
							длина	ширина	высота	
2000/500	15	2000	7,5	1,2	500	15,7	315	100	410	19
1500/2000	15	1500	10	0,53	2000	14,7	315	100	410	16
700/2000	10	700	—	—	2000	18,5	315	100	410	18
600/5000	8	600	—	—	5000	19,65	—	—	—	—

Слюдяные контурные конденсаторы постоянной емкости

Чертеж	Емкость	Мощность квт	Волна м	Режим испытаний длительный		Габаритные размеры, мм			Вес, кг	Цена по ценнику 1937 г., руб.
				волна м	ток а	длина	ширина	высота с выводом		
P-33100	0,1 мкф	30	3000	3000	13,7	110	94	162	1,8	257
P-33103	2500 см	120	1300—1900	1300	22	198	138	217	7,7	910
P-33105	0,0007 мкф	60	300—1500	300	16,2	198	138	170	6,7	275
P-33111	4000 см	120	1300—1900	1300	28	198	138	217	8,0	905
P-33112	0,1 мкф	60	10000	10000	33,6	198	138	217	7,4	750
P-33114	2000 см	120	900—2500	900	23,5	198	138	217	7,6	1040

Хотя конденсаторы типа КИП применяли до сих пор на всех закалочных и печных установках, работающих на частотах диапазона 2000—10 000 гц, однако в настоящее время необходимо отказаться от этого типа ввиду его громоздкости и дороговизны.

В этих конденсаторах в баке размером 315×100×410 мм помещается всего около 15 ква. Таким образом установка мощностью 150 квт при $\cos \varphi \approx 0,3$ требует около 750 ква, или примерно 50 конденсаторов.



Фиг. 119. Конденсаторы.

а—слюдайной; б—бумажный пираноловый; в—бумажный масляный типа КИП.

Если же перейти на бумажные конденсаторы с водяным охлаждением и пираноловым наполнителем, то в таком же баке при частоте 2000 гц может быть помещено 250 ква. В этом случае вместо 50 конденсаторов типа КИП потребуется всего 3—4 конденсатора, что, конечно, упростит и удешевит установку.

На фиг. 119, б показан для сравнения пираноловый конденсатор с водяным охлаждением, а на фиг. 119, в — конденсаторы типа КИП, которые пираноловый конденсатор заменяет по своей мощности.

Помимо малых габаритов с переходом на пираноловый конденсатор достигают большой экономии материалов, так как этот конденсатор требует на 230 ква всего 2 кг алюминиевой фольги, 6,5 кг бумаги и 12 кг пиранола.

6. Трансформаторы, применяемые в закалочных устройствах

Воздушные трансформаторы

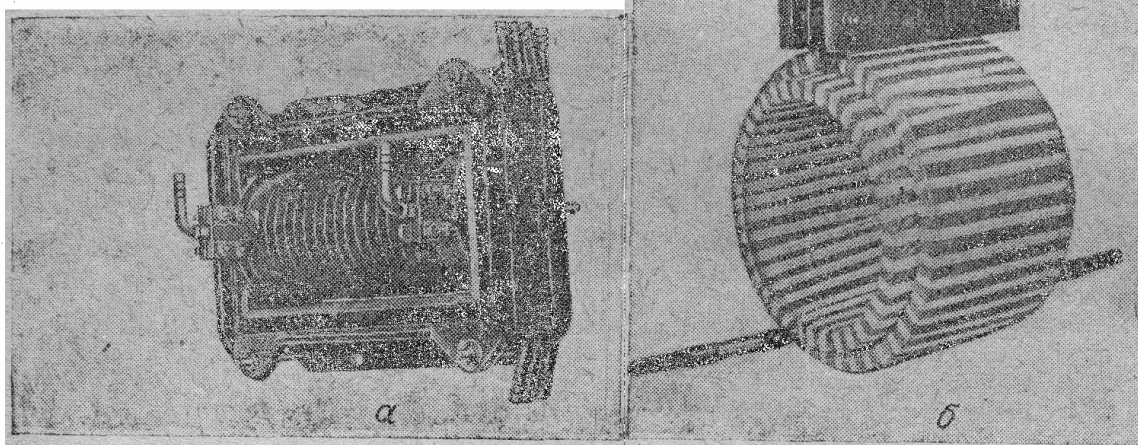
При установках, работающих в диапазоне радиочастот, получаемых от ламповых генераторов, до сих пор применяли воздушные трансформаторы (фиг. 120, б).

Расчет такого рода трансформатора приведен в главе IX, где по графикам можно определить вес их.

У такого трансформатора к. п. д. составляет около 95%.

Трансформаторы с железной магнитной цепью для установок с машинными генераторами 2000—5000 гц

В этом случае с успехом можно применять трансформаторы с железной магнитной цепью (фиг. 120, а) системы автора (авторское свидетельство № 54217). Особенностью этих трансформаторов является их малый вес и габариты при достаточно высоком к. п. д. Обе эти особенности достигаются применением больших объемных нагрузок магнитной цепи и меди обмоток (индукция B при 2000 гц до 9000 и при 5000 гц до 7000; плотность тока в активном слое меди доходит до 10^4 а/см²).



Фиг. 120. Трансформаторы системы проф. В. П. Вологодина.
а — с железным сердечником; б — воздушный.

Возможность таких нагрузок обеспечивается энергичным отводом тепла в меди посредством устройства обмотки из трубки, а в железе — прокладкой между листами железа магнитопровода медных листов, охлаждаемых водой.

ГЛАВА XIII

ЗАКАЛКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОСТЕЙШЕЙ ФОРМЫ

1. Общие замечания

Для закалки какой-либо детали лучше всего пользоваться данными расчетного и опытного характера, полученными для закалки поверхностей простейших форм. Для этой цели более или менее сложную с точки зрения закалки деталь можно представлять состоящей из элементарных поверхностей, которые можно закаливать отдельно. Лишь в тех случаях, когда такая закалка затруднена, например для шестерни малого модуля, фрезы и т. п., изыскивают возможность закалки всего изделия. Вследствие этого ниже приводятся данные, относящиеся к закалке элементарных и наиболее употребительных поверхностей.

2. Цилиндрические поверхности

Здесь необходимо рассматривать отдельно наружные и внутренние цилиндрические поверхности (выпуклые и вогнутые), потому что и с электрической и тепловой сторон, обе они коренным образом различны. При этом плоская поверхность обладает промежуточными свойствами, являясь частным случаем той и другой поверхности при $r = \infty$.

3. Наружная цилиндрическая поверхность

Закалка этой поверхности представляет наибольший интерес и встречается всего чаще. Вместе с тем условия нагрева индукционным способом здесь наиболее благоприятны с точки зрения изготовления индуктора и его работы.

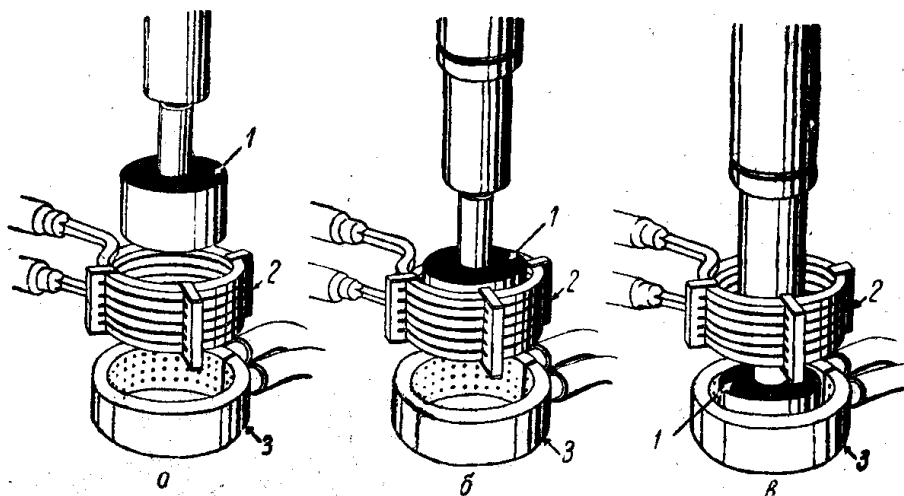
Для успешного решения вопроса об индуктировании тока необходима наибольшая связь между индуктором и нагреваемым телом. Такая связь возможна лишь при малом потоке рассеяния между индуктором и нагреваемым телом.

Рассматривая кольцевой индуктор и нагреваемую цилиндрическую поверхность (фиг. 121, 97 и 98), нетрудно видеть, что в кольце индуктора поверхностный и кольцевой эффекты дадут чрезвычайно благоприятное распределение тока с наименьшим потоком рассеяния.

Наибольшая плотность тока, согласно уравнению (V, 44), — на внутренней поверхности кольца индуктора, тогда как у нагреваемого тела, согласно уравнению (V, 22), наибольшая плотность на наружной поверхности. Эти явления выражаются тем интенсивнее, чем меньше

радиус кривизны r и чем выше частота f . Оба эти обстоятельства дают возможность легко реализовать сильную связь, т. е. получить высокий к. п. д. и высокий $\cos \phi$ системы: индуктор — нагреваемое тело.

Все это обуславливает легкость закалки наружных цилиндрических поверхностей даже при индукторах без железа.



Фиг. 121. Закалка цилиндрической поверхности многовитковым индуктором.

1—закаливаемое тело; 2—индуктор; 3—кольцо для подачи закалывающей воды.

4. Цилиндрическая поверхность небольшой длины и диаметра

Такого рода поверхности можно закаливать при нагреве всей поверхности одновременно в том случае, если ее площадь не превышает 100—300 см², так как в случае больших поверхностей закалка требует весьма значительной мощности. Более точно эту возможность можно установить, исходя из требуемой глубины закаленного слоя, производительности или наличия генератора той или другой мощности и частоты, пользуясь для этого данными таблиц главы XIV.

Особенностью в закалке цилиндрических поверхностей является то, что и распределение индуктированного тока в теле, имеющем цилиндрическую поверхность, и распределение температуры при заданном подводе тепла зависят от радиуса кривизны поверхности. Как это следует из выражения (V, 22), для распределения тока, обусловленного поверхностным эффектом, с уменьшением радиуса кривизны r_0 , плотность тока на одной и той же глубине будет увеличиваться, что даст при всех равных условиях увеличение активного слоя ξ , облегчающего более глубокий прогрев. Так же точно распределение температуры в теле при заданной глубине активного слоя ξ , будь это чисто поверхностный или глубинный нагрев, зависит от радиуса кривизны. Как следует из кривых фиг. 29 и 33, построенных по уравнению (III, 32) и (III, 34), при заданной глубине закаленного слоя требуется тем меньше времени нагрева и мощности, чем больше отношение $\frac{x_k}{r_0}$ или меньше радиус r_0 .

Согласно уравнению (III, 30) это влечет за собой также увеличение термического к. п. д., так как с уменьшением радиуса r_0 при том же характере выделения тепла и той же глубине закаленного слоя x_k уменьшается время нагрева t .

Приведенные в главах III и V выражения позволяют найти условия, определяющие режим закалки цилиндрических поверхностей в зависимости от радиуса цилиндра. Эти же выражения сохраняются

не только для цилиндров, но и вообще тел, имеющих в своих частях цилиндрические поверхности той или другой кривизны.

Хотя эти выражения позволяют найти все необходимые данные, но в большинстве случаев можно для той же цели использовать опытные данные, если расширить их применимость по закону подобия.

Соображения, относящиеся к этому использованию, приведены ниже и позволяют ориентировочно определить необходимые параметры во многих случаях закалки цилиндрических поверхностей.

Ч а с т о т а

Если частота, при которой надлежит производить закалку, задана имеющимся генератором, то надо сделать проверку возможности закалки на этой частоте, причем в большинстве случаев можно использовать данные, приведенные ниже в таблицах.

Вообще же для определения частоты в этом случае закалки могут служить следующие данные:

1. Получение достаточно высокого электрического к. п. д. ставит условием, чтобы диаметр цилиндрической поверхности был

$$d^2 > \frac{20\,000}{f}$$

Эти величины, подсчитанные для различных диаметров, приведены в табл. 24.

Таблица 24

Наименьшие частоты, пригодные для закалки
в зависимости от диаметра изделия

Диаметр d см	Частота f гц	Диаметр d см	Частота f гц
1	20 000	7	500
2	5 000	10	200
3	2 000	15	100
5	1 000	20 и выше	50

Из этой таблицы следует, что частота в 2000 гц с этой точки зрения охватывает все диаметры, начиная от 3 см и выше. Если мириться с пониженным к. п. д., то при частоте 2000 гц возможно вести закалку до диаметра 2 см.

2. Глубина закаленного слоя дает также указание для выбора частоты. Данные табл. 5 показывают, что при глубинах закаленного слоя 2—7 мм и большой производительности (200—1000 шт. в час) всегда можно остановиться на частоте 2000—5000 гц. При малых глубинах (примерно 0,5—2 мм) или больших глубинах и малых производительностях, а также при диаметре $d < 3$ см целесообразно применять радиочастоту примерно 300 000 гц ($\lambda = 1000$ м). Последние годы широкое распространение в США получила частота 9600 гц, позволяющая осуществлять глубины 1 мм.

М о щ н о с т ь

Потребную для закалки мощность, передаваемую телу из сети или от генератора, можно подсчитать по уравнениям (XI, 10), (XI, 16) и (XI, 17) или же проще, пользуясь данными табл. 25 и 26 и методом подобия:

Таблица 25

Закалка цилиндрических деталей. Диаметр около 50 мм, частота 2000 гц

Глубина закаленного слоя x_k , мм	Время нагрева t_k сек.	Удельная мощность, передаваем. в закаливаемое тело, p_1 квт/см ²	Удельная мощность из сети p_2 квт/см ²	Удельная энергия из сети W_2 втч/см ²	Стоимость установки производительностью 100 см ² /час руб.	Стоимость закалки 100 см ² коп.
1,5	2	1,4	3,2	1,75	235	2,9
2	2,5	1,35	3,1	2,1	280	3,5
3	3,4	1,2	2,7	2,6	346	4,3
4	4,3	1,05	2,4	2,8	375	4,7
5	5,1	0,95	2,1	3,0	402	5,0
6	6,3	0,8	1,8	3,2	427	5,3
7	8	0,7	1,6	3,5	466	5,8

Таблица 26

Закалка цилиндрических деталей. Радиочастота $\lambda = 1000$ м, диаметр тела около 50 мм, $\Delta T = 100^\circ$

Глубина закаленного слоя x_k , мм	Время нагрева t_k сек.	Удельная мощность, передаваем. в закаливаемое тело, p_1 квт/см ²	Удельная мощность из сети p_2 квт/см ²	Удельная энергия из сети W_2 втч/см ²	Стоимость установки производительностью 100 см ² /час руб.	Стоимость закалки 100 см ² коп.
1	2,5	0,9	2,7	1,9	250	3,2
2	9	0,5	1,5	3,8	500	6,3
3	15	0,4	1,2	5,0	670	8,4
4	22	0,3	0,9	5,5	730	9,2
5	28	0,25	0,75	5,8	770	9,7
6	36	0,2	0,6	6,0	800	10
8	50	0,15	0,45	6,3	840	10,5

мощность из сети

$$P_2 = p_2 S;$$

мощность от генератора

$$P_1 = \eta P_2;$$

мощность, сообщаемая телу,

$$P = p_1 S.$$

В уравнениях (XI, 18) и (XI, 19) p_1 и p_2 взяты для диаметра 50 мм, для которого и составлены табл. 25 и 26. В случае закалки цилиндра другого диаметра, отличного от 50 мм, данные для p_1 и p_2 можно найти в тех же табл. 25 и 26, принимая во внимание коэффициенты подобия n , как это показано в главе VII, п. 9, или согласно следующему примеру. Если задана глубина закалки $x_k = 4$ мм и требуется найти мощность p'_1 и p'_2 для этой глубины, чтобы закалить цилиндр диаметром $d' = 100$ мм, то сперва находят коэффициент подобия для линейных размеров

$$n = \frac{d'}{d} = \frac{100}{50} = 2. \quad (\text{XIII, 1})$$

Согласно уравнению (VII, 3), для заданной глубины закали x'_k , отвечающей диаметру $d=100$ мм, имеем

$$x'_k = nx_k = 2x_k = 4 \text{ мм.} \quad (\text{XIII, 2})$$

Отсюда глубина x_k , отвечающая диаметру $d=5$ см, будет $x_k=2$ мм.

Кроме того, для плотности мощности из того же уравнения (VII, 3) имеем

$$p' = \frac{1}{n} p.$$

Ввиду этого возьмем в табл. 25 или 26 для глубины x'_k значение не 4 мм, как это требуется, а $x_k=2$ мм, и найдем для этой глубины значения p_1 и p_2 .

Из табл. 24 будем иметь:

$d=50$ мм; $x_k=2$ мм; $p_1=1,35$ квт/см²; $p_2=3,1$ квт/см²,
или для $d=100$ мм из уравнения (XIII, 1) получим

$$d'=100 \text{ мм; } x'_k=4 \text{ мм; } p'_1 = \frac{1,35}{2} = 0,68 \text{ квт/см}^2;$$

$$p'_2 = \frac{3,1}{2} = 1,55 \text{ квт/см}^2.$$

При определении по методу подобия значений p'_1 и p'_2 здесь не было учтено изменение частоты. Это допустимо, если отклонение диаметра от 50 мм, для которых составлены табл. 24 и 25, дает для n несколько единиц.

Если имеется возможность при изменении диаметра вести закалку на другой частоте, чем указано в табл. 28 и 29, то эту частоту можно найти по уравнению (VII, 9), как это сделано в главе VII, п. 9.

Время закали

Для цилиндрических поверхностей диаметром 50 мм время закали на разные глубины указано в табл. 25 и 26 для частоты 2000 и 300 000 гц. Для закали поверхностей иного диаметра можно применять метод подобия.

Так, для разобранных выше случаев при $d=100$ мм из уравнения (VII, 3) имеем

$$n = \frac{d'}{d} = \frac{100}{50} = 2; \quad (\text{XIII, 3})$$

$$t' = n^2 t_k = 4 t_k. \quad (\text{XIII, 4})$$

Поэтому при $d'=100$ из табл. 24 вместо $x'_k=4$ возьмем $x_k=2$ и для этой глубины найдем время $t_k=2,5$ сек., которое на основании уравнения (XIII, 4) будет

$$t'_k = n^2 t_k = 4 \cdot 2,5 = 10 \text{ сек.}$$

Таким же образом можно использовать данные табл. 28 для радиочастот.

Когда для определения всех нужных величин режима закали пользуются табл. 25 и 26, то этим обеспечивают нагрев с тем перегревом, для которого составлены эти таблицы. Если же пользуются уравнением (XI, 10), то приходится задаваться временем нагрева t_k , что при неправильном его выборе может дать чрезмерный перегрев.

Производительность

Если коэффициент загрузки генератора взять равным $k=0,5$, то производительность его при закалке цилиндрических поверхностей составит

$$\alpha' = \frac{3600}{2t_k} \text{ шт. в час,} \quad (\text{XIII, 5})$$

причем t_k надо брать из табл. 25 и 26, учитывая при этом, согласно уравнениям (XIII, 3) и (XIII, 4), диаметр цилиндра.

Если при закалке на радиочастоте, когда время t_k определяют по табл. 26 и по уравнению (XIII, 5), получается недостаточная производительность, то надо перейти, если только допускает неравенство (XI, 2), на более низкую частоту. И наоборот, если была взята частота 2000 гц и при этом из уравнения (VI, 5) получилась слишком большая производительность, то лучше перейти на более высокую радиочастоту.

5. Индуктор для одновременной закалки цилиндрических поверхностей

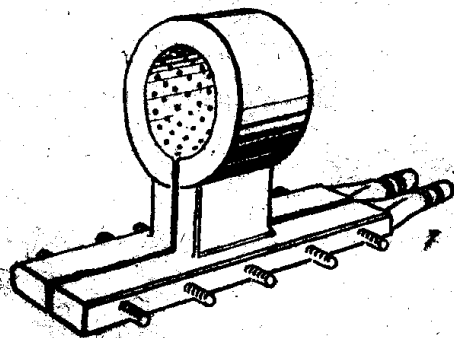
Многовитковый индуктор

Этого рода индуктор можно применять при закалке главным образом цилиндрических поверхностей небольшого диаметра и значительной длины. Для получения равномерной толщины закаленного слоя закаливаемую деталь необходимо вращать со скоростью 200—300 об/мин. Преимущество индуктора — меньшая сила тока и большое напряжение. Поэтому в некоторых случаях возможно обойтись без понижающего трансформатора.

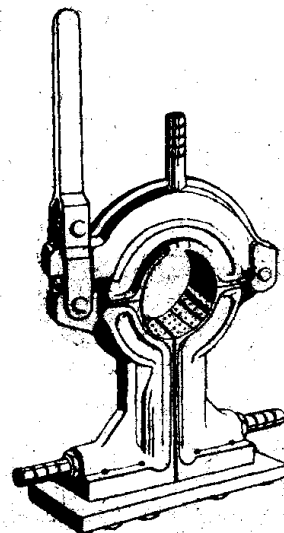
Закалка таким индуктором показана на фиг. 121.

Одновитковый индуктор

Этот индуктор применяют наиболее часто. Его можно сделать неразъемным (фиг. 122) или разъемным, если невозможно снимать неразъемный индуктор вследствие большого диаметра незакаливаемых частей детали. На фиг. 123 показана конструкция разъемного индуктора этого типа, разработанная лабораторией автора. В том случае, когда



Фиг. 122. Неразъемный одновитковый индуктор.



Фиг. 123. Разъемный одновитковый индуктор.

одновитковый индуктор служит лишь для нагрева, как это показано на фиг. 121 для многовиткового индуктора, то охлаждение при закалке надо производить добавочным устройством.

В этом случае медь индуктора необходимо охлаждать непрерывно водой, проходящей внутри индуктора. Толщина стенки со стороны закаливаемой поверхности должна составлять около 2 δ.

Если же нагретую для закалки поверхность, как это бывает значительно чаще, охлаждают водой, поступающей через отверстия на внутренней стенке индуктора, то охлаждение этой стенки периодическое, и толщина этой стенки, работающей на теплостойкость, должна быть значительно больше, чем в первом случае.

Толщину стенки красной меди можно определить по следующему уравнению:

$$\Delta_2 \approx \frac{x_k \theta'_1 c_1}{\theta'_2 c_2} \frac{1 - \eta_1}{\eta_1} \approx 3,3 x_k. \quad (\text{XIII}, 6)$$

При пользовании одновитковым индуктором вращение необязательно, хотя желательно, особенно в период охлаждения, которое происходит в этом случае значительно равномернее.

6. Цилиндрические поверхности большой длины. Непрерывно-последовательный метод

Если подсчет поверхности цилиндра дает значительную величину, превышающую 100—300 см², то приходится прибегать к закалке с нагревом не сразу всей поверхности, а последовательно, нагревая участок за участком, причем нагретые ранее части непрерывно охлаждают. Такой метод закалки назван лабораторией автора непрерывно-последовательным. Этот метод требует тока меньшей мощности, но зато обладает меньшей производительностью и несколько меньшим термическим к. п. д.

Мощность от генератора

Необходимую в этом случае мощность можно получить, пользуясь уравнением (XI, 10) в первом приближении

$$P_1 = \frac{16 d x_k v}{\eta' \eta_1 \eta_2} \text{ квт}, \quad (\text{XIII}, 7)$$

или упрощенно для третьего типа нагрева, если принять $\eta' = 40\%$, $\eta_1 = 88\%$ и $\eta_2 = 90\%$,

$$P_1 = 50 d v x_k \text{ квт}; \quad (\text{XIII}, 8)$$

здесь d и x_k — в см; v — в см/сек.

Для первого типа нагрева $\eta = 17\%$; тогда

$$P_1 = 120 d v x_k \text{ квт}. \quad (\text{XIII}, 8)$$

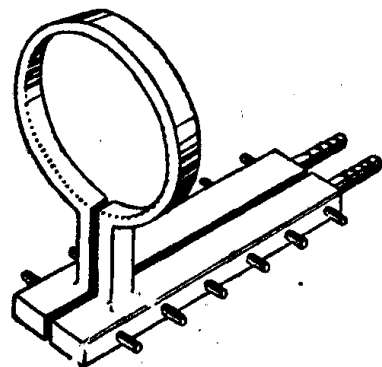
Мощность от сети будет

$$P_2 = P_1 \frac{1}{\eta_{3,4}}, \quad (\text{XIII}, 9)$$

где $\eta_{3,4} = 0,75$ — для машинного генератора;
 $\eta_{3,4} = 0,5$ — для лампового генератора.

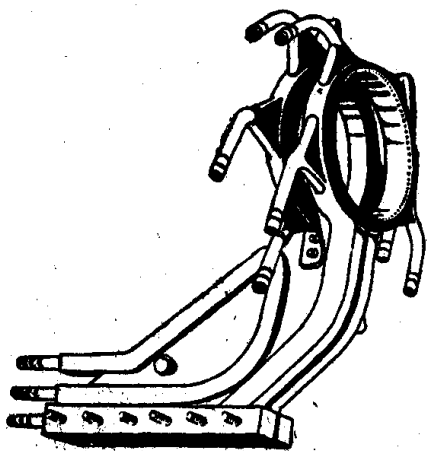
Индуктор для последовательной закалки

Такой индуктор показан на фиг. 124. Здесь закалочная вода непрерывно охлаждает также индуктор и толщина рабочей стенки может составлять около 2 δ.

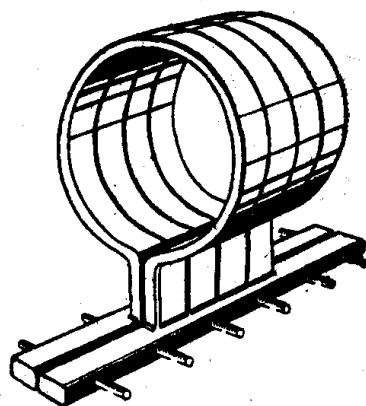


Фиг. 124. Кольцевой индуктор для последовательной закалки.

В случае больших скоростей воду пускают не последовательно через все кольцо, а рядом параллельных ветвей, или даже подводят специальным кольцом. Часто делают добавочное кольцо, сдувающее закалочную воду (фиг. 125). В этом случае, если требуется значительная



Фиг. 125. Кольцевой индуктор для последовательной закалки с воздушным дутьем.

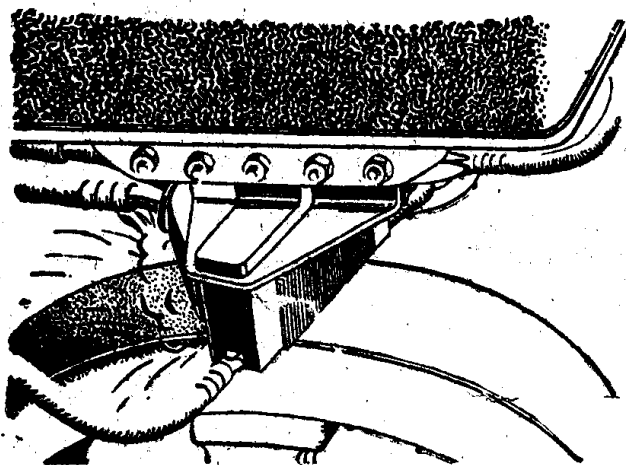


Фиг. 126. Широкий кольцевой индуктор для последовательной закалки на большую глубину.

глубина закаленного слоя, например 3—10 мм при частоте 2000 гц, и невозможно из-за критической скорости охлаждения снижать скорость перемещения индуктора, то индуктор делают более широким (фиг. 126).

7. Цилиндрические поверхности большого диаметра и малой высоты

Такого рода поверхности можно также закаливать лишь непрерывно-последовательным методом. Однако в этом случае закаленная поверхность почти неизбежно имеет отпускную полосу 5—10 мм шири-



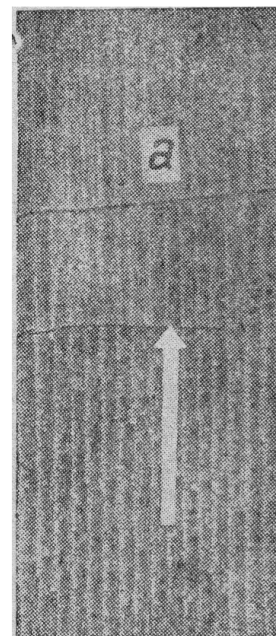
Фиг. 127. Закалка цилиндрических поверхностей большого диаметра и малой высоты.

ной, которая может быть расположена либо по образующей цилиндра либо, что лучше, по винтовой линии.

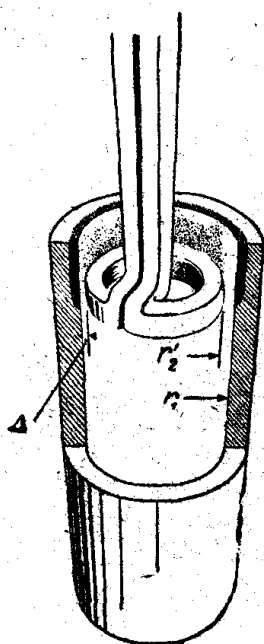
Для закалки такой поверхности применяют линейный индуктор, предназначенный для плоских предметов. Цилиндрическая поверхность при этом медленно вращается с линейной скоростью $v = 5—10 \text{ мм/сек}$. Индуктор располагается по образующей поверхности или под некоторым к ней углом (фиг. 127).

После полного оборота изделия индуктор подходит к тому месту, где была начата закалка, ток выключают, чтобы не произошло второй за-

калки в том месте, где она была уже произведена, так как в этом случае легко получаются трещины (фиг. 128). Этот метод применим также и в том случае, если образующая не будет прямой ли-



ности индуктора. С другой стороны, здесь имеется явление близости [уравнение (V, 28)], способствующее увеличению плотности на наружной поверхности меди индуктора. Оба эти явления при внутренних поверхностях действуют в противоположных направлениях, причем одно компенсируется другим, тогда как при закалке наружных цилиндрических поверхностей явление близости складывается с кольцевым эффектом, увеличивая связь между индуктором и закаливаемой поверхностью. Это создает при закалке наружных поверхностей цилиндра малого радиуса r_2 условия даже более благоприятные, чем при закалке плоских поверхностей.



Фиг. 129. Закалка внутренних цилиндрических поверхностей: r_1 —радиус закаливаемой поверхности; r_2 —радиус индуктора; Δ —зазор между индуктором и закаливаемой поверхностью.

Так как согласно уравнениям (V, 28) и (V, 44) и фиг. 64 действие кольцевого явления при уменьшении радиуса (или, вернее, при увеличении отношения $a_0 = \frac{r_0}{R_0}$) быстро растет и почти всегда значительно превосходит в смысле сосредоточивания плотности тока явление близости, то с уменьшением радиуса цилиндрической поверхности связь быстро падает, и становится все труднее осуществить нагрев под закалку. Увеличение мощности, подводимой к индуктору, здесь также затруднено из-за трудностей охлаждения индуктора.

Ч а с т о т а

Увеличение частоты при закалке внутренних поверхностей оказывает благоприятное действие, так как облегчает связь и условия охлаждения индуктора. Поэтому для закалки внутренних поверхностей малого диаметра надо рекомендовать применять радиочастоты. При этих частотах и длине волны $\lambda = 1000$ м лаборатории автора удавалось с помощью индуктора без железа закаливать на глубину 1 мм внутренние поверхности диаметром до 50 мм.

Необходимо отметить, что поверхности большого радиуса можно (особенно при использовании специального индуктора) закаливать и при частоте 2000 гц.

И н д у к т о р

Описанные выше трудности относились к закалке индуктором в виде кольца из красной меди (фиг. 130).

Эти трудности можно значительно уменьшить, увеличивая связь, уменьшая катушечный эффект и используя явление Фильда, описанное в главе V, п. 10. Для этого медь индуктора окружают с трех сторон расслоенным железом (см. фиг. 67).

Благодаря наличию железа плотность тока сосредоточивается в частях, близких к закаленной поверхности, так как влияние железной магнитной цепи интенсивнее, чем катушечный эффект.

Применение индуктора с железом дало возможность с успехом вести закалку на частоте 2000 гц. Однако железные магнитные цепи можно также применять и при радиочастотах, закаливая отверстия диаметром 25 мм. В этом случае железо должно быть толщиной 0,03—0,05 мм и охлаждаться водой.

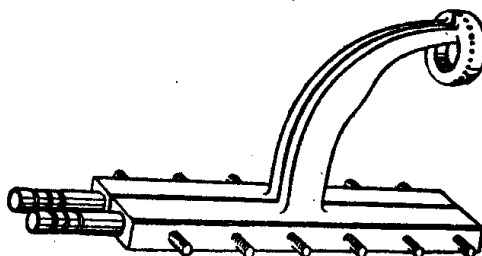
На фиг. 131 показан индуктор с железом для радиочастот, а на фиг. 132 — такой же индуктор для закалики внутренних цилиндрических поверхностей диаметром около 190 мм на частоте 2000 гц.

Так как необходимо сосредоточивать большие плотности тока, то здесь чаще всего применяют последовательный метод закалики.

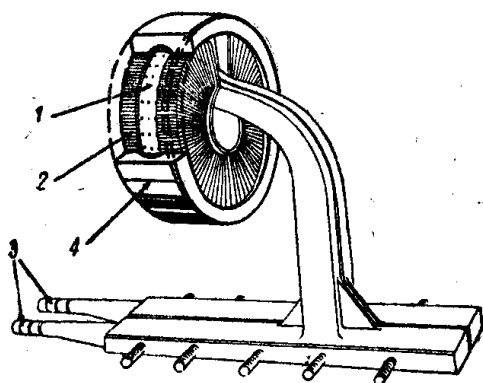
10. Плоские поверхности

Хотя распределение плотности тока в индуктируемой плоской поверхности и распределение температуры выражаются более простыми формулами, чем при закатке цилиндра, но закатка плоских поверхностей труднее, чем закатка наружных цилиндрических поверхностей. Эти трудности заключаются в обратном проворде, если индуктор сделан в виде петли без железа, и в противоположном действии прямого и обратного проводов при индуктировании э. д. с., значение которой в этом случае выражено уравнением (I, 5).

Что касается распределения плотности тока в плоской поверхности, то оно определяется уравнением (V, 19). Так же точно распределение температуры при выделении тепла на наружной поверхности и при глубинном нагреве определяется уравнениями (III, 11), (III, 27), (III, 29) и (III, 31).

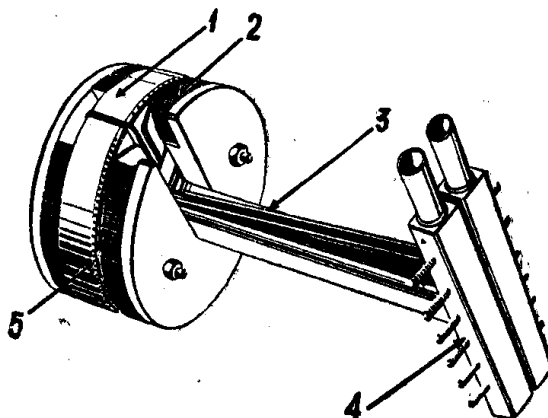


Фиг. 130. Кольцевой индуктор без железа для закалики внутренних поверхностей.



Фиг. 131. Индуктор с железной магнитной цепью для одновременной закалики внутренних поверхностей при радиочастоте.

1—медь индуктора; 2—железо толщиной 0,07 мм; 3—подвод и отвод воды; 4—закаливаемое тело.



Фиг. 132. Индуктор с железной магнитной цепью для последовательной закалики внутренних поверхностей при частоте 2000 гц.

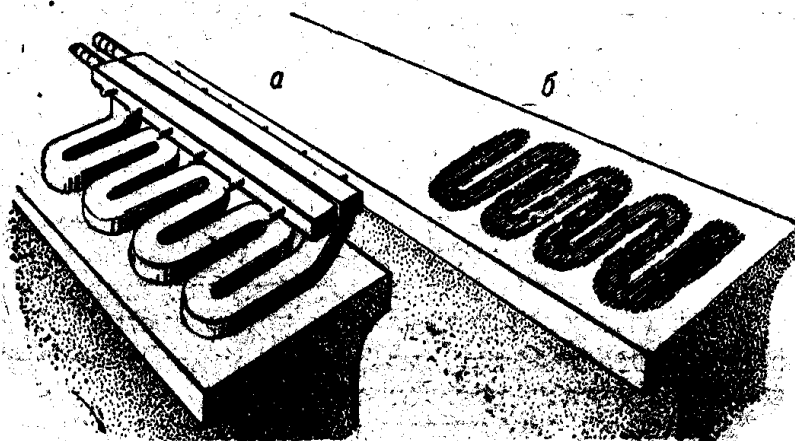
1—медь индуктора; 2—железная магнитная цепь, толщина железа 0,2 мм; 3—подвод тока и воды; 4—контактные колодки для присоединения к трансформатору; 5—отверстия для закалочной воды.

11. Одновременная закатка плоских поверхностей

Небольшие плоские поверхности (а в некоторых исключительных случаях и большие) можно закаливать одновременно, как это было осуществлено лабораторией автора в 1936 г.

Индуктор в этом случае можно сделать в виде широкой полосы, покрывающей всю закаливаемую поверхность, причем обратные провода располагают над рабочими. Однако такой индуктор дает недостаточную равномерную толщину закаленного слоя вследствие неравномерного распределения тока в меди индуктора. Эта неравномер-

ность обусловлена краевыми и поверхностными явлениями. Лучший результат в этом отношении дает (особенно при значительных поверхностях) индуктор в виде зигзага (фиг. 133,а). Хотя распределение тока в меди индуктора здесь гораздо более равномерно, но чередование прямых и обратных проводов создает в частях поверхности, находящихся посредине между проводами, где $h_1 \approx h_2$, зоны с э. д. с., равной нулю. В этих зонах нет выделения тепла, и температура их значительно ниже, чем под проводами. Поэтому отпечаток по методу Фогеля здесь даст картину, показанную на фиг. 133,б. В результате получится неравномерная толщина закаленного слоя. Для



Фиг. 133.

а—зигзагообразный индуктор; б—нагрев поверхности (отпечаток по методу Фогеля).

устранения этого недостатка лаборатория автора предложила «способ растушевки», состоящий в том, что индуктор получает движение в направлении, перпендикулярном длине провода. В результате перемещений поверхность получает достаточно равномерную закалку по всей своей толщине. При сколько-нибудь большой поверхности такой метод закалки, как и при цилиндрических поверхностях, требует больших мощностей. Если же вести процесс на малых мощностях при малых плотностях мощности, то закалка на малые глубины невозможна, так как тело прогревается на большую толщину сплошь.

Закалку плоских поверхностей небольшой площади при малой ширине (1—4 см) и большой длине с успехом можно производить индуктором с железной магнитной цепью, подобным индуктору, применяемому для последовательной закалки. В этом случае можно использовать звуковую частоту.

Частота

При устройстве зигзага нецелесообразно делать широкие провода с большими промежутками между ними, которые дадут широкие мертвые зоны. Но при узких проводах для уменьшения эффективного расстояния между током и нагреваемой поверхностью придется брать сравнительно тонкий провод, то это создает благоприятные условия для применения здесь радиочастот, так как в этом случае легко осуществить хорошую связь между индуктором и нагреваемой поверхностью.

Однако отсюда не следует, что при этом совершенно исключены частоты акустического диапазона. Хотя условия работы индуктора будут менее благоприятными, но большая простота генерирующего

устройства и высокий к. п. д. могут здесь дать перевес. При устройстве индуктора неблагоприятные условия распределения плотности тока в меди в значительной степени могут быть устранены, если пользоваться расслоенными железными экранами.

12. Закалка поверхностей небольшой толщины

До сих пор рассматривалась закалка плоских поверхностей, имеющих столь большую толщину, что закаливаемое тело можно было считать бесконечно толстым.

В тех случаях, когда толщина невелика, например, $h=3-4x$ она оказывает влияние на распределение температур по глубине. Кривая распределения идет выше и полого, и при той же плотности мощности получается большая толщина закаленного слоя x_k (см. фиг. 42). Распределение температур можно определить из уравнений (III, 29) и (III, 31). Наличие ограниченной толщины увеличивает термический к. п. д., который можно определить из уравнения (III, 30).

Если глубина закаленного слоя x_k достигает 0,25—0,3 толщины тела, то при закалке трудно избежать коробления поверхности.

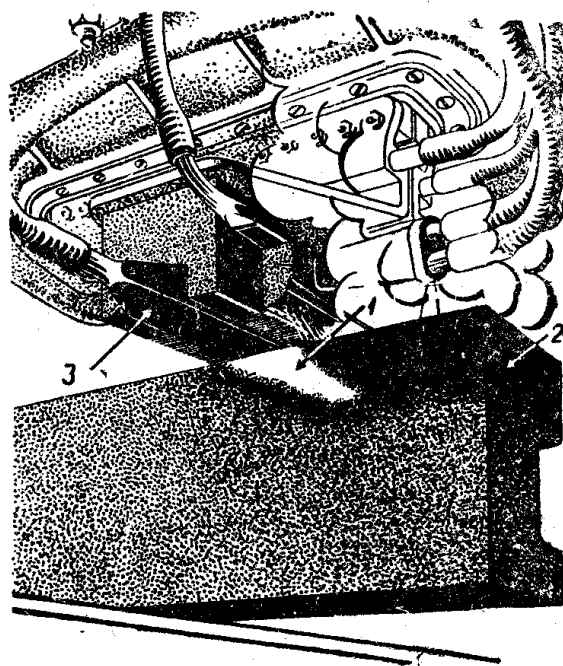
13. Последовательная закалка плоских поверхностей

Этого рода закалка становится тем благоприятнее, чем больше длина закаливаемой поверхности. Так, для закалки рельсов по всей длине едва ли можно применять метод одновременной закалки. Но при закалке рельсов по концам (длиной 200 мм) можно с успехом пользоваться последовательной закалкой.

Распределение плотности тока по глубине определяется уравнением (V, 19), относящимся к плоской поверхности. Что касается распределения температуры, то хотя при достаточно широкой индуктируемой зоне тока можно пользоваться уравнениями (III, 11) и (III, 27), однако нестационарность процесса нагрева вносит значительные осложнения, которые пока еще нельзя окончательно выразить в математической форме.

Особенности последовательного метода

В отличие от одновременного метода закалки, при котором закаливаемая поверхность нагревается в течение некоторого времени посредством выделения тепла на поверхности ($\xi=0$) или в некотором глубинном слое ($\xi>0$), при последовательном методе тепло выделяется на поверхности или на некоторой глубине сравнительно узкой полосы. При этом со стороны, лежащей по направлению движения, тепло отводится все время подводимыми под индуктор новыми



Фиг. 134. Распределение температуры в теле при последовательной закалке.

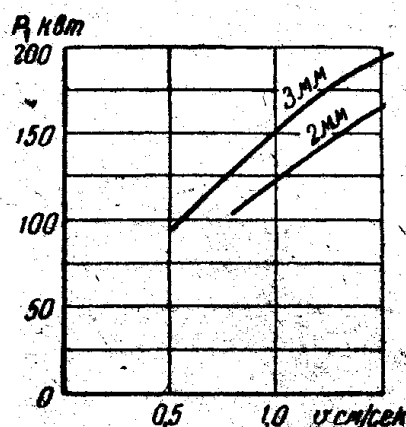
1—нагретая часть; 2—закаленная часть; 3—медь индуктора.

холодными массами стали, тогда как на сходящей стороне, в особенности на поверхности, происходит еще более интенсивный отвод тепла закалочной водой и уже закаленными массами металла. В результате в сечении, плоскости, перпендикулярной индуктору, получается распределение температур, приведенное на фиг. 134.

Такое распределение показывает, что условия прохождения тока и распределение температур на сходящей и находящей части закаливаемого металла совершенно различны. Это различие охватит тем более широкие зоны и будет тем сильнее сказываться, чем шире та полоса, в которой осуществляется нагрев.

Ввиду этого, если при одновременной закалке распределение температур и плотности тока возможно найти по уравнениям (III, 11) и (III, 27), то условия последовательной закалки более сложны. Кроме того, приходится считаться со значительным изменением настройки закалочных контуров в зоне начала и конца закалки (наход и сход) и с сильным различием в нагреве поверхности в начале и конце закалки.

Последний недостаток в большой мере можно устранить, сужая полосу, в которой происходит нагрев. Трудности для расчета режима закалки, а также выбор и осуществление самого режима в значительной мере увеличиваются вследствие большого изменения параметров нагретых частей, главным образом значения ρ , а также ρ и c . Эти изменения создают при каждой заданной скорости стабильные и нестабильные режимы. Условием для получения стабильных режимов является обычно работа при некоторой мощности, значительно превышающей некоторую минимальную. Эта мощность зависит от скорости закалки v , если ширину меди индуктора a принять постоянной. На фиг. 135 дана зависимость $P_1 = \varphi(v)$ для разных значений x_k .



Фиг. 135. Зависимость мощности от скорости v при заданной глубине закаленного слоя x_k .

Как показали исследования инж. А. А. Фогеля, влияние ширины меди индуктора можно исключить из рассмотрения, если в качестве переменного параметра взять время t_v нагрева элемента металла на закаливаемой поверхности. Эту величину можно выразить через скорость перемещения индуктора v и ширину меди индуктора a следующим образом:

$$t_v = \frac{a}{v} \text{ сек.}, \quad (\text{XIII, 10})$$

где a — в см, v — в см/сек.

Исследования инж. А. А. Фогеля, кроме того, показали, что при получении глубины закаленного слоя от нуля до $x_k \approx \delta_{\text{гор}}$ возрастание времени t_v , необходимого для получения закаленного слоя x_k , растет вместе с увеличением глубины x_k по закону

$$t'_v = n^2 t_v,$$

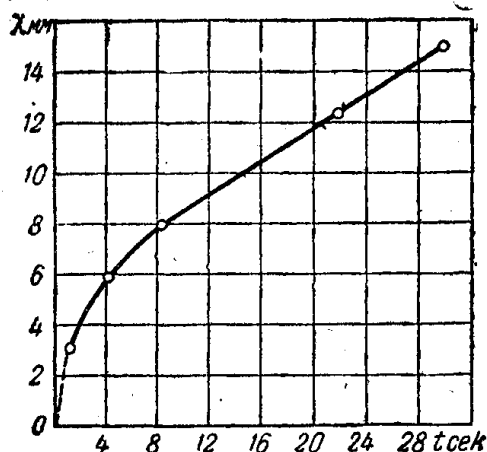
если

$$x'_k = n x_k.$$

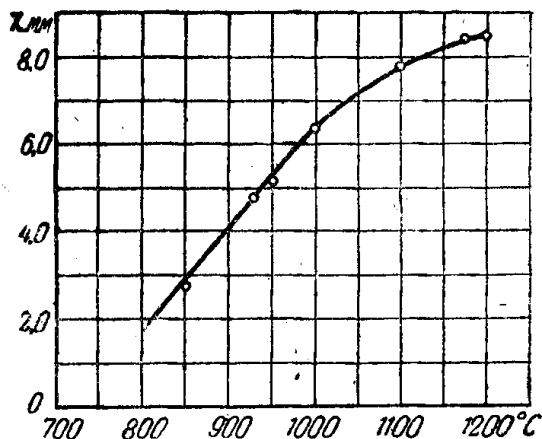
Сравнение этих выражений с уравнением (VII, 3) показывает, что здесь имеется зависимость, вытекающая из подобия.

После же достижения глубиной x_k значения $x_k > \delta_{\text{гор}}$ возрастание времени t_v идет по линейному закону (фиг. 136).

На фиг. 137 изображена зависимость $x_k = \varphi(T_0)$.



Фиг. 136. Зависимость глубины закаленного слоя x_k от времени нагрева элемента t при $\theta_0 = 950-980^\circ$; $f = 2000$; $pt = 6-8 \text{ вт}\cdot\text{ч}/\text{см}^3$; $x_k = \varphi(t)$.

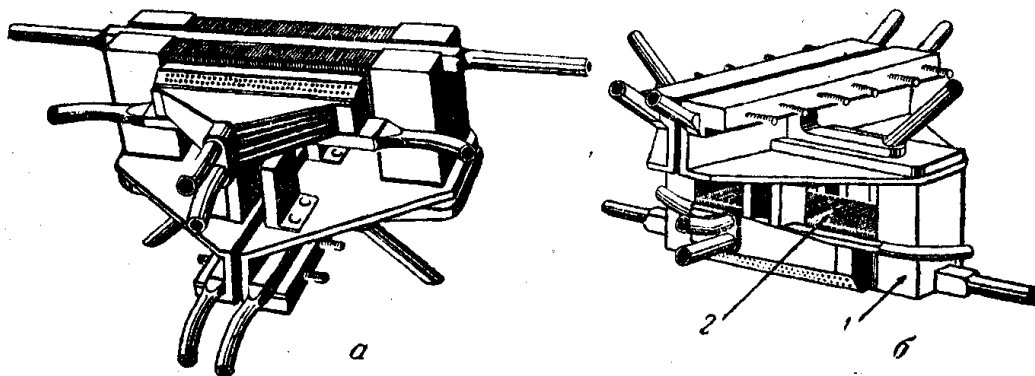


Фиг. 137. Зависимость глубины x_k от температуры $T_0 = \theta_0 + 20^\circ$ наружной поверхности при постоянном времени нагрева $t = 3,8 \text{ сек.}$; $f = 2000 \cdot \text{гц}$; $x_k = \varphi(T_0)$.

Вследствие изменений параметров при заданной частоте и скорости невозможно получить глубину закаленного слоя меньше некоторой критической.

Индуктор

При последовательной закалке плоских предметов, особенно при радиочастотах, вполне возможно применять индукторы без железа. Однако в этом случае либо будут получаться нерабочие обратные части провода, если индуктор сделан в виде петли, расположенной в плоскости, перпендикулярной движению, либо нагрев будет происходить в два приема, если петля расположена в плоскости, параллельной закаливаемой поверхности.

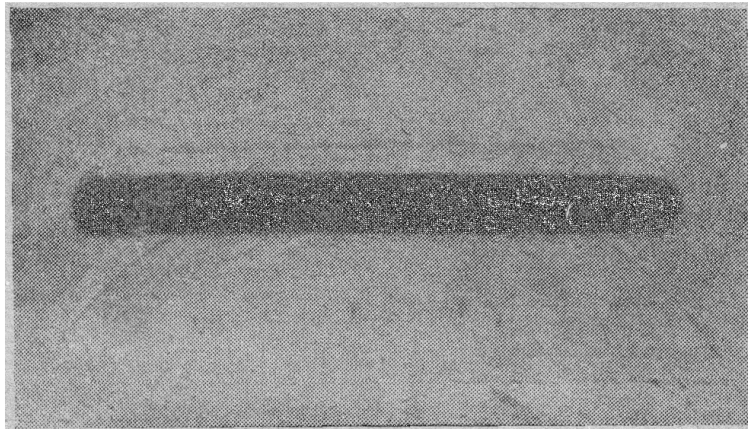


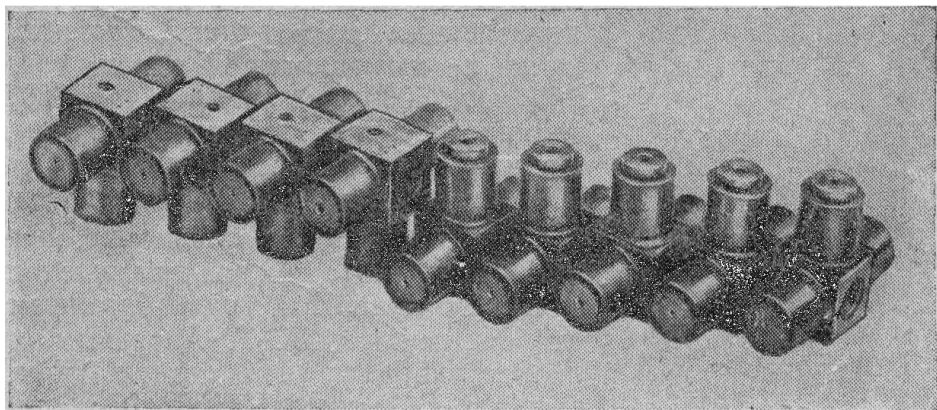
Фиг. 138. Индуктор с железной магнитной цепью для закалки плоских поверхностей.

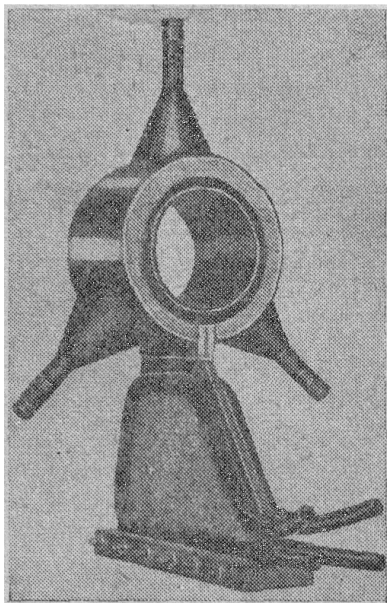
1—вид с активной стороны; 2—вид со стороны подводов тока.

Первый индуктор имеет меньший к. п. д., чем второй; недостатком же второго является неравномерность глубины закаленного слоя при сходе и находе.

Ввиду этого лаборатория автора разработала систему индуктора с железной магнитной цепью на рабочей части провода (фиг. 138).







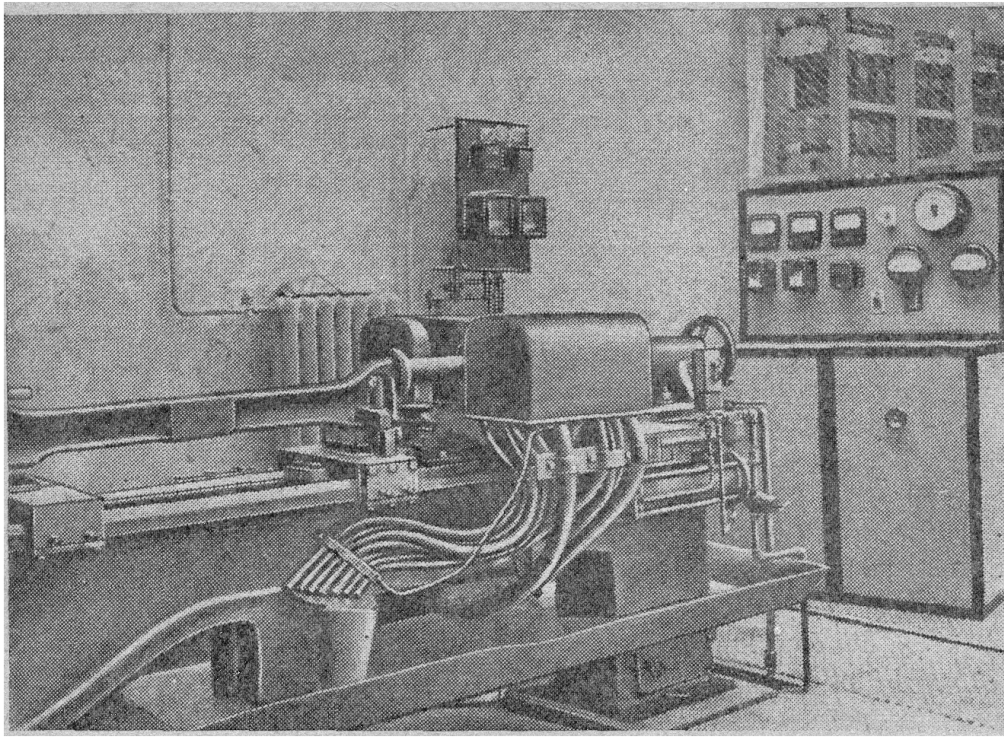


Таблица 29

Поводка поперечного бруса ХТЗ после закалки шеек (обозначения см. фиг. 142)

Замеры до закалки

№ деталей	Элементы замера							
	2		4		5		6	
	+	-	+	-	+	-	+	-
1	0,05		0,04		0,03			0,03
2	0,10		0,07		0,02			0,05
3	0,04		0,03		0,02			0,04
4	0,07		0,06		0,01			0,05
5	0,06		0,05		0,02			0,02
6	0,07		0,07		0,04			0,01
7	0,09		0,06		0,05			0,04
8	0,06		0,05		0,03			0,01
9	0,04		0,04		0,01			0,04
10	0,05		0,05		0,03			0,02

Замеры после закалки

1	0,46		0,34			0,46		0,64
2	0,21		0,70		0,05			0,30
3	0,03		0,04		0,25			0,40
4	0,10		0,09		0,03			0,02
5	0,12		0,66		0,02			0,12
6	0,04			0,42	0,08			0,26
7	0,07		0,05		0,04			0,02
8	0,11		0,46		0,22			0,14
9	0,12		0,10			0,44		0,04
10	0,14		0,42			0,16		0,07

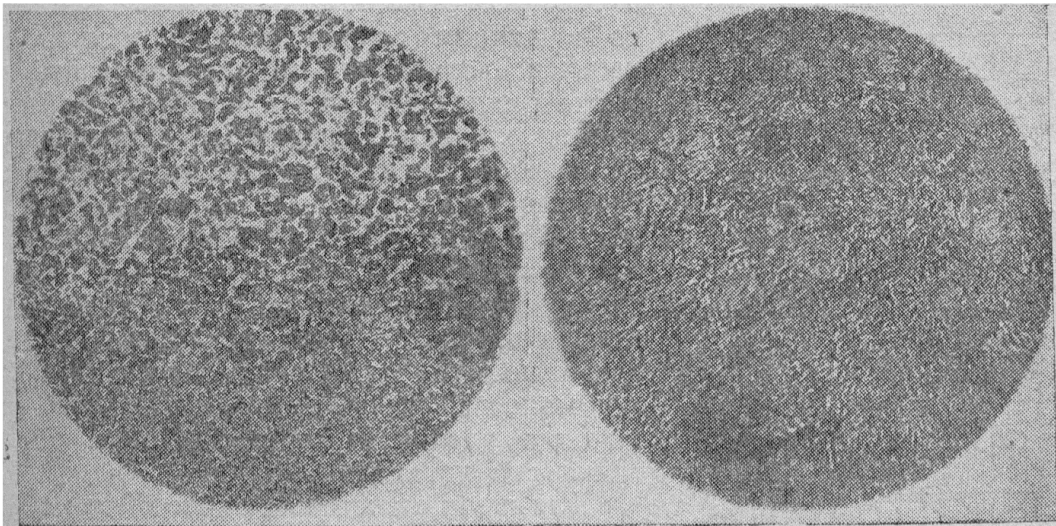
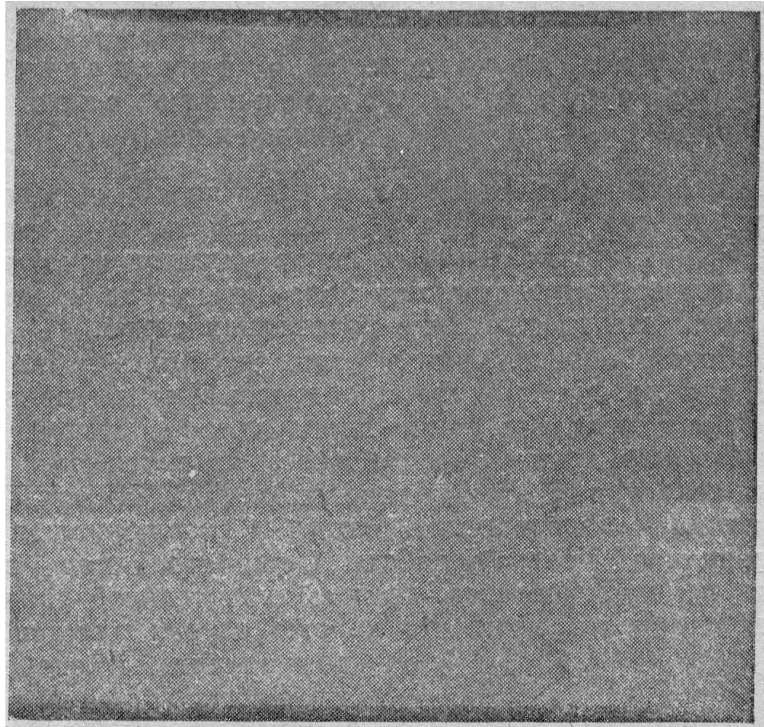
Замеры до закалки

№ п/п	Элементы замера									
	Ø 1		Ø 2		Ø 3		Ø 4		7	8
	I—I	II—II	I—I	II—II	I—I	II—II	I—I	II—II		
1	71,92	71,92	71,92	71,92	71,94	71,93	71,94	71,94	134,93	134,97
2	71,92	71,92	71,96	71,93	71,96	71,94	71,94	71,94	134,76	134,96
3	71,95	71,94	71,96	71,94	71,95	71,93	71,92	71,93	134,92	134,92
4	71,92	71,93	71,94	71,94	71,95	71,95	71,94	71,96	134,92	134,64
5	71,93	71,93	71,96	71,95	71,95	71,93	71,93	71,95	134,85	134,52
6	71,93	71,93	71,96	71,95	71,95	71,94	71,93	71,94	134,74	134,78
7	71,92	71,93	71,95	71,94	71,94	71,94	71,92	71,92	134,82	134,89
8	71,94	71,94	71,96	71,96	71,95	71,95	71,93	71,94	134,96	134,72
9	71,94	71,94	71,96	71,95	71,91	71,92	71,91	71,91	134,82	134,92
10	71,94	71,94	71,96	71,96	71,95	71,95	71,94	71,93	134,83	134,64

Замеры после закалки

1	71,93	71,93	71,98	71,95	71,97	71,97	71,96	71,96	134,65	134,46
2	71,93	71,93	71,98	71,96	71,99	71,97	71,95	71,95	134,20	134,70
3	71,95	71,95	71,98	71,97	71,98	71,96	71,93	71,92	134,96	134,91
4	71,93	71,93	71,97	71,97	71,98	71,99	71,95	71,96	134,95	134,56
5	71,94	71,94	71,98	71,97	71,97	71,98	71,94	71,94	134,72	133,80
6	71,94	71,94	71,99	72,00	71,98	71,97	71,94	71,95	134,75	135,10
7	71,93	71,94	71,99	71,98	71,98	71,97	71,93	71,94	134,72	134,70
8	71,95	71,95	71,99	71,99	71,98	71,98	71,95	71,94	134,75	134,36
9	71,95	71,95	72,00	72,00	71,95	71,96	71,92	71,92	134,75	134,73
10	71,95	71,95	71,99	71,98	71,98	71,98	71,94	71,94	134,80	134,48

Примечание. Брусья 1—3 были закреплены в центрах; остальные—принятым окончательно способом крепления—в лапах.



2. Закалка коленчатых валов

Общие положения и трудности получения равномерно закаленного слоя требуемой ширины

Хотя закалка коленчатого вала является одной из наиболее трудных, но она достаточно хорошо освоена в Советском Союзе. За границей закалке коленчатых валов уделяют исключительное внимание и широко ее применяют, тем более что метод индукционной закалки зародился там при закалке коленчатых валов.

Можно определенно сказать, что применение индукционного метода для коленчатых валов полностью себя оправдывает и с технической и с производственно-экономической сторон.

Благоприятным прежде всего является то, что коленчатый вал, как основная и самая дорогая деталь мотора, относится к деталям массового производства, которые заслуживают внимания производителей. Условия работы коленчатого вала достаточно напряженные, причем требуется, помимо значительной прочности, также и большая твердость шеек, что хорошо осуществляется индукционным методом закалки.

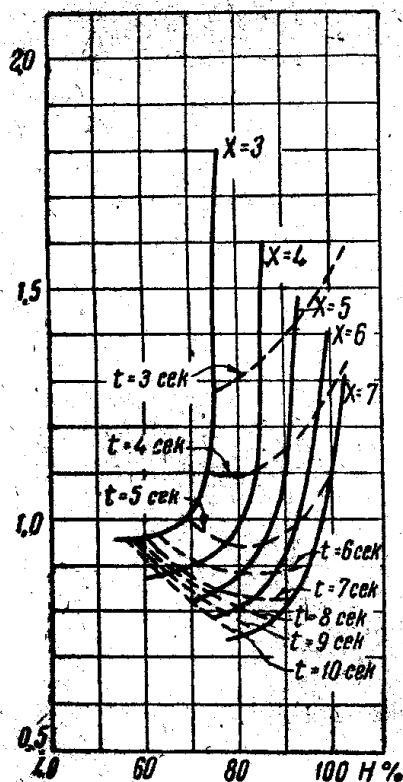
В особенности это относится к коленчатым валам дизельных двигателей автомобилей.

Что касается самого процесса закалки, потребных мощностей и выбора частоты, то в данном случае целиком можно отнести все сказанное об одновременной закалке цилиндрических предметов. Добавочные затруднения, связанные с коленчатыми валами, вытекают главным образом из наличия у шеек вала галтелей и щек, а также несимметричной формы вала, если рассматривать не вал в целом, а отдельную шейку. Наличие галтели и требование конструкторов, чтобы расстояния между галтелью и началом закаленного слоя были малыми, вызывают значительное увеличение удельной мощности, т. е. общей мощности установки.

Для шеек диаметром около 60 мм обычно требуется расстояние до галтели в 5 мм, хотя это требование едва ли всегда достаточно обосновано.

Требование повышения мощности при закалке шеек коленчатого вала, по сравнению с закалкой длинного цилиндра без галтели, вытекает из того, что магнитное поле значительно отстает от его равномерного распределения при бесконечно длинной катушке вследствие сравнительно небольшой ширины шейки по сравнению с ее диаметром. Неравномерность, происходящая от краевого эффекта, ведет к тому, что нагрев начинается в середине шейки и лишь после значительного времени доходит до краев.

В случае цилиндра без галтели можно не выжидать расширения закаленного слоя до ширины индуктора, а делать индуктор на 3—5 мм шире требуемой ширины закаленного слоя. Это дает возможность при всех

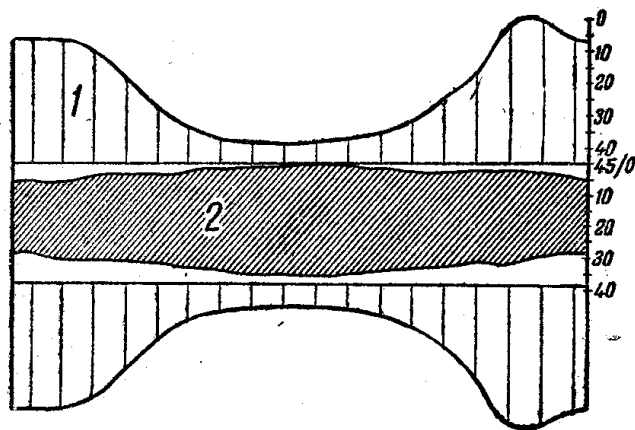


Фиг. 148. Зависимость между удельной мощностью p квт/см^2 и шириной закаленного слоя H (в процентах от полной ширины индуктора) при различных значениях X и t .

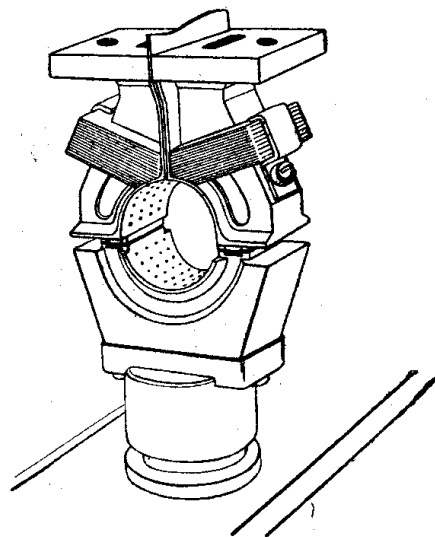
равных условиях понизить удельную мощность, а следовательно, и общую мощность установки. Наличие галтели не позволяет прибегнуть к этой мере. Исследования, произведенные в лаборатории автора инж. А. А. Фогелем, показали, что, если для закалки при глубине 5 мм и ширине закаленного слоя $H=80\%$ ширины индуктора необходимо $0,8 \text{ квт/см}^2$, то при $H=100\%$ необходимо уже $1,4 \text{ квт/см}^2$, т. е. на 75% более (фиг. 148).

Если же при этом требуется получить закаленный слой глубиной $x_k=3$ или даже 4 мм, то на частоте 2000 гц, для которой приведены данные, произвести закалку более широко, чем на $H=85\%$, невозможно.

Приведенные данные относятся к закалке цилиндра диаметром 52 мм при ширине индуктора 33 мм.



Фиг. 149. Влияние шеек на ширину закаленного слоя при закалке коленчатых валов.
1—шеки; 2—закаленная поверхность.



Фиг. 150. Рейтеры из расслоенного железа, служащие для получения слоя равномерной ширины.

Из сказанного следует, что если ширина шейки с галтелью равна 38 мм, что даст при ширине индуктора 33 мм расстояние в 2,5 мм между концом галтели и индуктором, то при глубине закаленного слоя $x_k=6$ мм можно получить ширину закаленного слоя 27 мм при удельной мощности $0,8 \text{ квт/см}^2$. При этом расстояние от галтели будет 5,5 мм.

При глубине $x_k=4$ мм и том же расстоянии потребуется уже удельная мощность 1 квт/см^2 . Более высокие частоты, чем 2000 гц, здесь несколько облегчат задачу.

Другое затруднение при закалке коленчатого вала составляет наличие шеек. Как показали опыты лаборатории автора, отсасывание тепла щеками, а может быть, и распределение тока в индукторе вследствие поверхностного эффекта и нарушение в распределении магнитного поля вызывают неравномерную ширину закаленного слоя. Против шеек ширина поля обычно уменьшается. На фиг. 149 показано влияние шеек, причем средняя часть (густая штриховка) изображает развертку закаливаемого слоя, а развертка шеек (вертикальная) показана редкой штриховкой. Этот недостаток, правда, может быть устранен увеличением удельной мощности, что, конечно, невыгодно.

В последние годы инж. А. А. Фогель предложил использовать железную расслоенную цепь для увеличения связи между индуктором и закаливаемым слоем в тех местах, где получается уменьшение ширины. Для этого на индуктор в местах сужений надевают П-образ-

ные рейтеры из высокочастотного железа, которые вследствие явления Филда сосредоточивают ток в индукторе вблизи шейки.

Закалка с применением таких рейтеров (фиг. 150) дает без увеличения мощности совершенно одинаковую ширину закаленного слоя. Это устройство впервые было применено на станке ЗИС (авторская заявка № 26585).

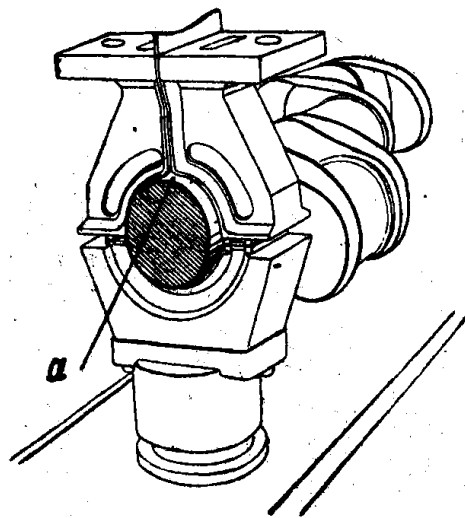
Помимо этого, применение рейтеров увеличивает равномерность ширины и в тех случаях, когда это сужение происходит из-за других причин, например в местах подвода тока.

Затруднения при закалке коленчатых валов в станках-автоматах. Поводка при нагреве

Закалка коленчатых валов носит массовый характер. Так, выпуск каждого из наших автозаводов за прошлые годы составлял около 500 валов в день, что при 13 шейках на вал дает 6500 шеек в день, или при двухсменной работе 7,5 шеек в минуту. Иначе говоря, станок должен быть рассчитан на закалку одной шейки в течение 8 сек.

Такая производительность возможна лишь при автоматическом или в крайнем случае полуавтоматическом станке. Это требование создает новые затруднения, если принять во внимание, что наличие шеек заставляет делать индуктор разъемным. При этом перестановка индуктора даже с шейки на шейку одинакового размера требует много времени. Поэтому в автоматах неизбежно приходится устраивать для каждой шейки отдельный индуктор.

Значительное число индукторов требует малых допусков при изготовлении вала и, кроме того, точной установки вала по отношению к каждой из шеек. Однако опыт работы лаборатории автора на ЗИС показал, что даже точный станок не всегда может обеспечить решение этой задачи.



Фиг. 151. Шейки коленчатого вала в индукторе.

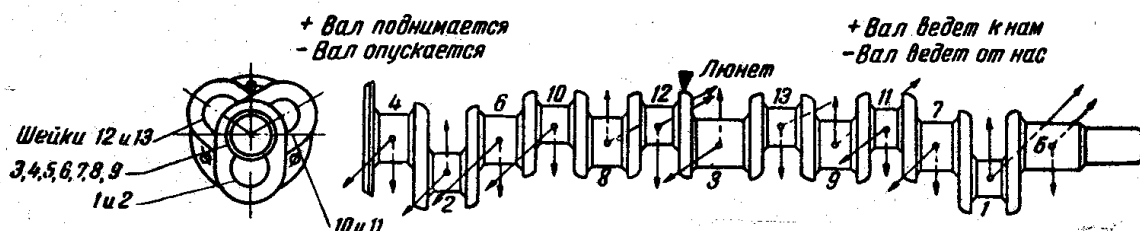
Исследования, проведенные на ЗИС работниками лаборатории автора инж. И. И. Контор и С. В. Шашкиным, показали, что, несмотря на достаточную точность в обработке вала и точность станка, в процессе нагрева вала при закалке очень часто происходит соприкосновение вала с индуктором. Это вызывает оплавление шеек в месте касания и даже оплавление индуктора. В лучшем случае здесь получается незакаленное пятно на шейке, обуславливающее брак вала.

Причиной касаний может служить значительное электромагнитное взаимодействие между индуктором и валом из-за несимметрии во взаимном расположении индуктора и вала. Обычно вал притягивается к тому месту, где лежат подводы тока и находится разрез индуктора (фиг. 151, точка а).

Помимо такого притяжения, большую роль играют деформации вала, происходящие в период нагрева и охлаждения каждой из шеек при ее закалке; при этом некоторые шейки имеют особенно большую деформацию. При нагреве каждое колено стремится как бы выпрямиться, а при остывании — занять прежнее положение. В результате иногда после охлаждения деформация бывает почти незаметна, однако при нагреве во всех случаях она составляет значительную величину.

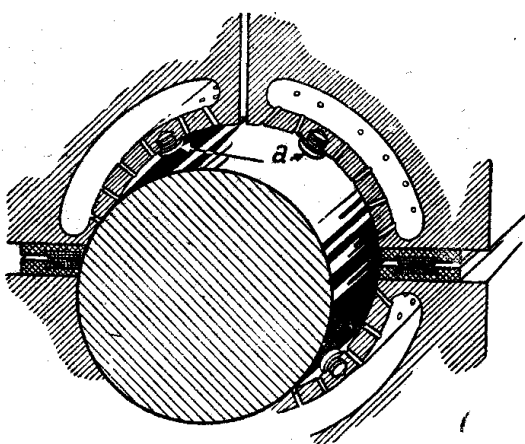
ну. Если взять партию валов, то для всех их замечается некоторая общая закономерность; несколько меняется лишь величина деформации при нагреве отдельных шеек.

Для выяснения размеров, направлений деформации, а также причин их возникновения, было предпринято упомянутое выше исследование. При этом вал устанавливали в центрах и при нагреве каждой шейки двумя индикаторами измеряли горизонтальную и вертикальную деформации (фиг. 152). В табл. 30 приведены величины и направления деформаций, временные, и остаточные для двух случаев: 1) вал установлен в центрах (зажат в двух точках); 2) вал зажат в трех точках при помощи люнета.

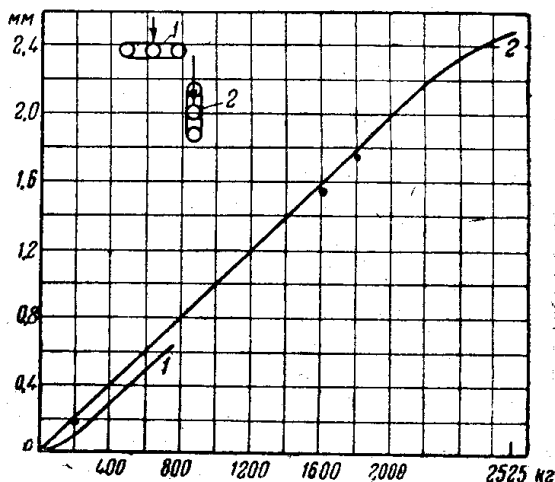


Фиг. 152. Деформация вала при закалке.

При двух закрепленных точках деформация доходит до 1,74 мм, причем зазор между индуктором и шейкой составляет 2—2,5 мм, что, конечно, недопустимо. При закреплении в трех точках деформация не превышает 0,67 мм. Это показывает, что установка вала в станке-автомате только в центрах недопустима.



Фиг. 153. Сепараторы *a*, препятствующие касанию шейки к индуктору.



Фиг. 154. Прогиб вала ЧТЗ.

Вопрос можно разрешить, идя двумя путями.

Один путь был принят американской фирмой Токко. Этот способ предлагался в свое время лабораторией автора. Способ состоит в том, что вал закрепляют лишь одним концом или он даже свободно лежит на одном конце. Центровку шейки по отношению к индуктору осуществляют посредством устройства на внутренней стороне индуктора ряда сепараторов, не допускающих соприкосновения шейки с металлом индуктора. Сепараторы изготовляют из кварца, чаще из пирофилита или другого подобного материала, в виде цилиндров диаметром около 3,5 мм со шляпкой несколько большего диаметра снаружи (фиг. 153). Сепараторы помещают в цилиндрические углубления в металле индуктора.

Таблица 30

Коробление коленчатых валов ЗИС-5 при закалке в автоматическом станке

Вал при нагреве зажат в трех точках										Вал зажат в двух точках (в центрах)										Сравнение	
№ шейки	Деформация в вертикальной плоскости, мм			Деформация в горизонтальной плоскости, мм			Результатирующая деформация, мм	№ шейки	Результатирующая деформация, мм	Результатирующая деформация, мм	Результатирующая деформация, мм	Деформация в вертикальной плоскости, мм	Деформация в горизонтальной плоскости, мм	Результатирующая деформация, мм	№ шейки	Результатирующая деформация, мм					
	при нагреве	при охлаждении	остаточная деформация	при нагреве	при охлаждении	остаточная деформация	вал II									вал I					
1	+0,42	-0,32	+0,10	-0,10	+0,10	0	0,44	0,10	1	+0,50	-0,60	-0,10	-0,40	0,64	1	0,44	0,64				
2	+0,02	-0,02	0,0	+0,05	-0,10	-0,05	0,05	0,05	2	+0,50	-0,55	-0,05	+0,70	0,86	2	0,05	0,86				
3	+0,45	-0,62	-0,17	+0,50	-	-	0,67	0,17	3	+1,15	-1,35	+0,20	+1,30	1,74	3	0,67	1,74				
4	-0,03	-0,10	-0,13	+0,30	-0,10	+0,20	0,30	0,23	4	-0,40	0,0	-0,40	+0,90	0,98	4	0,30	0,98				
5	-0,01	+0,01	0,0	-0,05	0,0	-0,05	0,05	0,05	5	-0,30	+0,40	+0,10	-0,35	0,46	5	0,05	0,46				
6	0,0	0,0	0,0	+0,15	-0,15	0,0	0,15	0,0	6	-0,05	+0,15	+0,10	+0,50	0,50	6	0,15	0,50				
7	-0,05	+0,05	0,0	+0,65	-0,80	-0,15	0,67	0,15	7	-0,35	+0,50	+0,15	+1,45	1,50	7	0,67	1,50				
8	+0,30	-0,25	+0,05	-0,20	+0,15	-0,05	0,35	0,07	8	+1,05	-0,15	+0,95	-0,70	1,26	8	0,35	1,26				
9	+0,50	-0,55	-0,05	-0,10	+0,15	+0,05	0,51	0,07	9	+0,65	+0,10	+0,75	-0,50	0,82	9	0,51	0,82				
10	-0,07	0,0	-0,07	+0,05	-	-	0,09	0,07	10	-0,70	+0,50	-0,20	+0,50	0,86	10	0,09	0,86				
11	0,0	-0,08	-0,08	0,0	+0,20	+0,20	0,0	0,21	11	-0,15	+0,20	+0,05	+0,30	0,34	11	0,0	0,34				
12	-0,43	+0,35	-0,08	-0,45	-	-	0,62	0,08	12	-1,15	+1,25	+0,10	-1,25	1,70	12	0,62	1,70				
13	-0,24	+0,26	+0,02	-0,35	-	-	0,42	0,02	13	-0,35	+0,70	+0,35	-0,50	0,61	13	0,42	0,61				

Необходимость закреплять лишь один конец вала вызвана тем, что тепловые деформации в случае двухстороннего закрепления вала создают столь большие давления на сепараторы, что они, как состоящие из недостаточно прочного материала, неизбежно будут раздавлены. Опыты лаборатории автора показали, что прогиб вала ЧТЗ на 1 мм отвечает усилию, приложенному к середине вала около 1 т (фиг. 154). Конечно, такое усилие не выдержат один или два сепаратора; рассчитывать же на большее число их нельзя ввиду статической неопределенности системы. При закреплении в одном конце или при свободно лежащем вале сепаратор испытывает лишь усилие, не превышающее веса вала.

Другой путь принят лабораторией автора в начале работ над коленчатыми валами, когда пришли к заключению, что для быстро действующего автомата более удобно жесткое закрепление вала без каких-либо сепараторов. Такая система пригодна для валов любого веса и имеет преимущество большей определенности.

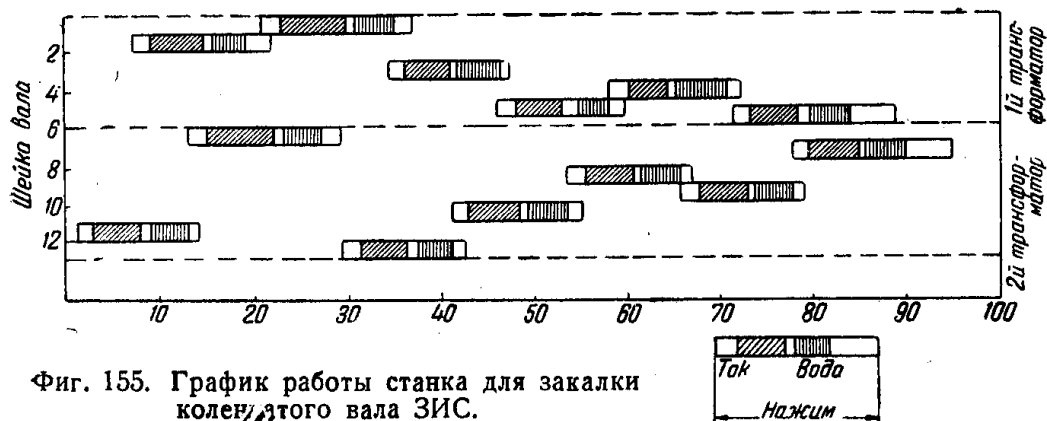
Однако в этом случае необходимо закреплять вал не в двух, а в трех точках. В третьей точке вал закрепляют посредством люнета.

Станок для закалки коленчатых валов системы ЗИС — лаборатория В. П. Вологодина

Так как одним из больших преимуществ индукционного метода закалки является возможность применять станки-автоматы, то здесь описан станок для коленчатых валов ЗИС, разработанный под руководством автора работниками ЗИС т. Ивановым, Грейль и Рыскиным.

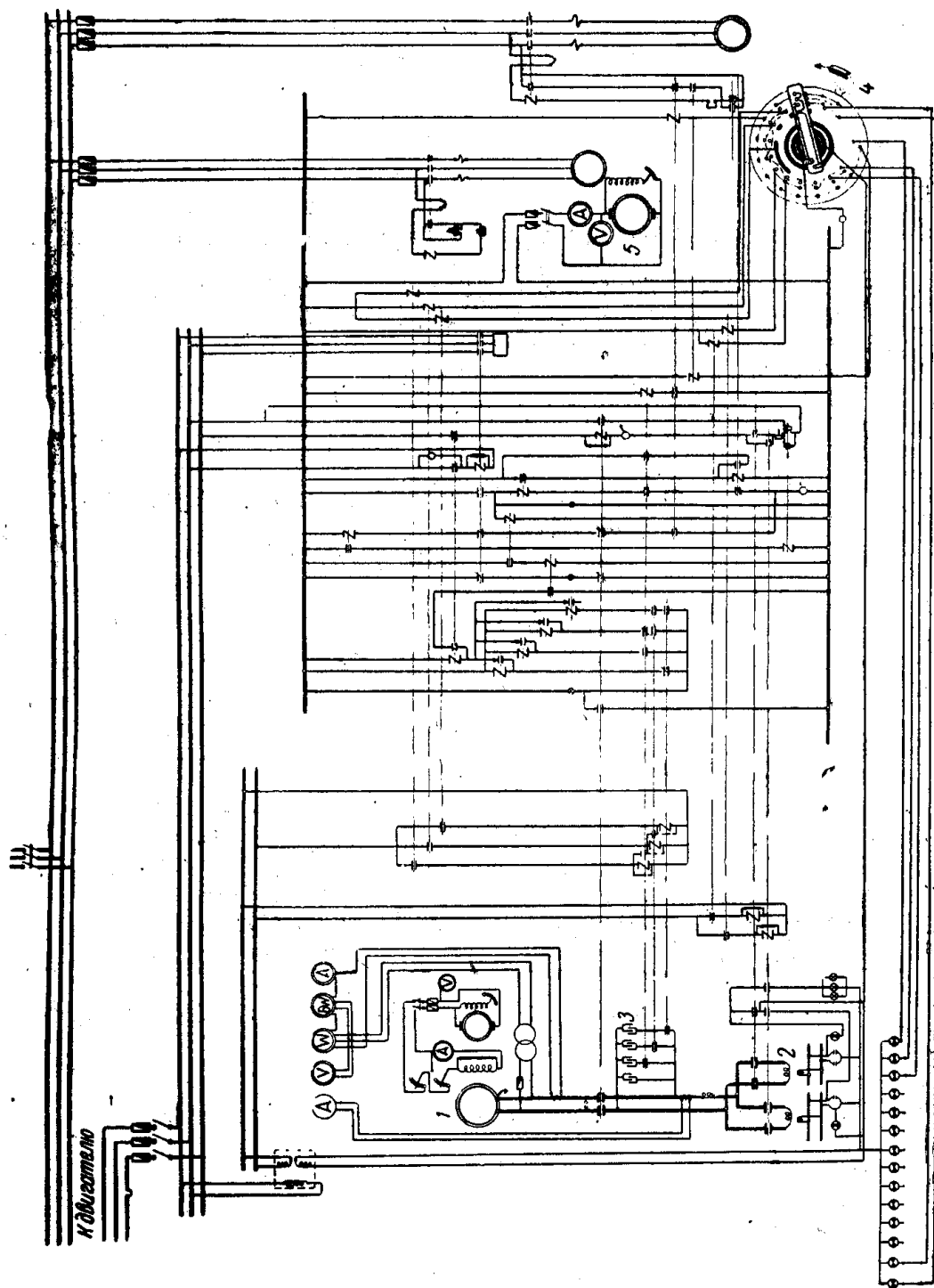
При конструировании станка были приняты следующие положения:

1. Закалка всех шеек в одном станке при одной установке вала.
2. Полная автоматичность.
3. Жесткое закрепление вала в центрах с люнетом.



Фиг. 155. График работы станка для закалки коленчатого вала ЗИС.

4. Применение двух закалочных трансформаторов (один для шести, другой для семи шеек).
5. Гидравлическое управление.
6. Распределение закалочной воды по индукторам, вращающимся цилиндрическим золотником.
7. Распределение масла по системе, перемещающей индуктор, вращающимся золотником, приводимым общим двигателем, вместе с водяным золотником.
8. Открытие и закрытие закалочной воды двумя кранами-золотниками с электрическим приводом.



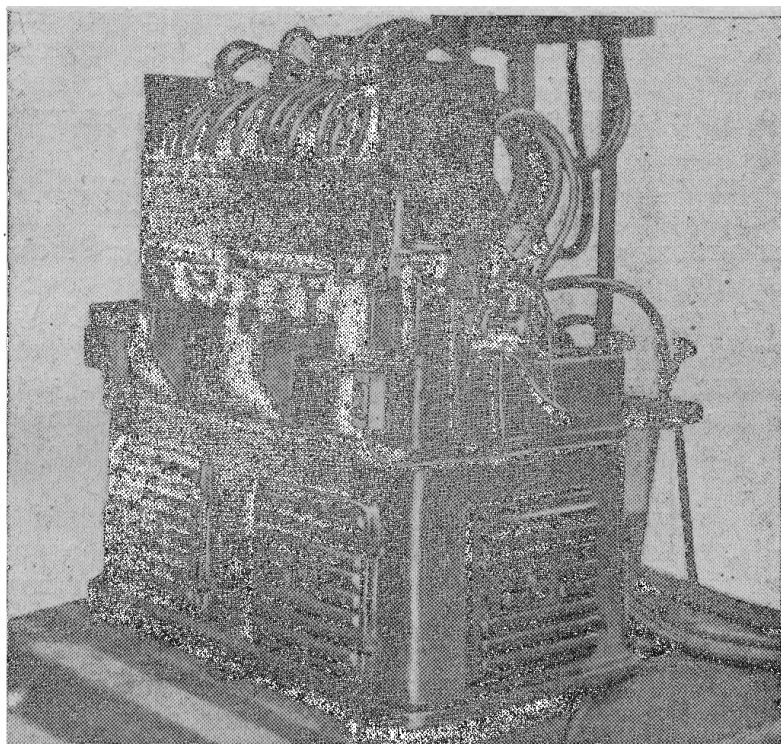
Фиг. 156. Схема управления станка ЗИС:

1—генератор 150 кат, 2000 гц;
2—закалочные трансформаторы; 3—конденсаторная батарея; 4—коммутатор управления; 5—вспомогательный агрегат.

9. Управление мотором водяного и масляного золотника от вращающегося плоского коммутатора, работающего по стоп-стартерной системе.

10. Использование того же коммутатора для включения коммутатора рабочего тока и для открытия водяных кранов.

11. Охватывание всеми 13-ю полуиндукторами всех шеек сразу, причем они опускаются вместе с той частью станка, на которой укреплены трансформаторы, из верхнего положения, занимаемого этой частью при закладывании вала.



Фиг. 157. Общий вид станка системы ЗИС — проф. В. П. Вологодина.

12. Прохождение тока по тому или другому индуктору обуславливается замыканием его цепи посредством подъема соответствующего ему полуиндуктора.

Время прохождения тока и воды и их последовательность определяются посредством реле времени, начальные моменты работы которых даются коммутатором. Последовательность процесса закалки шеек показана на фиг. 155, причем машинное время составляет 48%, а весь процесс закалки происходит в течение 2 мин. 15 сек. Машинное время можно увеличить посредством большего перекрытия отдельных стадий процесса.

Укрепление вала люнетом занимает 35 сек. или около 23% всего цикла.

Автоматизация этого процесса затруднительна ввиду закрепления люнетом необработанной части вала. Она была бы возможна при обработке на вале поверхностей, необходимых для упоров люнета.

Схема управления станком показана на фиг. 156, а общий вид станка изображен на фиг. 157.

Устройство индукторов показано на фиг. 150. Здесь каждый индуктор состоит из двух неподвижных частей, к которым приключена вторичная обмотка трансформатора. Эти части имеют между собой зазор в 1,5 мм. Замыкающая часть укреплена на нырале ма-

сляют системы и может подниматься для образования замкнутой цепи индуктора.

Индуктор изготовлен из красной меди. Его рабочая поверхность имеет толщину около 10 мм и снабжена отверстиями для прохождения воды в период, последующий за нагревом, для охлаждения закаливаемой поверхности. Эта же вода охлаждает также индуктор, так как при прохождении тока индуктор работает на теплоемкость.

Важную часть конструкции индуктора представляют контактные поверхности, так как они несут очень большие токи, составляющие в этом станке около 10 000 а. Трудность осуществления контактной поверхности усугубляется еще тем, что ток в индукторе, вследствие поверхностного эффекта, сосредоточивается в узкой полоске шириной [определяемой уравнением (I, 4) или табл. 7] для красной меди 0,15 см, что дает колоссальную плотность тока в контакте — в 90 а на 1 мм² при ширине индуктора 70 мм.

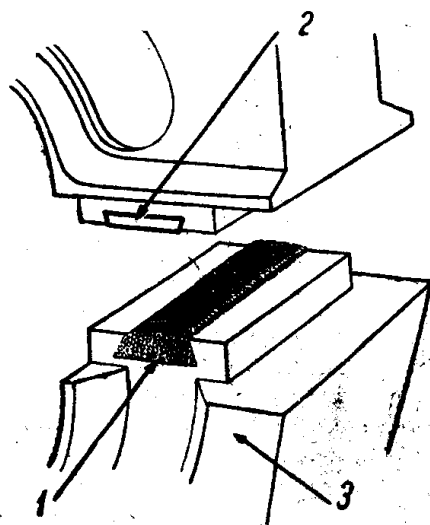
Вопрос о контакте можно разрешить двумя путями. Первый путь — это применение весьма больших давлений между контактными поверхностями при условии хорошей обработки поверхностей и использования для теплоотвода и предохранения от окисления контактов из серебра. Этим путем разрешили задачу американцы. Лаборатория автора не могла применить необходимые большие давления из-за конструкции станка (наличие лишь нажима замыкающей части индуктора силой около 250 кг), тогда как в американской системе применен специальный замок, создающий большие давления между контактами.

В качестве выхода из положения автор предложил контактное устройство, при котором выполнены следующие требования: 1) контакт должен быть быстро заменяем; 2) активная контактная поверхность должна быть значительно увеличена; 3) контакт не должен требовать точной пригонки, например шабрения.

Для выполнения всех этих условий было применено устройство контакта, состоящее из одной сменной серебряной контактной поверхности в виде привертываемой пластинки 2 (фиг. 158). В качестве другого контакта было взято тело трапециoidalного сечения 1, которое вдвигается в паз в массивной части индуктора 3. Контактное тело изготовляют из прессованной посеребренной сетки красной меди.

Такое устройство контакта можно рассматривать не как контакт из сплошной массы с высокой проводимостью, а как большое число контактов, из которых каждый имеет сравнительно большое сопротивление, тогда как общее активное сопротивление весьма мало. Поэтому явления

поверхностного эффекта не дают здесь сосредоточения тока в узкой поверхности. Кроме того, если при плоских массивных контактах возможно обеспечить даже при больших давлениях лишь немногие точки соприкосновения между двумя поверхностями ввиду статически неопределимой системы, то при сетчатом контакте, вследствие упругости отдельных его частей и большого сопротивления каждого отдельного элемента контакта, легко получается очень большое число контактных точек, причем ток между ними равномерно распределяется. Опыт применения такого рода контакта на ЗИС, ХТЗ и в лаборатории автора



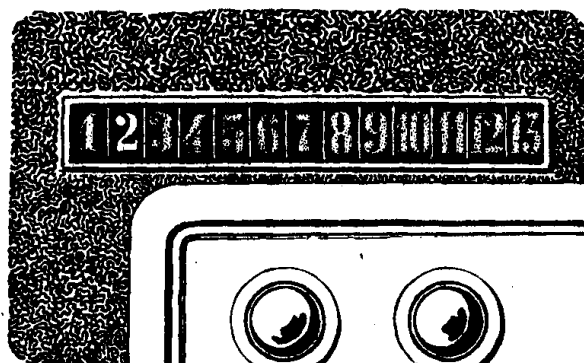
Фиг. 158. Контакт из сетки (системы автора).

полностью оправдал все предположения, относящиеся к целесообразности такого устройства. Однако, как показал опыт, при хорошей пригонке возможно применять и массивные контакты.

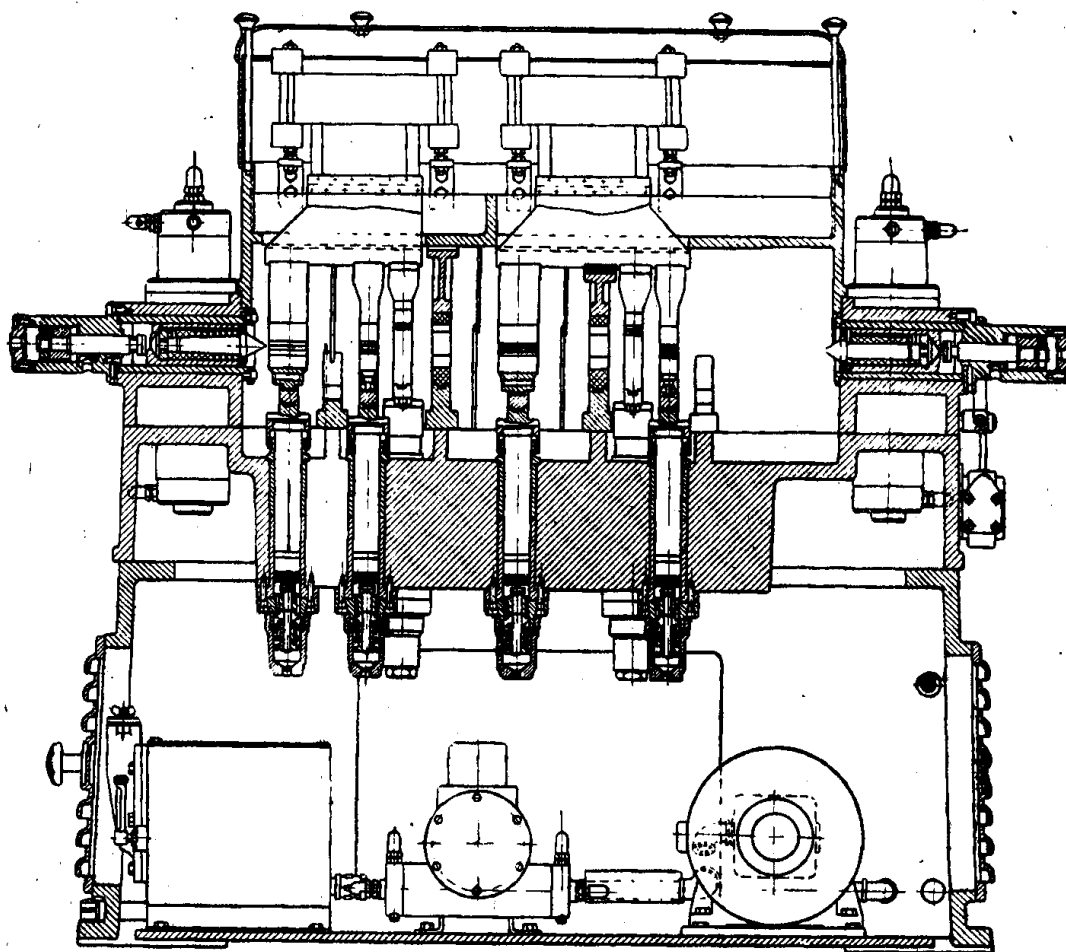
Управление станком идет от пульта, на котором установлены измерительные приборы и реле времени. Оно сводится после заковки вала и поворота рычага масляной системы, прижимающей центры, к нажатию кнопки и наблюдению за мощностью для заковки отдельных шеек. Последовательность заковки указывается освещением номера, отвечающего той или другой шейке (фиг. 159).

Питание станка идет от генератора завода «Электрик» типа 0-150 квт, 2000 гц. Для улучшения $\cos \varphi$ применена конденсаторная батарея, состоящая из бумажно-масляных конденсаторов типа КИП, установленных на стеллаже вблизи генератора.

Для подачи тока индуктором включают первичную обмотку одного из двух трансформаторов посредством того или другого из контакторов, переоборудованных лабораторией автора из нормальной модели ХЭТЗ.

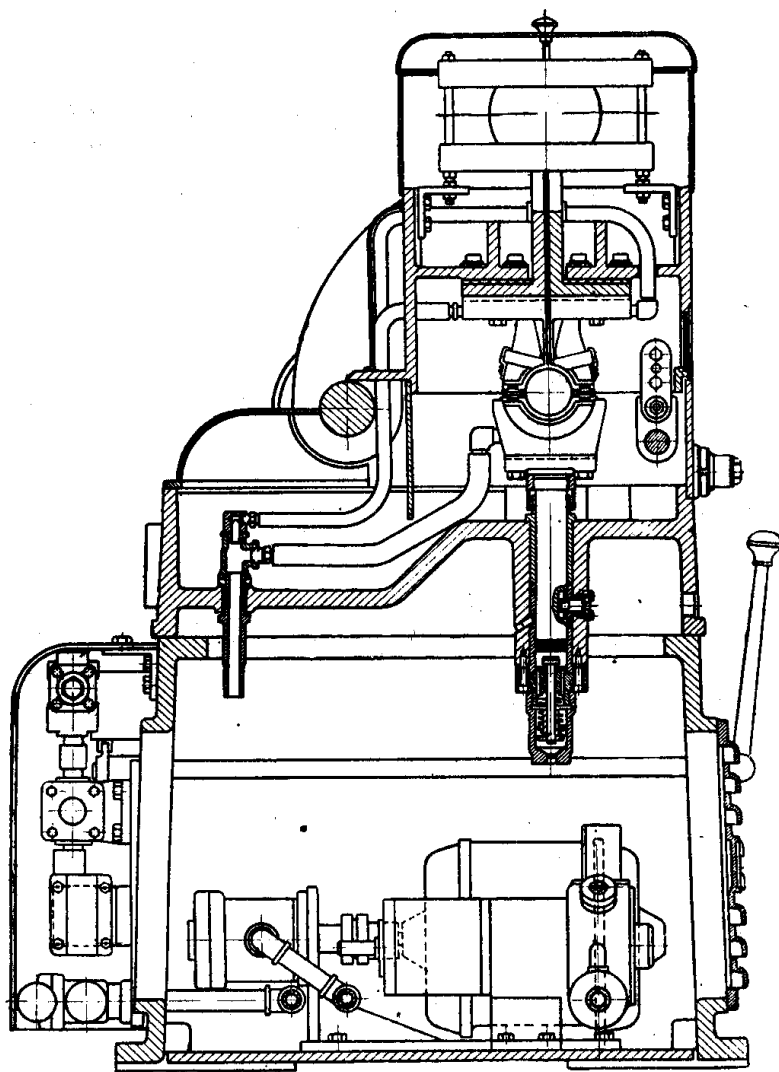


Фиг. 159. Часть пульта с указателем заковки той или другой шейки.



Фиг. 160. Станок ЗИС (проект) для заковки при двух установках (продольный разрез).

Охлаждение и гашение искры контакторов совершается воздухом, включаемым золотником на 1—2 сек., в период, предшествующий выключению тока.



Фиг. 161. Поперечный разрез станка ЗИС.

Помимо описанного станка, конструктором ЗИС инж. Рыскиным сконструирован станок без люнета для закалки при установках вала в двух станках. Здесь, как видно на фиг. 160 и 161, применена система перемещения подвижной части на шарнире, напоминающем по виду книгу.

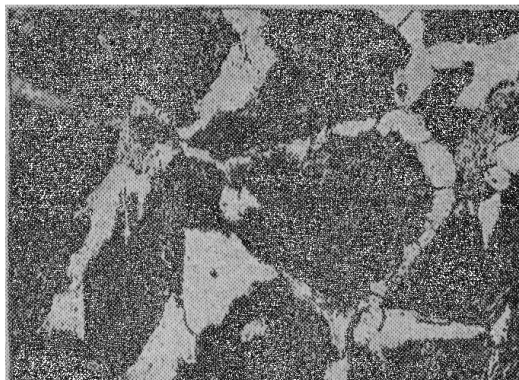
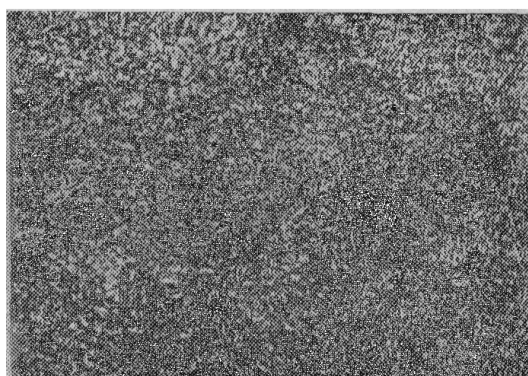
Данные, относящиеся к закалке валов на станке ЗИС, приведены в табл. 31.

Таблица 31

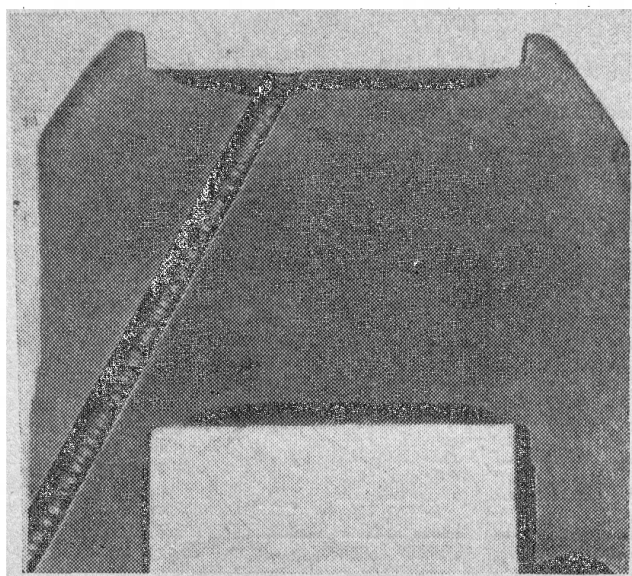
Закалка шеек коленчатого вала ЗИС-5 на станке-автомате

Наименование шеек	Шатунные		Коренные		Хвостовые
№ № шеек	1,2	10—13	3,4	6—9	5
Напряжение, в	740/770	700/730	750/780	750/770	740/750
Ток, а	220/200	200/190	280/250	240/220	210/190
Контур, ток, а	368	368	464	368	384
Время нагрева, сек	3,8	3,8	7	3,8	4,75

Напряжение генератора без нагрузки 770в; ток возбуждения 3,7а.



лее чем вдвое по сравнению с незакаленным валом. На фиг. 163 изображены микрошлифы вала ЗИС, а на фиг. 164 — его макрошлиф.



Фиг. 164. Макрошлиф вала ЗИС-5.

Помимо вала ЗИС-5, были закалены также валы автомашины с дизельмотором ЗИС-Д-6. В табл. 32 приведены данные, относящиеся к износу шеек вала ЗИС-Д-7, закаленного по методу автора, при работе их с подшипниками из свинцовистой бронзы.

Таблица 32

Износ коренных и шатунных шеек коленчатого вала дизеля ЗИС-Д-7 после пробега на шасси 39 623 км и 233,25 час. работы на стенде (всего 48 943 км или 1758,25 час. работы).
Подшипники из свинцовистой бронзы

Коренные шейки (замер в мм)

№№ шеек	1	2	3	4	5	6	7
До пробега	84,887	84,882	84,887	84,88	84,901	84,935	84,898
После пробега	84,871	84,871	84,867	84,859	84,877	84,911	84,882
Износ	0,016	0,011	0,020	0,021	0,024	0,024	0,016
Овал	0,005	0,005	0,010	0,010	0,000	0,005	0,009
Конус	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005

Шатунные шейки

№№ шеек	1	2	3	4	5	6
До пробега	74,924	74,927	74,922	74,931	74,927	74,915
После пробега	74,911	74,915	74,910	74,910	74,916	74,900
Износ	0,013	0,012	0,012	0,021	0,011	0,015
Овал	0,005	0,000	0,005	0,005	0,005	0,010
Конус	0,005	0,000	0,005	0,005	0,005	0,000

Помимо испытаний в пробеге, коленчатый вал ЗИС-5, закаленный индукционным методом, был испытан нагрузкой с пульсацией, статической нагрузкой и, кроме того, на износ на машине Шкода-Саввина. При этом вал № 61 не был отпущен, а вал № 470 отпущен при 200° с выдержкой в 2 часа. После отпуска вал был отшлифован. Результаты этих испытаний приведены в табл. 33, 34 и 35.

Таблица 33

Испытание вала ЗИС-5 в целом виде нагрузкой с пульсацией

№ вала	Минимальная нагрузка кг	Максимальная нагрузка кг	Частота или число пульсаций в мин.	Общее число пульсаций	Продолжительность испытаний	Примечание
61	2500	12 000	400	288 000	12 час.	Никаких признаков деформации не обнаружено
	5000	20 000	400	384 000	16 час.	
	5000	30 000	400	6 000	15 мин.	
470	2500	12 000	400	288 000	12 час.	То же
	5000	20 000	400	384 000	16 час.	
	5000	30 000	400	6 000	15 мин.	

Таблица 34

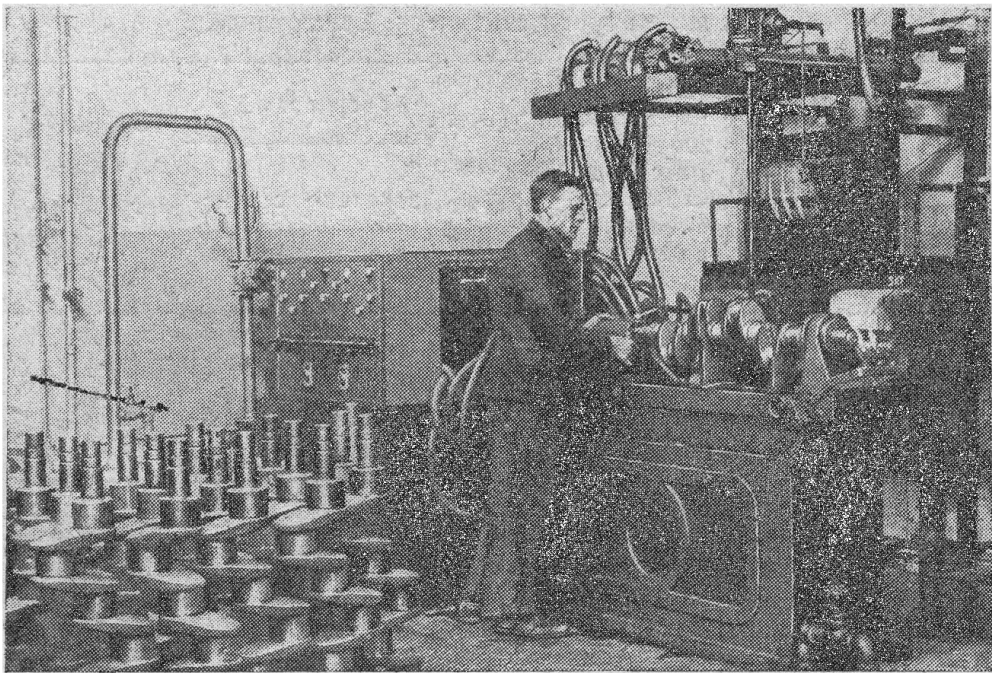
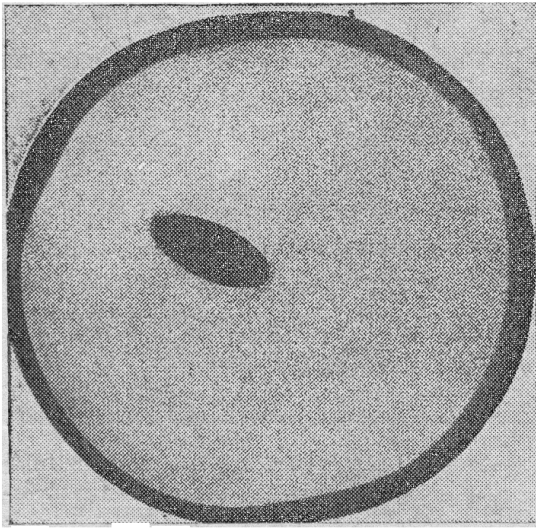
Испытание шеек статической нагрузкой

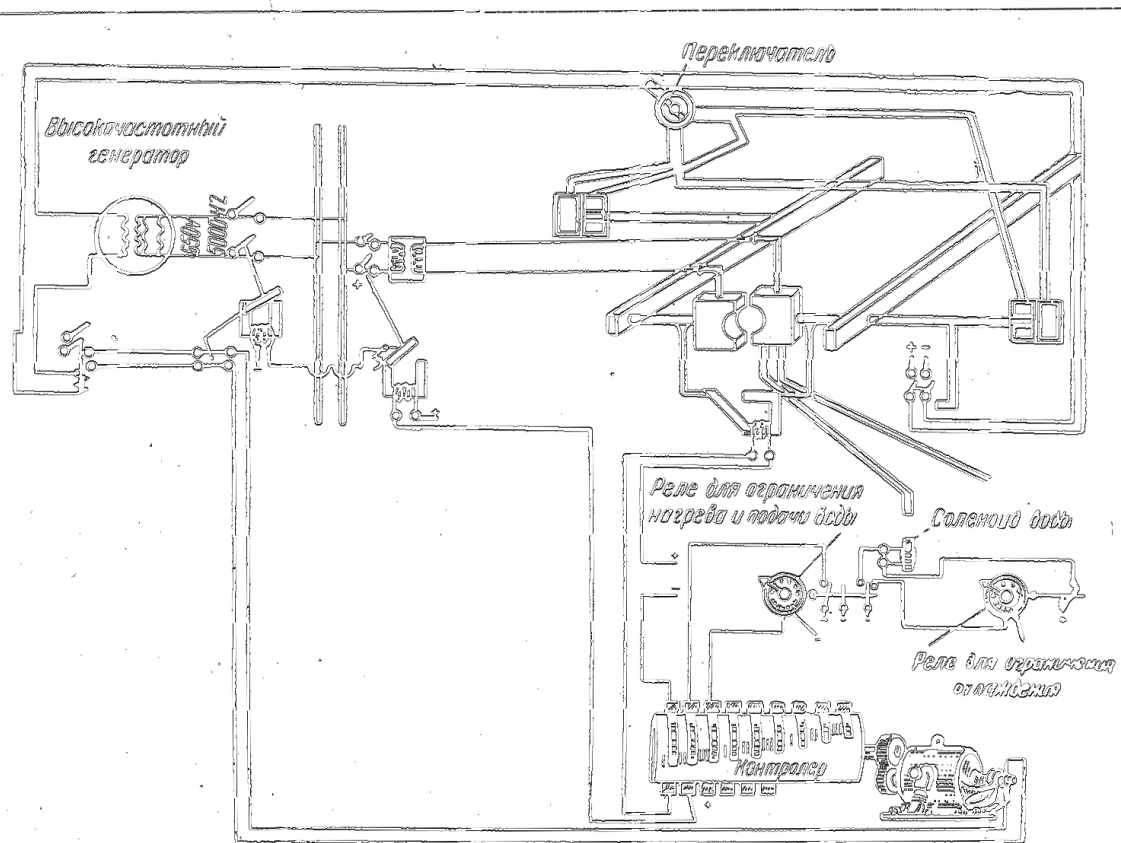
№ вала	Максимальная нагрузка, до которой нагружалась шейка кг	Длина шейки мм	Ширина площадки, полученной от смятия шейки максимальной нагрузкой мм	Соппротивление смятию кг/мм ²	Твердость R_c		Глубина закаленного слоя x_k	Твердость поверхности закаленного слоя по R_c
					закаленного слоя	сердцевины		
61	73 000	30	18	135	53—43	28—25	3,8—1,8	61; 61,5
470	68 000	23	22	134,2	52—46	19—22	4,7—4,5	55; 55,5

Таблица 35

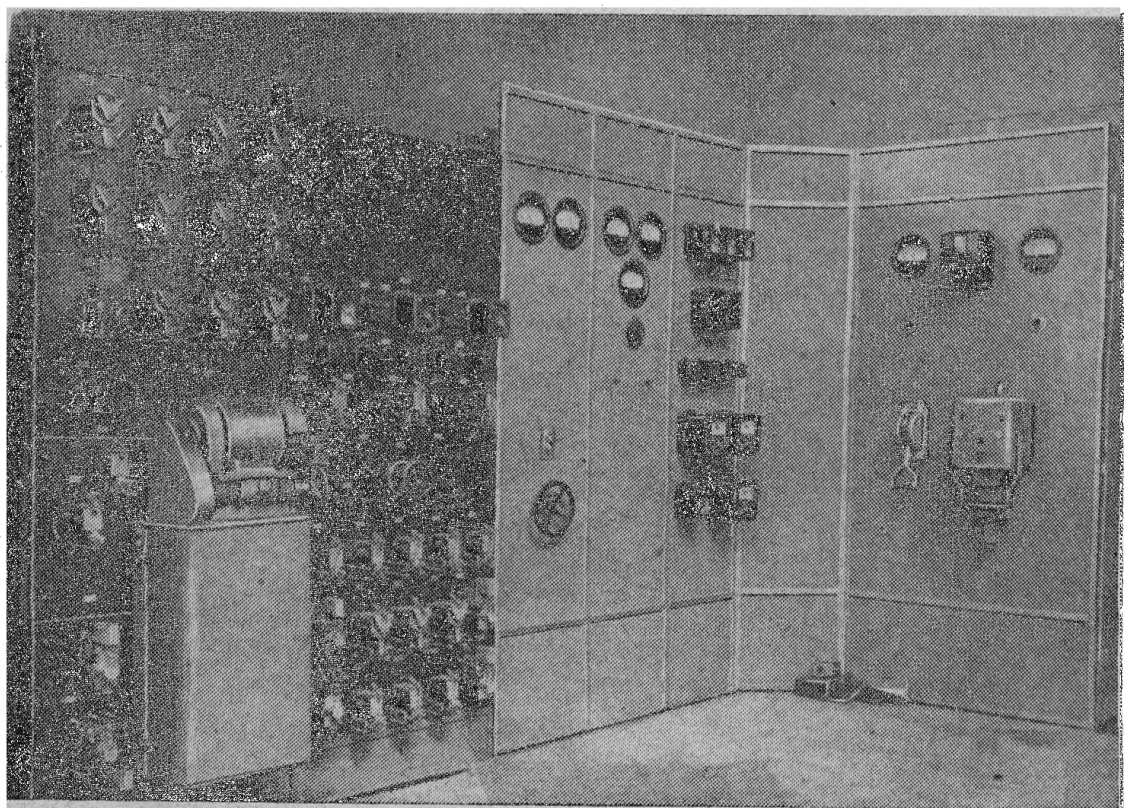
Испытание на износ на машине Шкода-Саввина диском 0,30 мм шириной 2,5 мм; груз 15 кг; продолжительность при 3000 об/мин.; охлаждение масляной эмульсией

№ вала	Износ в 10 мм ³	Примечание
61	6,89	Разность между износом неотпущенного вала и отпущенного составляет 0,09. Эта величина показывает не в пользу отпуска, хотя она и мала
470	6,98	





Фиг. 167. Схема автоматического управления станком для закалки коленчатых валов ХТЗ. Соединения показаны для одной шейки.



Фиг. 168. Панели пуска, управления и автоматики станка для коленчатых валов ХТЗ.

Таблица 36

Данные о закалке коленчатого вала ХТЗ

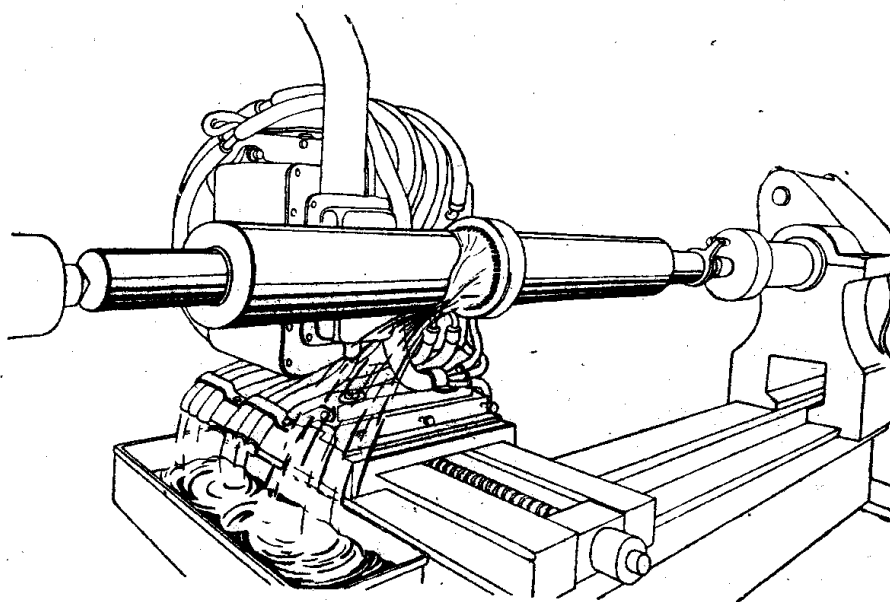
Основные данные	№№ шеек	
	1—8	9
Напряжение холостого хода, в	600	600
Ток при закалке, а	290/300/260	350/380/280
Время нагрева, сек.	6	7
Время охлаждения, сек.	6,5	7,5
Мощность генератора, квт	160/170/148	200/210/160

3. Последовательная закалка.

Цилиндрические поверхности большой длины

Закалка прокатных и правильных валков

Ввиду значительной поверхности одновременная закалка здесь невозможна. Для закалки с успехом можно применить частоту 2000 гц, при которой возможно в углеродистой стали получить глубину закаленного слоя 8—10 мм. Если требуется закалка на большую глубину и при диаметре вала более 200 мм, желательно понизить частоту до 500 гц, а при валках диаметром свыше 300 мм с успехом можно использовать 150 и даже 50 гц.



Фиг. 169. Устройство для закалки правильных валков в лаборатории ЛЭТИ.

Индуктор в этом случае может быть кольцевым (см. фиг. 124), а при желании получить возможно большую глубину закаленного слоя целесообразно увеличить ширину индуктора (см. фиг. 126). Нагретую

поверхность охлаждают водой, которая одновременно охлаждает также медь индуктора.

На фиг. 169 показано устройство для закалки правильных валов в лаборатории ЛЭТИ, причем закачивали и бочку и шейки вала. Для получения более равномерной закалки и избежания трещин вал вращается со скоростью 100—300 об/мин. Закалочный трансформатор установлен на супорте, имеющем продольное и поперечное движение. Данные о закалке валков приведены в табл. 37.

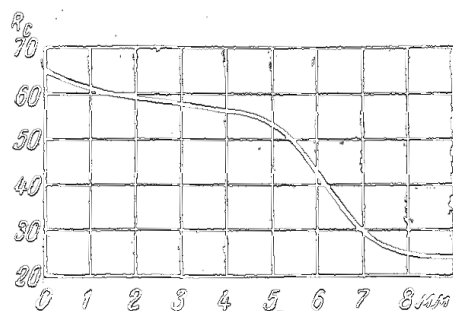
Таблица 37

Закалка правильных валков. Частота 2000 гц

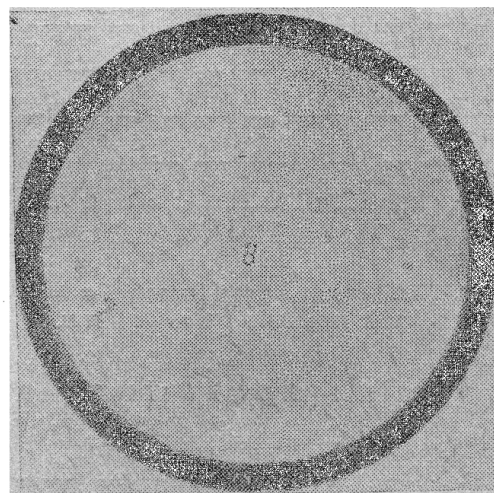
Наименование части вала	Диаметр d , мм	Глубина закаленного слоя x , мм	Скорость закалки (перемещения) индуктора v , см/сек	Мощность квт		Удельная мощн. от генератора на 1 см периферии P_2 , квт/см	Удельный расход энергии генератора от сети на 1 см ² , атч/см ²	Мощность кон- денсаторов P_c , квт
				сети P_2	генератора P_1			
Бочка	117	6,8	0,54	230	176	4,7	3,2	570
Шейка	61	7	0,54	158	114	5,9	4,2	485

На фиг. 170 показана кривая твердости, а на фиг. 171 — макрошлиф.

При закалке правильных валков значительной длины, например, имеющих размеры $d=117$ мм и $l=2500$ мм, наблюдается некоторая поводка, размеры которой приведены в табл. 38.



Фиг. 170. Кривая твердости правильных валков.



Фиг. 171. Макрошлиф правильного вала.

Таблица 38

Поводка при закалке правильных валков с размером бочки $d = 117$ мм, $l = 2090$ мм

№№ валков	1	2	3	4	5	6	7
Размер поводки, мм . .	1,5	0,5	0,3	0,3	0,7	0,4	1

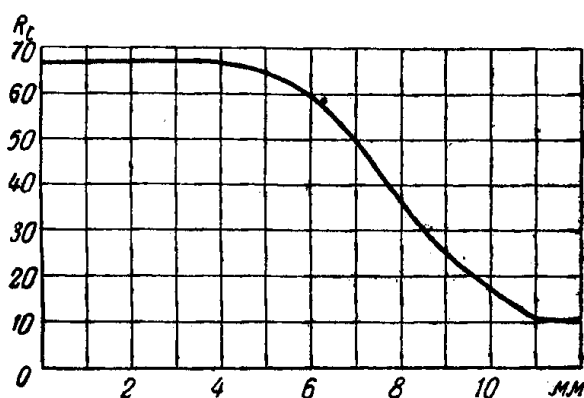
Помимо правильных валков, индукционным методом с успехом возможно калить валки для холодной прокатки. Этого рода валки закаливали в лаборатории автора для сталепрокатного завода им. Молотова (бывший «Красный гвоздильщик») в Ленинграде. Данные о режиме закалки этих валков приведены в табл. 39.

Таблица 39

Последовательная закалка прокатных валков холодной прокатки.
Частота 2000 гц

Диаметр мм	Глубина закаленного слоя общая по мартен- ситу x_k мм	Скорость закалки (пе- ремещения) индуктора v , см/сек	Мощность, квт		Удельная мощность от генератора на 1 см периферии p_8 , квт/см	Удельный расход энергии от сети и от генератора $втч/см^2$
			сети P_2	генератора P_1		
100	9/6	0,33	150	112	3,55	4/3
130	5/3	0,33	195	146	3,57	4/3
160	10/4,5	0,17	167	124	2,46	5,5/4,0

В результате закалки была получена поверхностная твердость около 67 R_c . Кривая твердости по глубине приведена на фиг. 172.



Фиг. 172. Кривая твердости валка холодной прокатки $d = 160$ мм.

Закаленные на указанном режиме валки были проверены в эксплуатации при холодной прокатке стальной ленты, содержащей 0,5—0,9% С; стойкость этих валков превосходила стойкость валков, закаленных обычным методом, в пять-шесть раз.

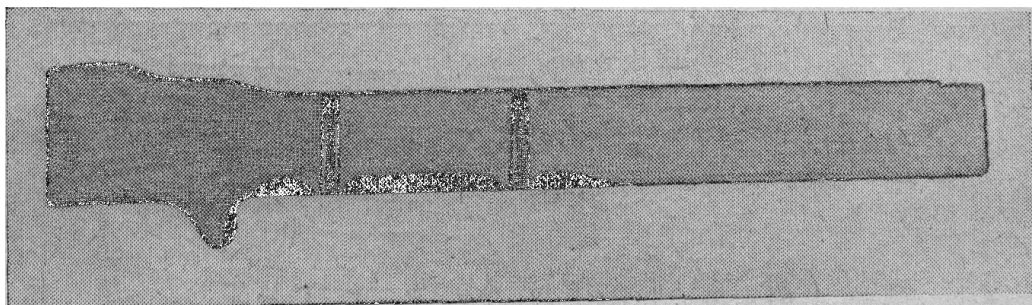
Стоимость закалки одного валка с площадью в 1500 см^2 при массовой закалке составляет около 5 руб.

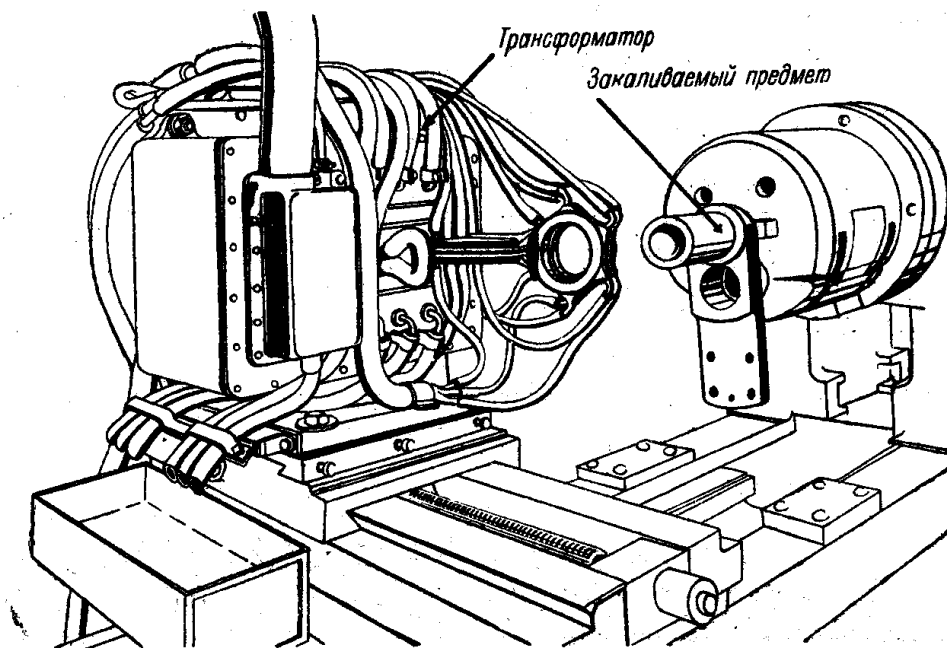
Шейка кривошипа двигателя при большой ее поверхности

В этом случае закалку можно производить лишь последовательным методом, подобно тому, как это указано для прокатных валков. Некоторой особенностью, затрудняющей здесь закалку, является наличие с одной стороны валка галтели, расстояние до которой от начала закаленного слоя должно быть невелико.

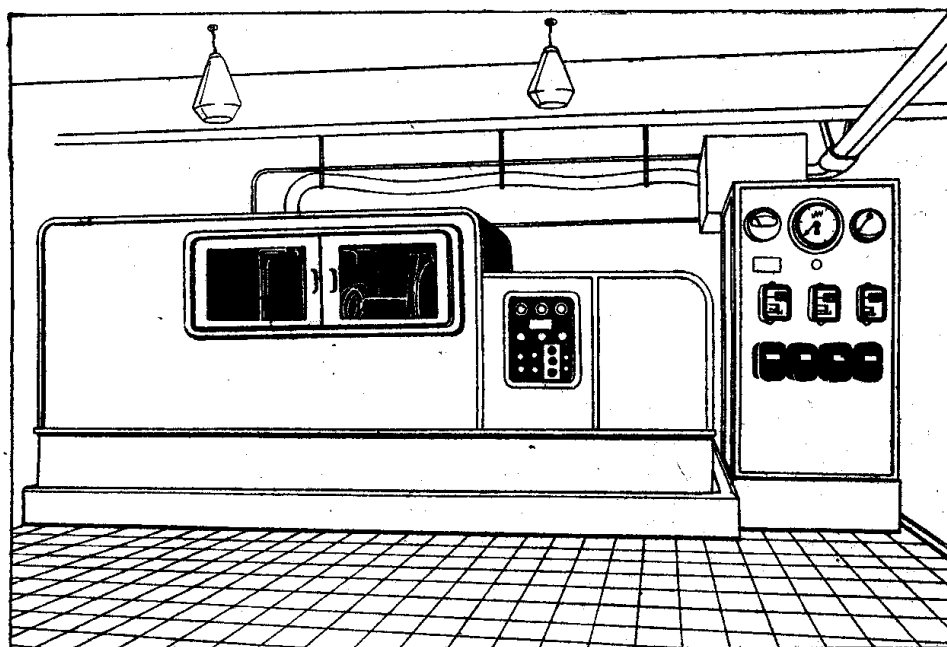
Поэтому индуктор изготавливают в виде точно обработанного узкого кольца с отверстиями для закалочной воды, которую, учитывая большую плотность тока, подают рядом параллельных подводов, как это показано на фиг. 125, где изображен подобный индуктор. Кроме того, индуктор снабжен кольцом с узкой (0,1 мм) щелью, через которую подают под давлением в 3 ат воздух, сдувающий закалочную воду.

При закалке индуктор устанавливают на расстоянии в 1—2 мм от галтели и включают в цепь индуктора закалочный ток, который вызывает нагрев кольцевой полосы шейки, непосредственно примыкаю-



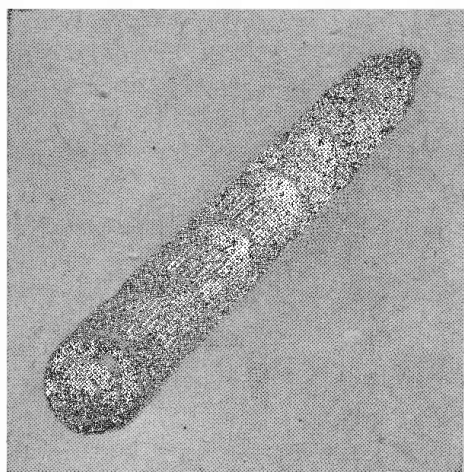


Фиг. 175. Устройство для последовательной закалки шейки кривошипа (кожух снят).

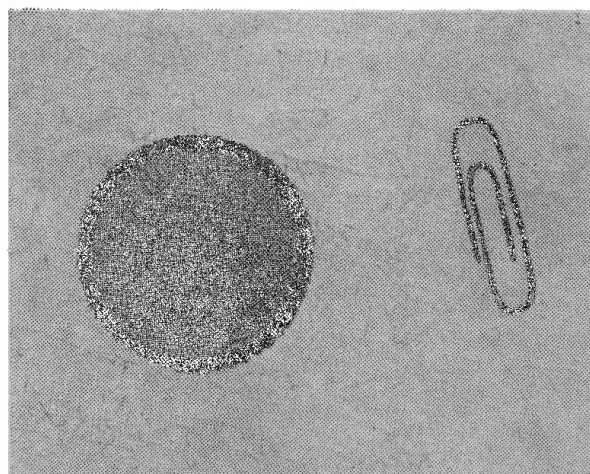


Фиг. 176. Устройство для последовательной закалки шейки кривошипа (с кожухом).

хом закаливать последовательным методом на радиочастотах. Если закалке подлежит поверхность не по всей длине, то ток периодически выключают при прохождении индуктора мимо незакаливаемых частей. Индуктор в этом случае делают простой формы в виде кольца с отверстиями для закалочной воды (см. фиг. 124). На фиг. 177 показан такой валик.



Фиг. 177. Рифленый валик.



Фиг. 178. Макрошлиф рифленого валика.

Данные о закалке валика диаметром 25 мм и длиной закаленной части 50 мм приведены в табл. 41.

Таблица 41

Последовательная закалка рифленых валиков.
Сталь 1045. Частота 300 000 гц ($\lambda = 1000$ м), $d = 2,5$ см

Глубина закаленного слоя x_k мм	Скорость перемещения v , см/сек	Удельная мощность на 1 см периферии квт/см ²	Удельный расход энергии на 1 см ² закаленного слоя вт·ч/см ²
2	2,5	15	1,8
1	2,5	9	1,05

Макрошлиф валика показан на фиг. 178.

Поводка валиков при описанной закалке составляет около 1—0,5 мм.

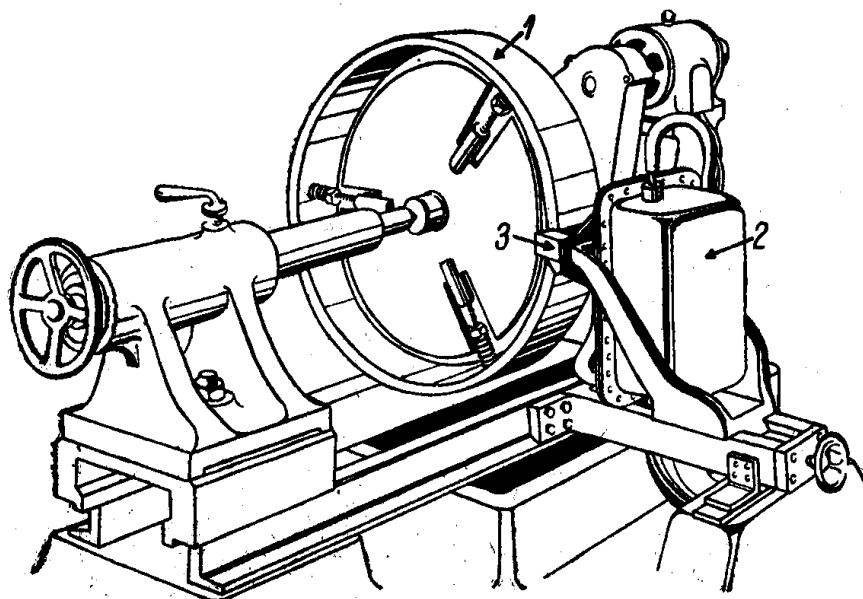
4. Цилиндрические поверхности весьма большого диаметра и малой высоты. Последовательная закалка

Закалку таких деталей лишь в редких случаях можно производить одновременным методом, так как поверхность, подлежащая закалке, велика. Поэтому приходится прибегать к последовательному методу, мирясь с наличием при этом отпускной полосы.

Бандаж тормозного барабана

Закалка ведется последовательным методом при вращении бандажей, а не при перемещении по образующей. Индуктором служит ин-

дуктор, предназначенный в основном для закалки плоских предметов (см. фиг. 107), установленный на супорте под углом 30° к образующей цилиндра.



Фиг. 179. Устройство для закалки тормозных бандажей.

1—бандаж; 2—закалочный трансформатор; 3—индуктор.

Подобного рода устройство показано на фиг. 179. Бандаж приводится в медленное вращение. В случае широких барабанов закалку можно вести в виде спиральной ленты, если, кроме вращательного движения барабана, сообщить также поступательное движение супорту, на котором установлен индуктор и закалочный трансформатор. В этом случае между закаленными лентами от каждого прохода необходимо оставить незакаленную полоску в 5—10 мм, чтобы избежать здесь трещин. В табл. 42 приведены данные о закалке бандажей.

Таблица 42

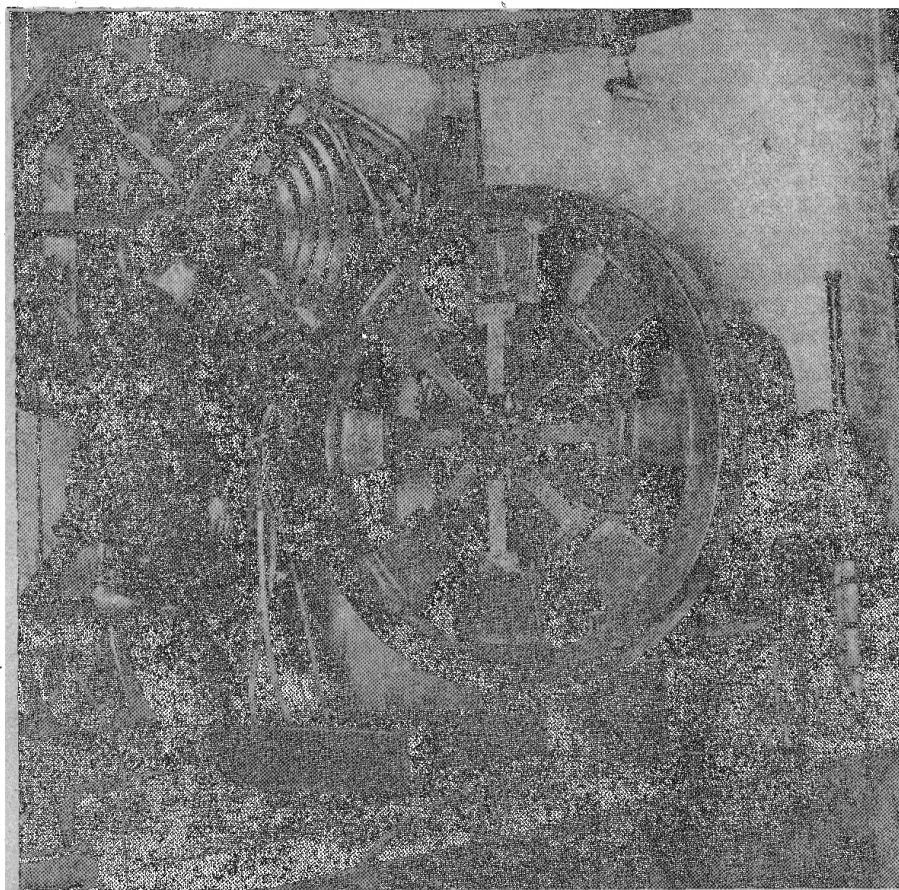
Последовательная закалка бандажей; $d = 666$ мм, $b = 90$ мм
Частота 2000 гц

Глубина закаленного слоя x_k , мм	Скорость v см/сек	Мощность, квт		Удельная мощность на 1 см периферии p'_2 , квт/см	Удельный расход энергии из сети w_2 втч/см ²	Мощность конденсаторов P_c ква
		сети P_2	генератора P_1			
4	0,5	80	60	6,7	4,9	260

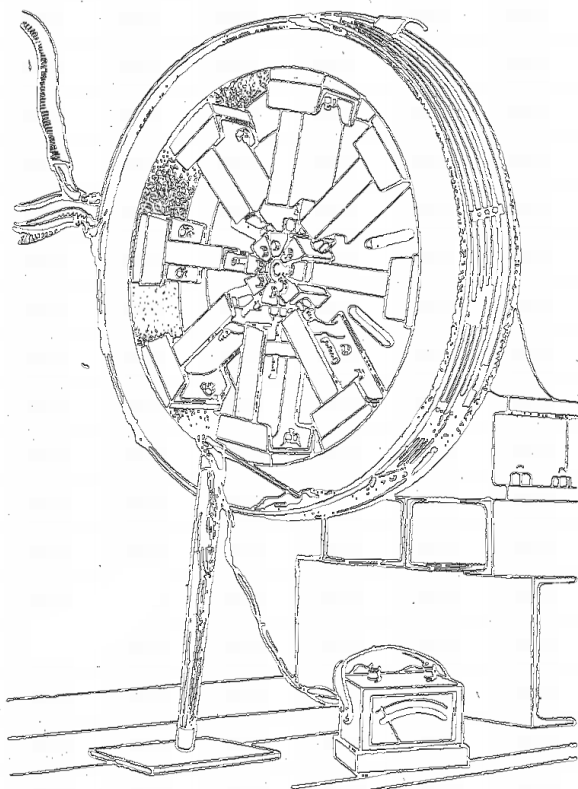
Паровозные бандажы

Закалка паровозных бандажей представляет большую народно-хозяйственную задачу. Закалка даст возможность во много раз увеличить пробег бандажей.

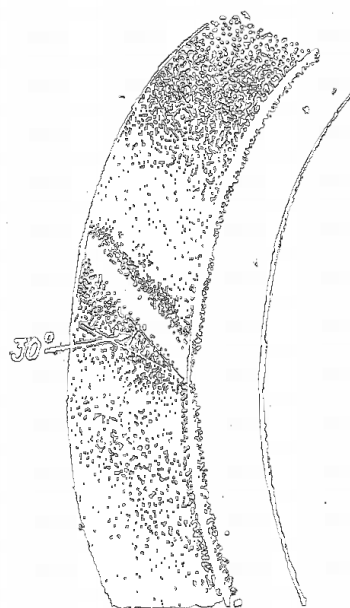
Попытки поверхностной закалки бандажей контактным методом не дали результата. В 1941 г. лаборатория автора при участии НИИЖТ НКПС (в лице инж. А. С. Маханек) произвела закалку опытной партии бандажей паровоза ФД и тендера.



Фиг. 180. Опытная установка для закалки паровозных бандажей.



Фиг. 181. Многовитковый индуктор для отпуска бандажей одновременным методом.



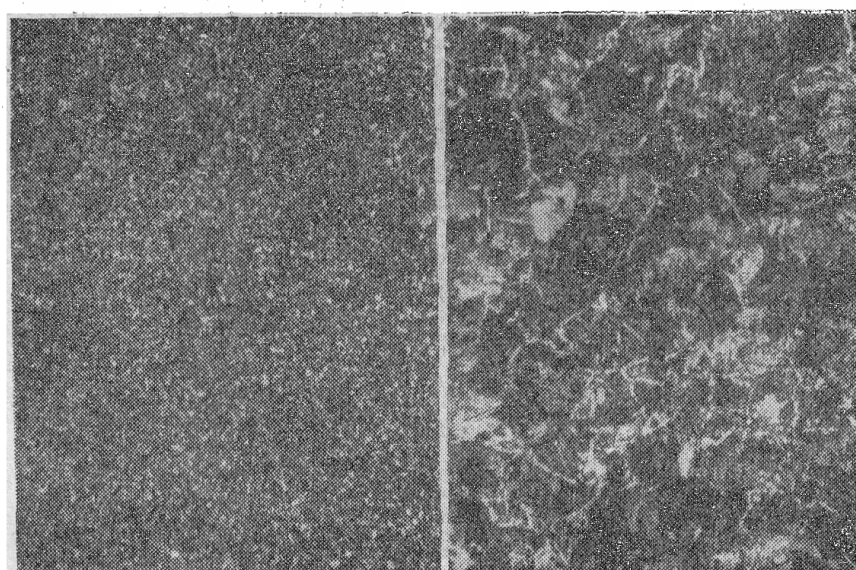
Фиг. 182. Начало и конец закалки бандажа.

Закалку производили на частоте 2000 гц последовательным методом. Опытная установка в лаборатории показана на фиг. 180. После закалки бандажи отпускали одновременным методом при помощи многовиткового индуктора (фиг. 181).

Ввиду достаточно большого напряжения на индукторе при данных его размерах отпуск производили непосредственно от генераторов 2000 гц, не применяя трансформатора.

Так как при последовательной закалке получается отпускная полоса в месте начала и конца закалки (фиг. 182), то было бы желательно производить закалку одновременно, для чего годился бы тот же индуктор, который применяли для отпуска. Однако применению одновременной закалки препятствует необходимая для этого значительная мощность, достигающая 1500 квт; правда, при этом будет достигнута громадная производительность (30 бандажей в час).

Возможно, что при одновременной закалке в этом случае было бы целесообразно применять не 2000 гц, а 50 или 150 гц.



а

б

Фиг. 183. Микроструктура бандажа. $\times 100$.

а—закаленная часть; б—незакаленная часть.

Даже при закалке последовательным методом понижение частоты до 500 гц не только не встречает возражений, но, возможно, даст лучший результат.

Данные об опытной закалке и отпуске следующие:

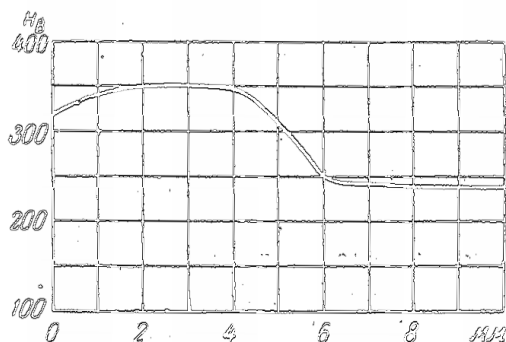
Закалка

диаметр бандажа	1500 мм
ширина	150 мм
глубина закаленного слоя	6 мм
скорость	1 см/сек
мощность от сети	28 квт
мощность от генератора	21 квт
удельная мощность из сети на 1 см ширины	1,86 квт/см
удельный расход энергии из сети	5 квт/1000 см ²

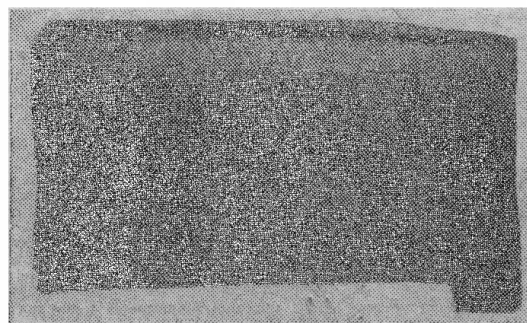
Отпуск

температура поверхности	550°
время нагрева	16 мин.
мощность от сети	174 кВт
мощность от генератора	128 кВт
расход энергии на 1 бандаж	46,3 кВт-ч
число витков индуктора	6

Закаленные и отпущенные бандажи были подвергнуты копровому испытанию. Полученные результаты приведены в табл. 43, причем закаленные бандажи показали высокую прочность.



Фиг. 184. Кривая твердости.



Фиг. 185. Макрошлиф паровозного бандажа.

Таблица 43

Сравнительные результаты копровых испытаний незакаленных и закаленных бандажей

Бандаж		Высота подъема, м	Характер обработки	Результат		Химический состав, %	
Тип ФД	М			число ударов	общий прогиб мм	С	Mn
Ведущий	38238	6,7	Нормальные бандажи после механической обработки	Сломался на 1-м ударе	0	0,715	0,82
Тендер	38949	4,4		Сломался на 4-м ударе	40	0,68	0,76
Тендер	34826	4,4		Сломался на 2-м ударе	19	0,61	0,72
Сцепной	38170	6,7		Сломался на 1-м ударе	0	0,60	0,63
Сцепной	38161	6,7		Сломался на 1-м ударе	0	—	—
Ведущий	33055	6,7	Опытные бандажи, закаленные индукционным методом	22	188	0,74	0,8
Тендер	36600	4,4		14	90	0,59	0,68
Тендер	26475	4,4		14	89	0,74	0,88
Тендер	36804	4,4		11	89	0,59	0,68

На фиг. 183 показаны микроструктуры закаленной и незакаленной частей бандажа, на фиг. 184 — кривая твердости, а на фиг. 185 — макрошлиф.

5. Закалка внутренних цилиндрических поверхностей

Закалка этого рода поверхностей представляет более трудную задачу, чем наружных и плоских.

Одновременная закалка внутренней поверхности роликового или шарикового подшипника небольшого диаметра

Здесь представляет трудность получить на внутренней поверхности достаточно высокую плотность мощности, необходимую для нагрева закаливаемого слоя в течение 1—2 сек. до достаточно высокой температуры. При нагреве же в течение большего времени легко получается сплошной нагрев. С другой стороны, кратковременный нагрев до недостаточно высокой температуры не дает полного растворения карбидов в стали марки ШХ-10, о которой здесь идет речь.

Эти противоречивые требования разрешены пока лишь частично для отверстий диаметром не менее 40 мм.

Правда, закалка колец большего диаметра представляет еще больший интерес; однако здесь требуется устанавливать весьма большие мощности.

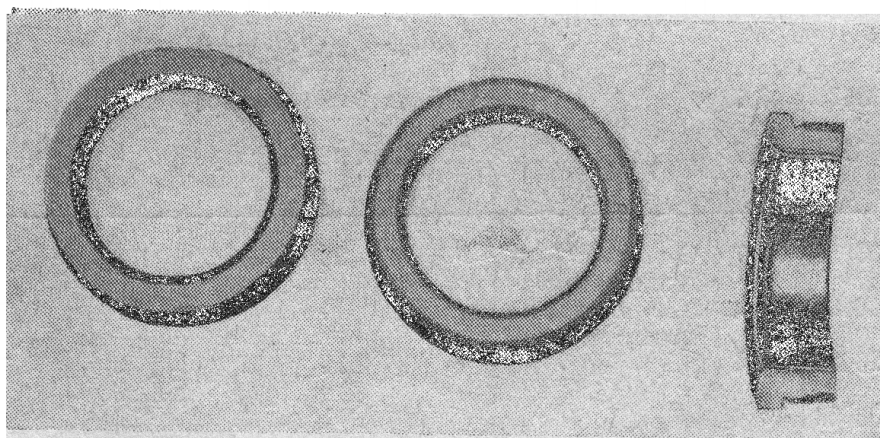
Для закалки при малом диаметре применяют радиочастоты ($\lambda \approx 1000$ м). Индуктор для закалки показан на фиг. 131.

В табл. 44 приведены данные последовательной закалки внутренней d_1 и наружной d_2 поверхностей кольца.

Таблица 44

Последовательная закалка колец шарикоподшипника на радиочастоте
($\lambda = 1000$ м)

Поверхность	Размеры, мм		Глубина закален- ного слоя x_n , мм	Скорость v см/сек	Мощность, кет		Удельная энергия из сети $\frac{W_2}{\text{см}^2/\text{сек}^2}$
	ширина	диаметр			анод	сеть	
Внутренняя	35	78	1,6	0,4	110	115	3,26
Наружная	35	90	1,6	0,5	100	105	2,26

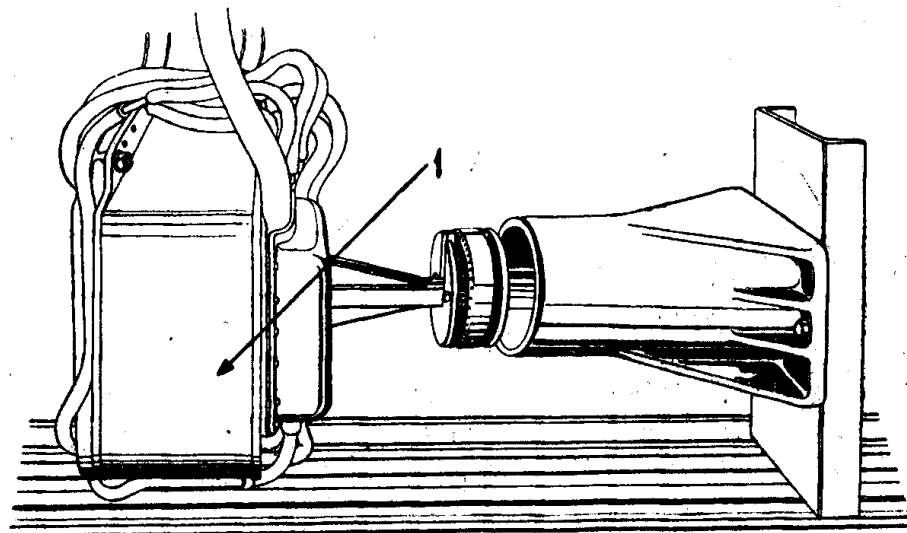


Фиг. 186. Макрошлифы кольца роликового подшипника.

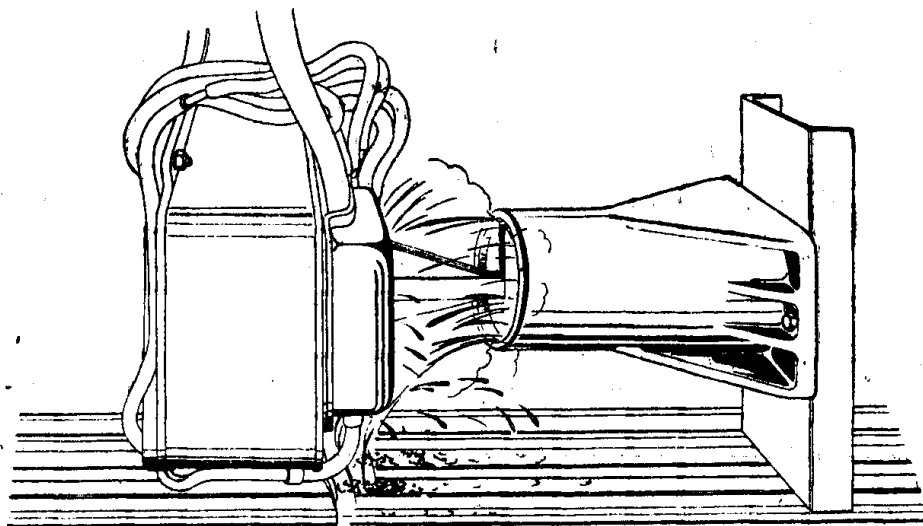
На фиг. 186 изображены макрошлифы кольца из стали марки ШХ. Метод еще не внедрен в промышленность.

Последовательная закалка внутренних цилиндрических поверхностей значительного диаметра

В качестве примера рассмотрим закалку поверхности стакана автосцепки. С увеличением диаметра облегчается осуществление нужной связи между индуктором и нагреваемой поверхностью. Применяя



a

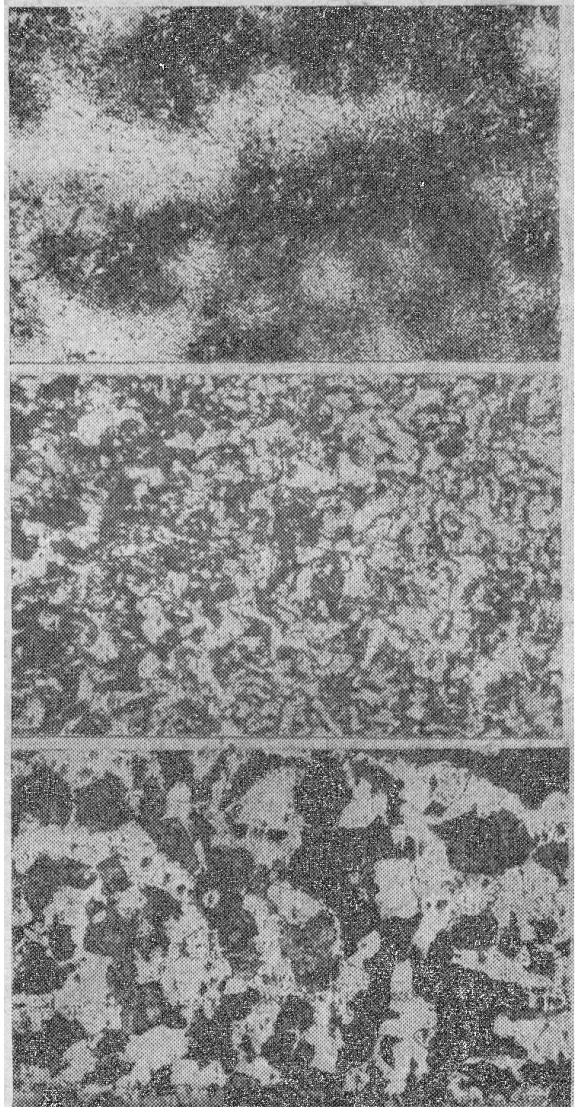
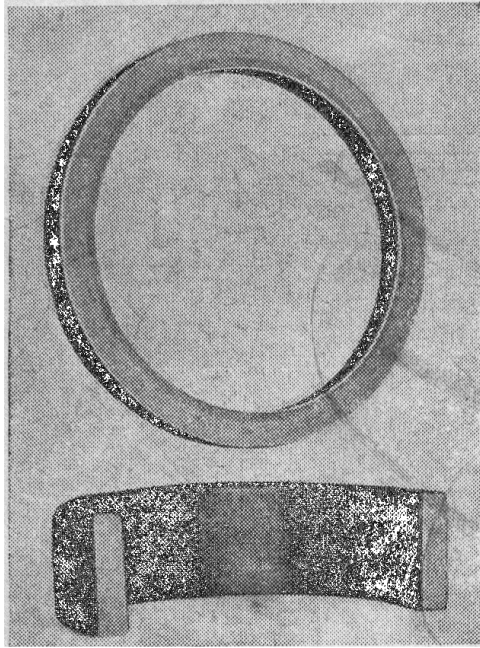


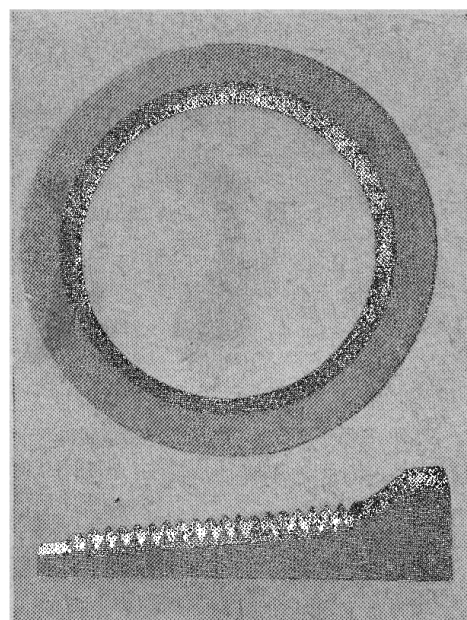
b

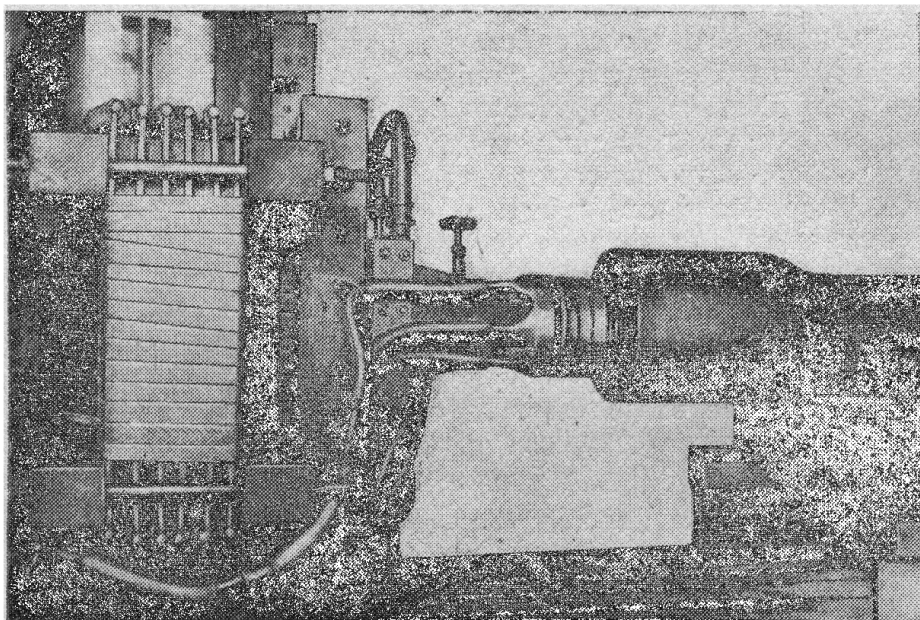
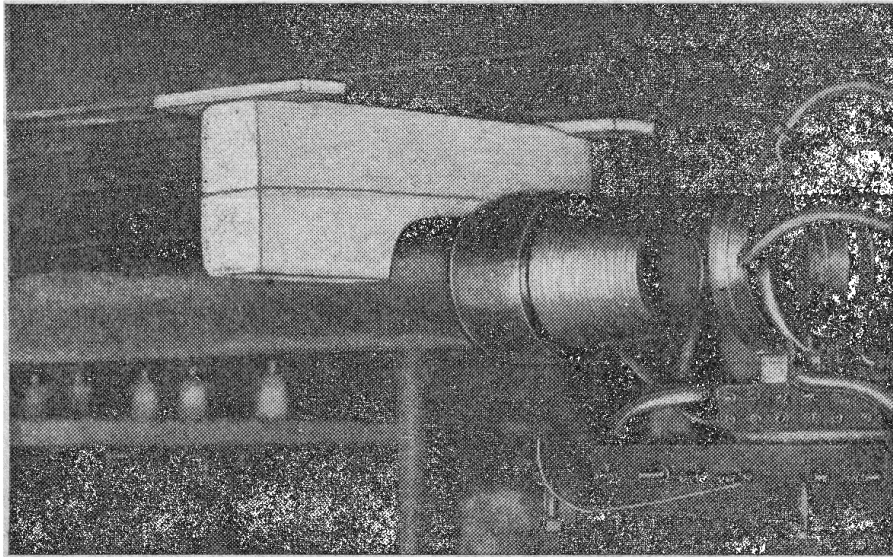
Фиг. 187. Закалка внутренней поверхности стакана автосцепки.

1—трансформатор, *a*—индуктор вне стакана, до начала закалки; *b*—индуктор во время закалки.

здесь железную магнитную цепь, возможно даже вести закалку на частоте 2000 гц. Значительная поверхность заставляет вести закалку последовательным методом.







Подобные детали надо закаливать последовательным методом, поэтому здесь приведены данные, относящиеся к этого рода закалке.

Основную трудность представляет получение требуемой конфигурации закаленного слоя на сходе и находе. В данном случае необходимо достигнуть достаточной глубины закаленного слоя на конце рельса, без перегрева угла.

Индуктор

В этом случае применяют индуктор с железом и с небольшой шириной меди (см. фиг. 138), что дает возможность получить требуемую конфигурацию закаленного слоя. Охлаждающей средой может быть и вода и воздух.

Частота

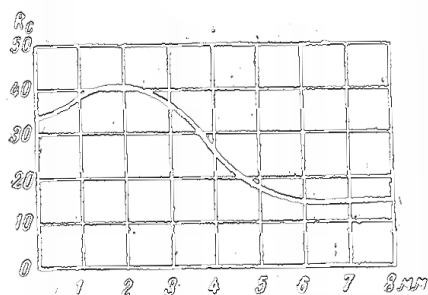
Можно думать, что при требуемой глубине закаленного слоя в 5—6 мм оптимальной частотой будет 2000 гц. Радиочастоты, обладающие малой глубиной проникновения, мало пригодны. Понижение частоты до 500 гц, вероятно, вполне приемлемо.

Данные об опытной закалке рельсов в лаборатории ЛЭТИ приведены в табл. 47.

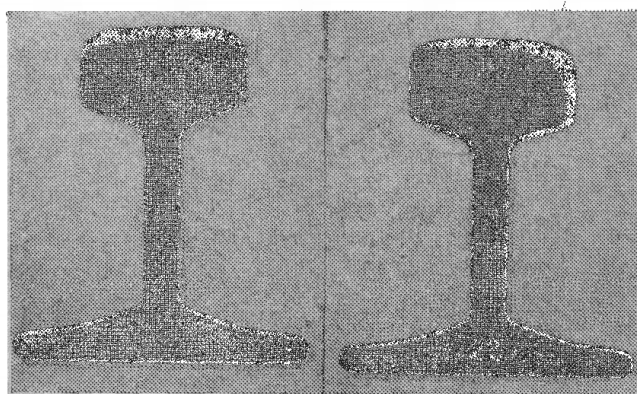
Таблица 47

Закалка концов рельса. Длина закаленной части 200 мм; частота 2000 гц.
Сталь мартеновская. Закалка вдоль рельса

Образец №	Мощность, <i>квт</i>		Глубина закаленного слоя x_k , <i>см</i>	Скорость перемещения закаливающего индуктора v , <i>см/сек</i>	Расход энергии, потребляемой из сети на закалку		Время, необходимое на закалку одного рельса с двух концов сек.
	сети P_2	генератора P_1			на 1 $см^2$ $втч/см^2$	на 1 пог. м рельса $квтч/м$	
369	73	55	0,4	0,5	5	3,86	80
375	32	24	0,55	0,2	5,5	4,28	200



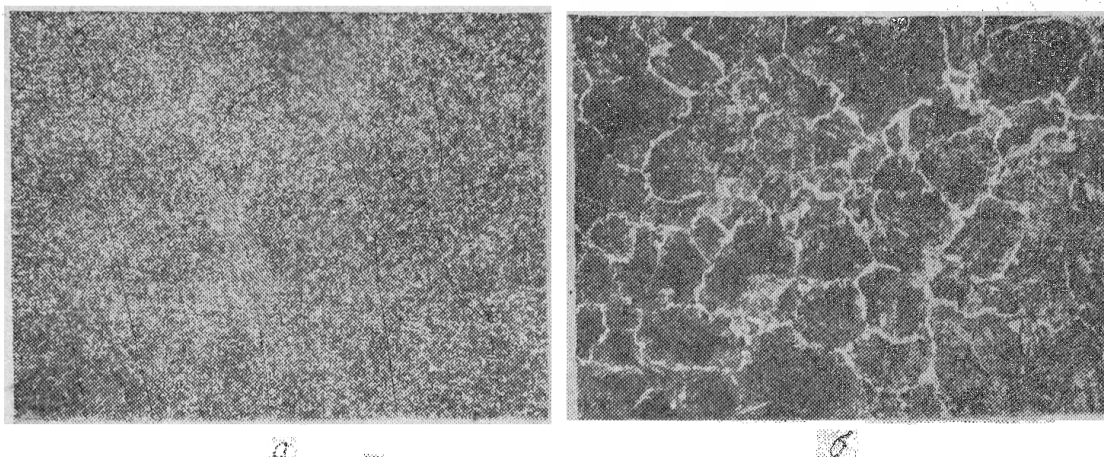
Фиг. 193. Кривая твердости рельса.



Фиг. 194. Макрошлифы рельса.

Результаты, полученные при опытной закалке, показаны на фиг. 193—195. Этот метод обеспечивает полную равномерность зака-

ленного слоя при требуемой его конфигурации. Стоимость закалки характеризуется следующими данными:



Фиг. 195. Микроструктура мартеновского рельса. $\times 100$.

а—закаленная и отпущенная часть; *б*—незакаленная часть.

Закалка двух концов длиной 200 мм каждый

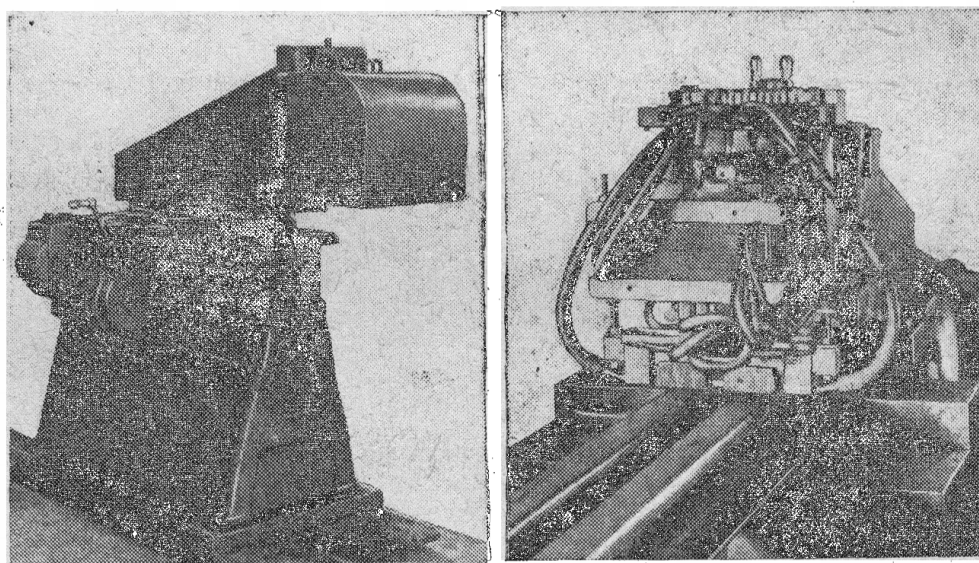
электроэнергия	25 коп.
амортизация	10 коп.
рабочая сила и накладные расходы	15 коп.

Всего 50 коп.

Закалка 1 пог. м на глубину 5 мм

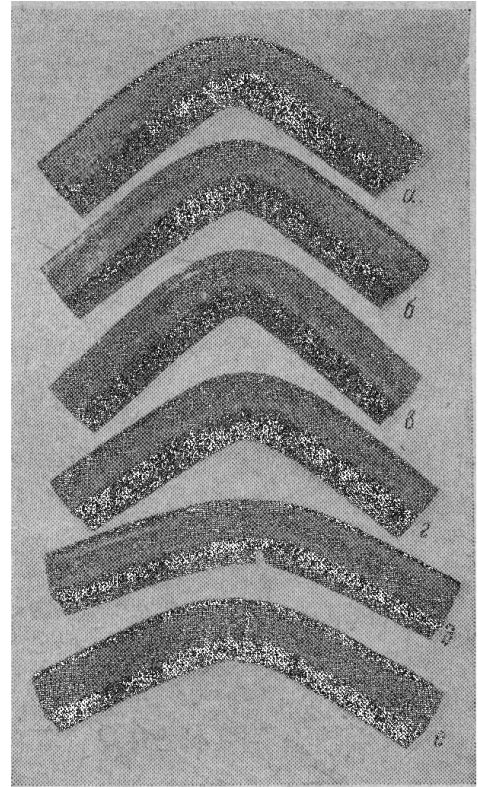
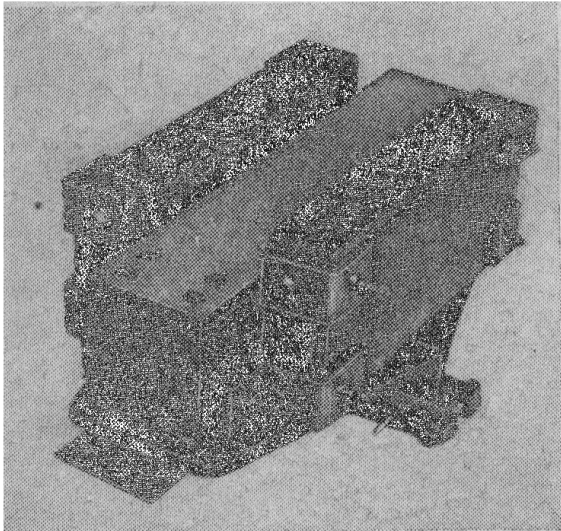
электроэнергия (4 кВт-ч)	40 коп.
амортизация	15 коп.
рабочая сила и накладные расходы	15 коп.

Всего 70 коп.



Фиг. 196. Станок для закалки рельсов, изготовленный для Кузнецкого завода. Система лаборатории автора.

а—вид сбоку; *б*—головка со снятым кожухом и индуктором для закалки двух рельсов.



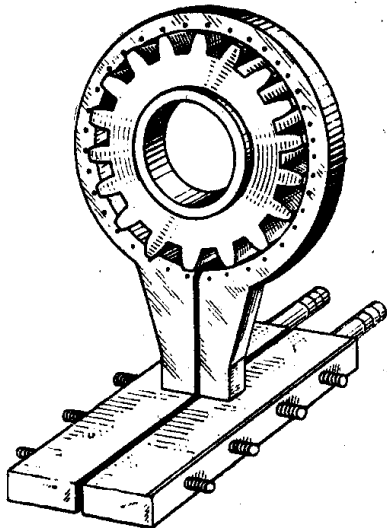
Закалка цилиндрических шестерен диаметром около 100 мм модуля 3,5

Если закаленный слой может иметь форму, показанную на фиг. 82, то закалку с успехом можно вести на радиочастоте любого высокого диапазона, так как в этом случае можно принять, что выделение тепла происходит на поверхности. При коротком времени нагрева конфигурация закаленного слоя будет соответствовать фиг. 82,а, а при длительном — фиг. 82,б. Получить закаленный слой в виде равномерной полосы по всей периферии при этом невозможно ни при каких условиях.

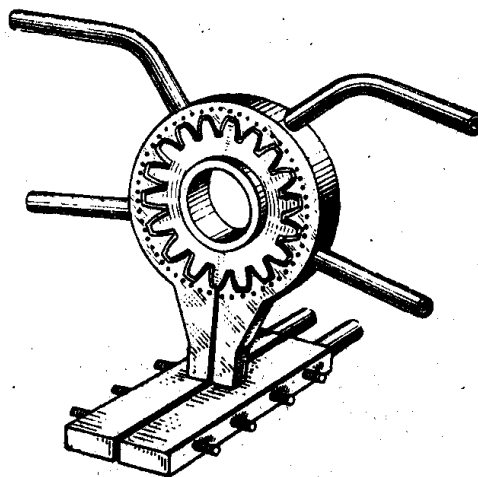
Если, однако, это требование поставлено, то необходимо выбрать частоту, удовлетворяющую условию, данному уравнением (VI, 32). Для модуля 3,5 эта частота будет составлять $10-50 \cdot 10^3$ гц. При закалке на этой частоте конфигурация закаленного слоя будет соответствовать фиг. 83а. Если же частота будет значительно меньше, чем это дано уравнением (VI, 32), то получится закаленный слой, показанный на фиг. 83,а,б.

При достаточно мощной установке целесообразно проводить закалку одновременным методом. При большой поверхности или недостаточной мощности с успехом можно вести последовательную закалку, хотя она требует более сложных включающих устройств; установку труднее обслуживать и труднее подбирать режим.

В качестве индуктора для одновременной закалки можно применять простой кольцевой индуктор (см. фиг. 122), а для последовательной — индуктор, показанный на фиг. 199.



Фиг. 199. Простой кольцевой индуктор для закалки шестерен.



Фиг. 200. Фасонный индуктор для закалки шестерни.

Предложенный автором фасонный индуктор (фиг. 200) хотя дает лучшие к. п. д. и коэффициент мощности, однако значительно сложнее в изготовлении, поэтому его можно рекомендовать лишь при массовой закалке.

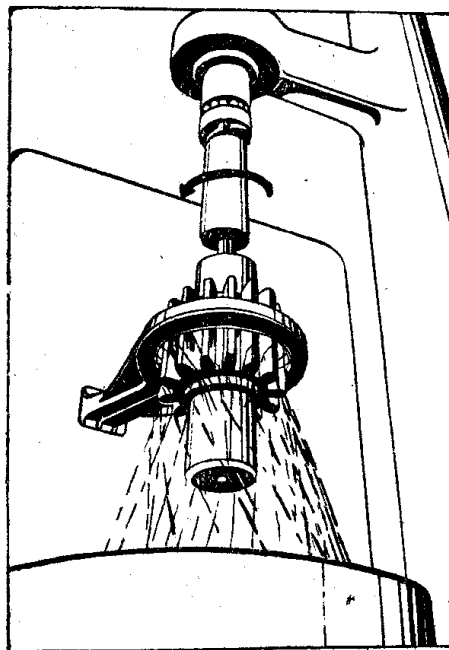
На фиг. 201 показана закалка шестерен последовательным методом.

Данные о последовательной закалке шестерни $d=73$ мм, $b=20$ мм, $M=3,5$ из стали 1045, $z=18$ при частоте $300 \cdot 10^3$ гц следующие:

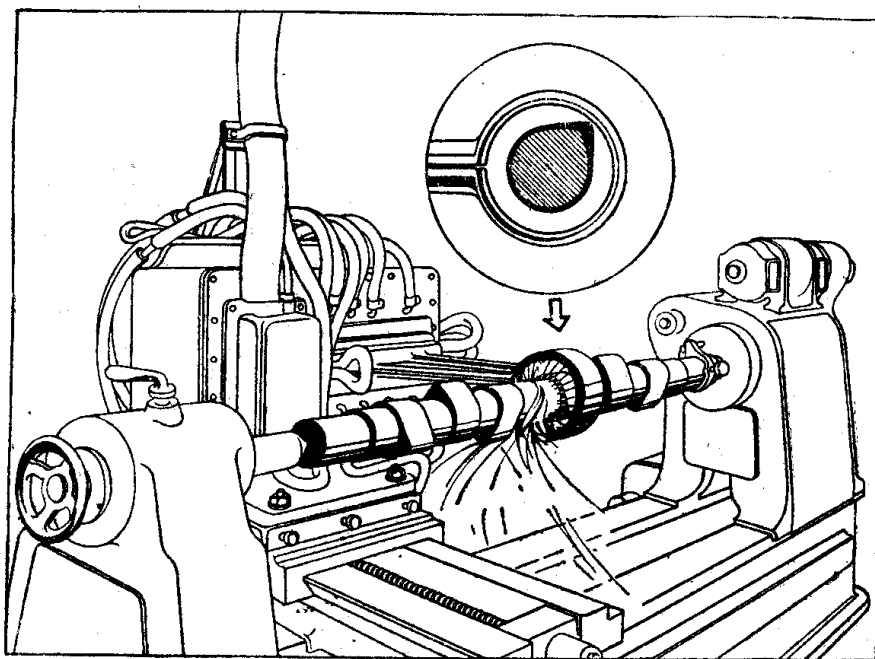
глубина закаленного слоя . 0,5—1 мм
 скорость перемещения шестерни 10 мм/сек.
 удельная мощность (на 1 см периферии венца); сеть, анод, колебательный 6/4/3 квт/см
 удельный расход энергии на 1 см² закаленного слоя; сеть, анод, колебательный 2/1,5/1 втч/см²

Закалка кулачкового валика

Кулачки в части, подлежащей закалке, имеют поверхность, которую можно упрощенно считать состоящей из цилиндрической поверхности значительного радиуса r_1 , другой цилиндрической поверхности малого радиуса r_2 и небольшой плоской части.

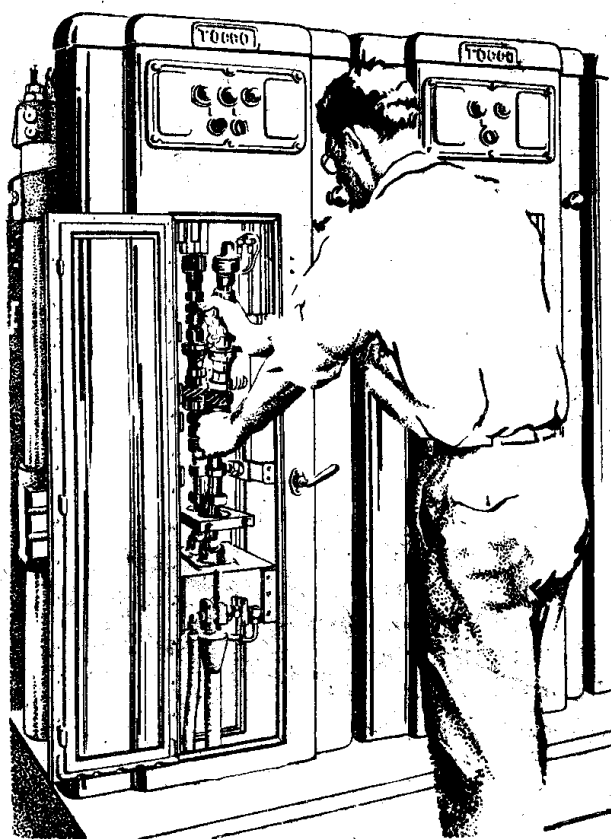


Фиг. 201. Последовательная закалка шестерни малого модуля.

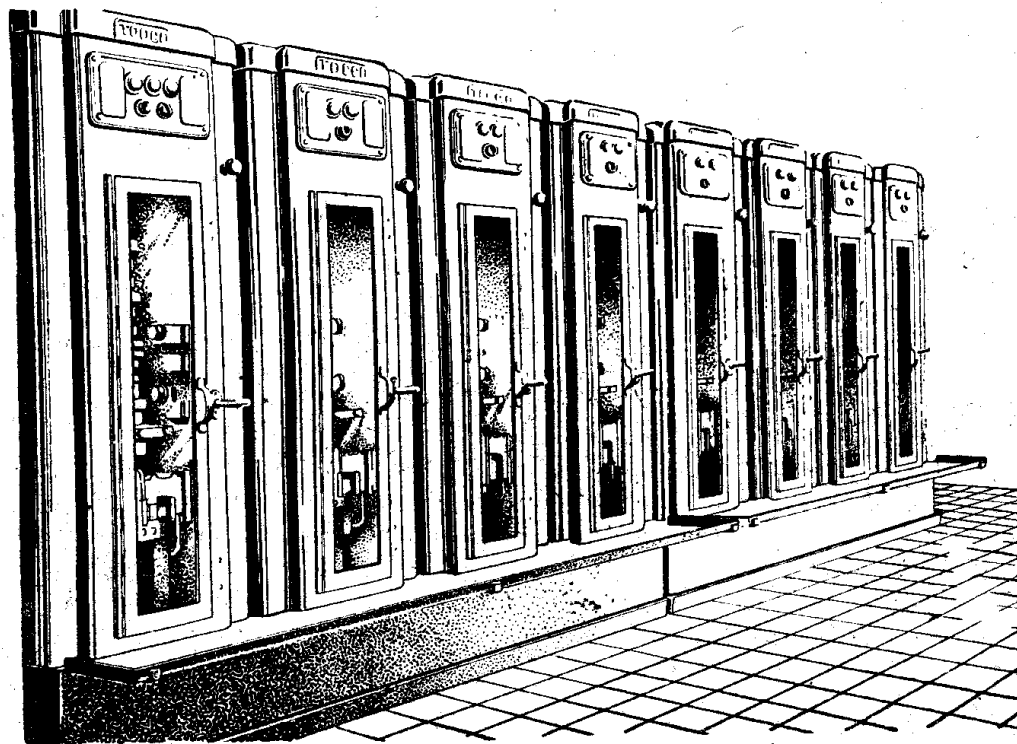


Фиг. 202. Станок упрощенного типа для закалки кулачкового валика.

Если пользоваться данными, приведенными в главе VI, п. 5 для закалки поверхности, состоящей из двух цилиндров разной кривизны, и подобрать частоту, согласно уравнению (VI, 29), то возможно при этой частоте получить закалку с равномерной толщиной закаленного слоя, как это показано на фиг. 81,в. Если же каить тот же кулачок на радиочастоте, то на требуемую глубину закалиется лишь часть с



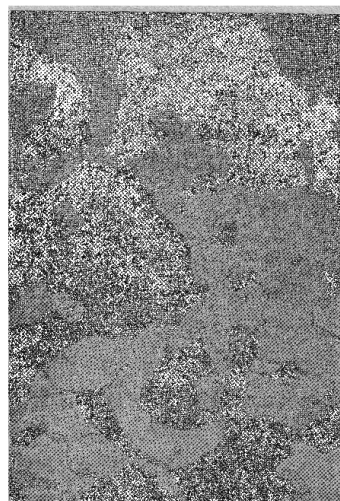
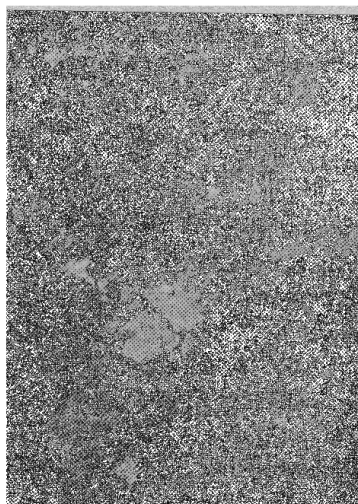
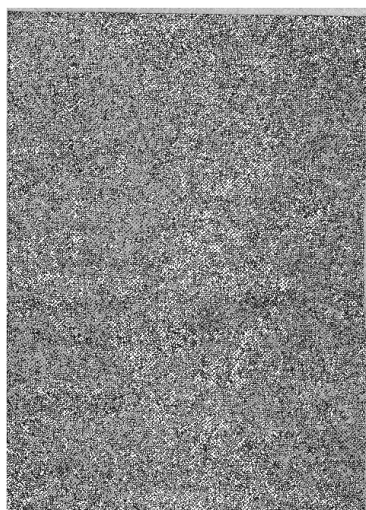
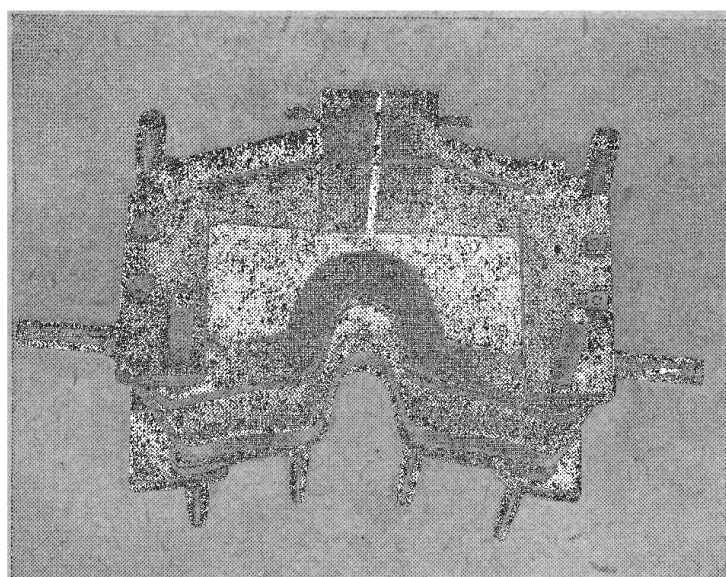
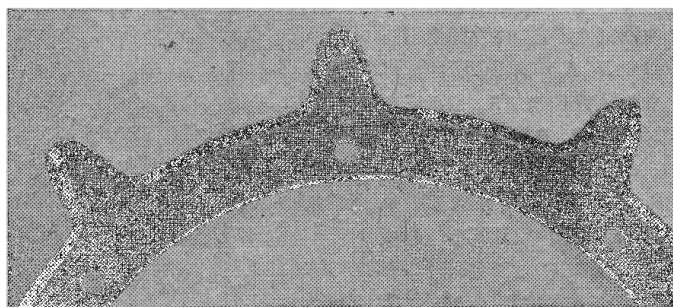
a

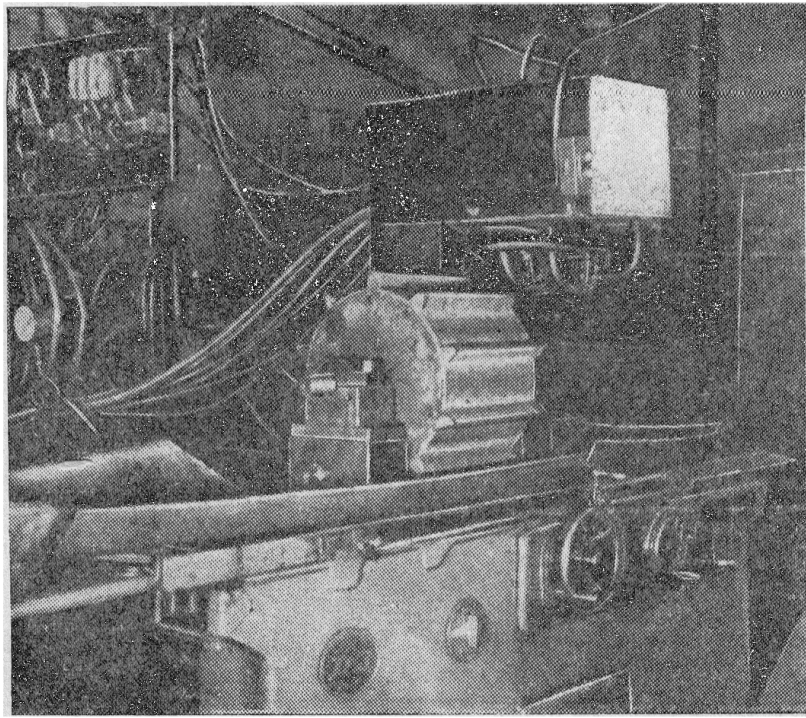


б

Фиг. 203. Автомат фирмы Токко для закалки кулачкового валика.

a—закладка валика; *б*—общий вид автомата.





с железом (фиг. 205). Микроструктура закаленной и незакаленной частей звездчатки показана на фиг. 206, а станок для закалки — на фиг. 207.

Данные о режиме закалки этих звездчаток, содержащих 0,45% С, при частоте 2000 гц, следующие:

глубина закаленного слоя	6 мм
скорость закалки	2,4 см/сек
напряжение генератора	1200 в
сила тока генератора	74 а
сила тока контура	590 а
мощность:	
от сети	113 квт
от генератора	85 квт
cos φ на зажимах трансформатора	0,12

8. Закалка инструмента

Ввиду сложности формы закаливаемой поверхности закалка инструмента представляет в некоторых случаях достаточно сложную задачу, решаемую при помощи одного или нескольких изложенных выше методов. Приведем несколько примеров.

Закалка сверл

Учитывая, что при заточке сверла требуется, чтобы сердцевина была закалена, сверла подвергают сплошной закалке, за исключением хвостовой части. Поэтому частота здесь играет меньшую роль. Сверла малых диаметров (до 20 мм) закаливают преимущественно на радиочастоте. При диаметрах же выше 20 мм целесообразно применять чисто звуковой диапазон, в частности 2000 гц, и еще лучше 5000—8000 гц.

Нагрев ведут при небольших плотностях мощности (примерно 1 квт/см²) с выравниванием температуры теплопроводностью; время нагрева выбирают сравнительно значительным.

Если закалку вести при большой плотности мощности, то в зависимости от выбранной частоты нагреется и закалится та или другая часть сверла. При радиочастоте получится закалка внутренней части, а при акустической частоте — наружной. Это вытекает из того, что сечение сверла можно представлять в виде трех кругов: двух большого радиуса, благоприятного для нагрева пониженной частотой, и одного (среднего) — малого радиуса, благоприятного для нагрева высокой частотой. Это пояснение может быть полезным при рассмотрении условий закалки инструмента, имеющего сложное сечение. При малых удельных мощностях, которые обычно применяют, и при радиочастоте получается сплошная закалка сверла.

Закалка метчиков

У метчиков достаточно закаливать лишь поверхности на небольшую глубину; поэтому с успехом можно использовать радиочастоту, тем более, что необходимо обеспечить нагрев острых углов.

9. Местная закалка

Во многих случаях к поверхностной закалке предъявляют требование создать закаленную поверхность лишь на строго определенных местах. Такая закалка часто представляет трудности, обусловленные тем, что для получения закаленного слоя в тех или других местах необходимо сосредоточить определенную плотность тока. Плотность тока зависит в свою очередь от распределения магнитного потока, управление которым очень ограничено, если магнитный поток идет по воздуху.

Несколько большие возможности дает применение железных расчленимых магнитопроводов, позволяющих получать лучшую концентрацию магнитного потока и тока в нагреваемой поверхности. Выше был описан и показан (см. фиг. 138) индуктор, позволяющий получать нагрев в виде узкого прямоугольника. Изменяя ширину провода индуктора и форму башмаков железной магнитной цепи, можно нагревать поверхности, несколько отличающиеся от формы, изображенной на фиг. 139.

Во всех этих случаях целесообразно пользоваться описанными выше индукторами. Применяя цилиндрические кольцевые индукторы, можно получить местный нагрев и закалку, снабжая часть кольца индуктора железным магнитопроводом такой же формы, как это показано на фиг. 138.

В тех частях, где находится железо, будут осуществлены большая связь, большая плотность тока и будет происходить закалка, тогда как в других частях меньшая плотность не даст должной температуры, и закалки не произойдет. Необходимо помнить, что увеличение плотности тока оказывает большое влияние, так как выделяемая мощность, а следовательно, и температура зависят от I^2R . Поэтому всегда при спадании плотности тока получается гораздо более резкое спадание температуры и более резкое ограничение закаленной поверхности.

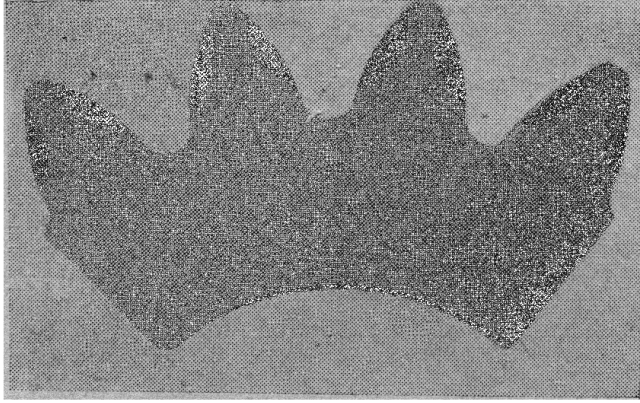
Метод местной закалки можно иллюстрировать примером закалки шестерен большого модуля.

Местная закалка шестерен большого модуля

В случае закалки шестерен большого модуля одновременная закалка всей шестерни кольцевым индуктором невозможна даже при последовательном методе, так как необходимо применять очень большие мощности вследствие того, что сложная форма зуба при сравнительно малом радиусе кривизны на его конце не допускает медленного нагрева при небольшой плотности мощности. Необходимая в данном случае удельная плотность составляет около 3 квт/см^2 . Таким образом шестерня диаметром около 200 мм потребует около 1200 квт. Помимо этого, конструкторы часто требуют оставлять некоторые части зуба незакаленными, в частности, конец его.

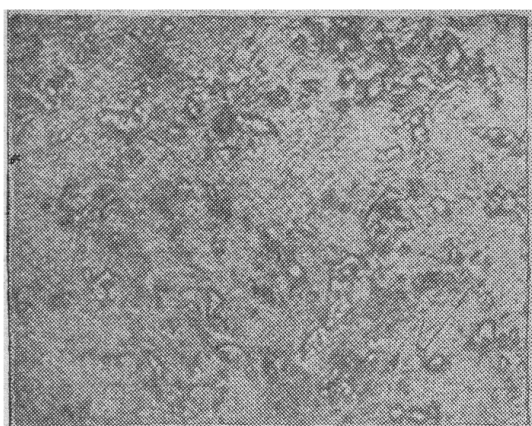
Типичная форма для закалки зуба крупного модуля показана на фиг. 208. Для получения закаленного слоя такой формы невозможно применять индуктор в виде петли или зигзага без железа, так как нельзя будет обеспечить равномерную закалку, и, кроме того, создастся перегрев угла в точке 1 (фиг. 209) из-за более благоприятных условий нагрева, чем в других точках.

Попытки закалить шестерни крупного модуля индуктором в виде петли не приводили ни к чему до тех пор, пока не был использован индуктор с железом, предложенный автором, позволяющий получить нагрев поверхности в виде резко очерченной, почти прямоугольной полосы. Ввиду этого для закалки шестерен большого модуля можно





a

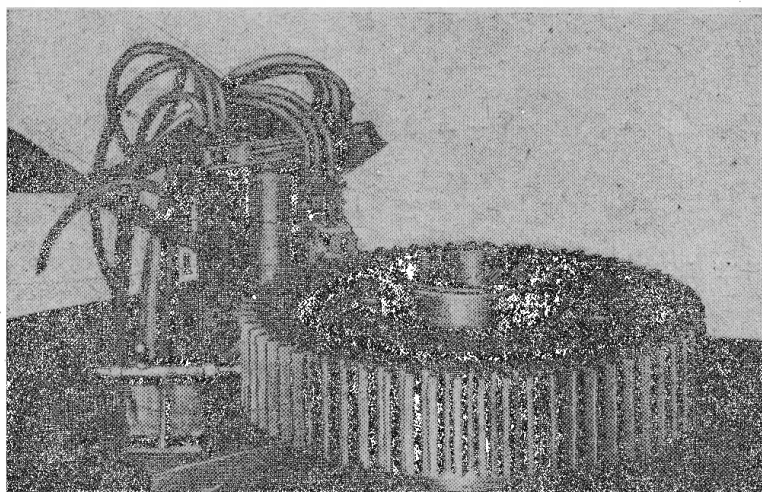


a



b

Станок для закалки вручную шестерен большого модуля показан на фиг. 212.



Фиг. 212. Станок для закалки шестерни большого модуля.

10. Массовая закалка мелких предметов индукционным методом

Закалку таких предметов, как швейные иглы, иглы для граммофонов, перья и т. п., количество которых в год составляет сотни миллионов, до сих пор производили нагревом в печах с последующим охлаждением при высыпании в масло или другую жидкость.

Недостатком такой закалки является значительное окисление, обусловленное длительным нагревом, а главное — неравномерное охлаждение вследствие беспорядочного падения изделий в закалочную жидкость.

Автор поставил себе задачу разработать метод индивидуальной закалки каждого предмета и в смысле нагрева и в смысле охлаждения, несмотря на малые размеры изделий, так как только в этом случае можно достигнуть наибольшей однородности закалки при наименьшей поводке изделия. Последнее имеет большое значение, так как облегчает очень трудоемкую и тяжелую операцию правки после закалки.

Если задаться производительностью в 300 миллионов деталей в год, то при двухсменной работе это составит около 20 деталей в секунду; даже при 10 закалочных постах это даст для процесса закалки лишь 0,5 сек. Такой скорости можно достигнуть только при свободном или несколько замедленном падении закаливаемого предмета в поле высокой частоты, которое создает нагрев.

В качестве примера такого рода закалочного устройства опишем систему, разработанную В. Л. Сергеевичем по указаниям автора, для закалки машинных игл.

Так как размеры игл различных номеров колеблются от 0,6 до 1,4 мм (при наличии расширения), то в качестве частоты генератора, питающего индуктор, была выбрана частота в 5—10 млн. гц.

Проверяя выбор этой частоты, пользуясь уравнениями (I, 4) и (XI, 2), а также данными табл. 5, нетрудно видеть, что, несмотря на огромную частоту, здесь получится режим, отвечающий закалке при относительно низких частотах.

Если частота $f=2000$ гц дает при закалке цилиндра диаметром $d=50$ мм на глубину 3 мм нагрев третьего типа и будет вполне отвечать закалке тела таких размеров, давая нагрев в течение 3,4 сек.,

то при размерах иглы $d' = 1$ мм из закона подобия получим следующую частоту и время нагрева:

$$\text{Коэффициент подобия } n = \frac{d'}{d} = \frac{1}{50}.$$

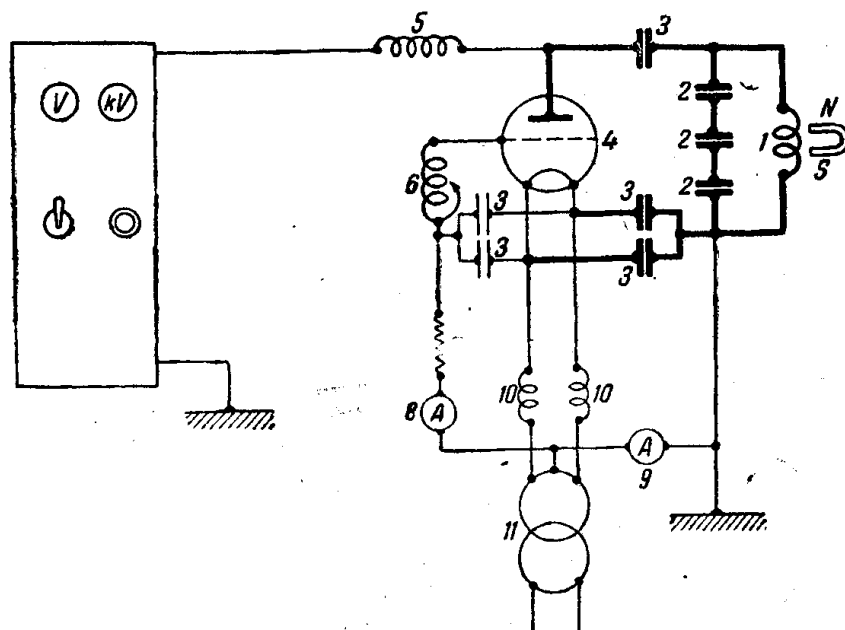
$$\text{Частота } f' = f \frac{1}{n^2} = 2500 \cdot 2000 = 5 \cdot 10^6 \text{ гц.}$$

$$\text{Время } t' = tn^2 = 3,4 \frac{1}{2500} = 0,00135 \text{ сек.}$$

$$\text{Удельная мощность } p' = p \frac{1}{n} = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ квт/см}^2.$$

Эти данные показывают, что при соблюдении условий полного подобия закалка невозможна, так как время закалки в 0,00135 сек. недостаточно для необходимых превращений. Кроме того, требуемая мощность, несмотря на малые размеры иглы, составит $p' = 50$ квт или при $\eta_i = 10\%$ мощность из сети составит 500 квт. Это, конечно, нецелесообразно, тем более, что при таких условиях производительность была бы примерно 500 шт. в секунду, т. е. чрезмерно высокая.

Ввиду этого приходится калить при уменьшенной удельной мощности, увеличивая время нагрева до тех пределов, при которых будут закончены все необходимые превращения. Последнее диктуется также тем, что условия работы швейной иглы (сжатие, изгиб) требуют сквозной закалки лезвия, а закалка колбы необязательна. Как показывает опыт для углеродистой стали, можно взять время нагрева $t'_k = 0,3$ сек.; это обеспечит достаточную производительность и даст возможность калить не менее двух игл в секунду.



Фиг. 213. Принципиальная схема лампового генератора для закалки игл.

1—закаливающий индуктор; 2—контурные конденсаторы; 3—блокировочные конденсаторы; 4—лампа типа ГКО-10; 5—анодный дроссель; 6—сеточный дроссель; 7—сопротивление утечки сетки; 8—сеточный амперметр; 9—анодный амперметр; 10—дроссель высокой частоты в цепи накала; 11—трансформатор накала.

В этом случае не будет соблюдено условие достаточно большой удельной мощности, и нагрев примет характер сплошного, а не поверхностного, как это было при изделии диаметром 50 мм и при частоте 2000 гц.

Удельная мощность при времени $t' = 0,3$ сек. будет около 1 квт/см².

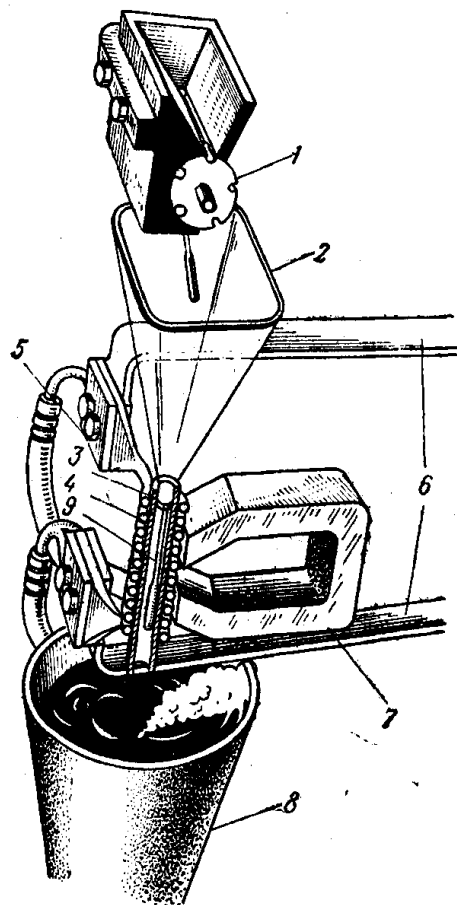
Для осуществления нагрева в течение столь короткого времени и установления нужной закалочной температуры приходится преодолеть ряд трудностей, так как небольшое отклонение во времени или режиме генератора даст уже перегрев или даже расплавление иглы. Чтобы устранить эти затруднения, инж. В. В. Вологдин предложил использовать изменения магнитной проницаемости в точке Кюри. Подлежащая закалке игла при своем падении внутри тонкой трубки, окруженной спиралью, с током высокой частоты, попадает в магнитное поле, образованное постоянным магнитом из никель-алюминиевой стали. Это поле задерживает иглу до тех пор, пока она не нагреется до точки Кюри, которая соответствует приблизительно 780° . После этого игла падает, так как, потеряв высокую магнитную проницаемость, она не будет уже задерживаться постоянным магнитом.

Падая в высокочастотном поле еще $0,1-0,2$ сек., игла нагревается несколько выше точки Кюри, принимая необходимую для закалки температуру, после чего погружается в масло или другую охлаждающую среду. Такого рода устройство позволяет без всяких сложных приспособлений достаточно точно поддерживать для закаливаемых игл необходимую температуру, фиксируемую магнитными свойствами. Если при падении после достижения 780° нагрев не будет строго постоянным, то отклонение от заданной температуры будет незначительным, так как здесь идет нагрев не от 20 до 800° , а от 780 до 820° , т. е. всего лишь на 40° . Если при отсутствии задержки посредством магнита отклонение в скорости или в режиме генератора дало бы энергию, большую на 10% , то это составило бы отклонение в конечной температуре около 80° . При наличии магнита то же отклонение составит всего лишь около 4° , что, конечно, превышает самые строгие требования.

Устройство для закалки игл состоит из лампового генератора, собранного на одной лампе 10 кВт типа ГКО-10. Анодный контур лампы является одновременно закаливающим контуром. Самоиндукция последнего составлена из самоиндукций: закаливающей катушки, монтажа и внутриламповых самоиндукций. Емкость точно так же составлена внутриламповой емкостью, емкостью монтажа и увеличена посредством подключения дополнительных фарфоровых конденсаторов для увеличения тока в контуре.

Принципиальная схема генератора показана на фиг. 213.

Индуктор состоит из ряда витков из трубки красной меди диаметром 3 мм , по которой пропускают охлаждающую воду. Внутри трубки помещена фарфоровая или кварцевая трубка с отверстием, немногим большим наибольшего диаметра иглы.



Фиг. 214. Устройство для закалки игл.

1—автомат, подающий иглы; 2—направляющая воронка; 3—керамическая изоляционная трубка; 4—индуктор; 5—контактные колодки индуктора с шлангами, подводящими воду; 6—подводящие шины высокой частоты; 7—задерживающий электромагнит; 8—сосуд с закаливающей средой; 9—игла.

Действие устройства состоит в том, что подлежащие закалке иглы подают транспортером в магазин 1 (фиг. 214), имеющий в нижней части вращающийся барабан с канавками для игл, которые, попадая в канал, выбрасываются с заданной скоростью вращения барабана частотой, равной 2 шт. в секунду.

При падении из магазина в воронку 2 иглы поворачиваются колбой вниз (падение колбой вниз дает меньшую деформацию) и попадают в описанную ранее трубку с соленвидом, несущим ток высокой частоты. Здесь иглы задерживаются постоянным магнитом до достижения температуры точки Кюри, после чего, продолжая падение, подогреваются еще на 40—60° и, наконец, падают в масло или пространство с масляной пылью, где происходит закалка. Весь процесс продолжается не более 0,3 сек.

Точный и быстрый нагрев и охлаждение в одних и тех же условиях для всех игл создают однородный результат при отсутствии окалины, что сокращает очистку в барабанах.

Один и тот же генератор может питать ряд закалочных устройств, что способствует его равномерной загрузке.

Подобное устройство можно применять не только для закалки игл, но и для закалки других более крупных предметов.

В лаборатории ЛЭТИ были проведены работы по закалке опытной партии игл.

Иглы были закалены в различных охлаждающих средах для выяснения влияния среды на величину деформации игл. Были опробованы: холодная вода, трансформаторное масло при $T=60^\circ$, трансформаторное масло при $T=140^\circ$ и вискозин при $T=230—240^\circ$. Наименьшую деформацию (по объективной оценке) получали иглы при закалке в горячем вискозине, причем во всех случаях получалась однородная деформация, направленная в сторону шлица.

Наличие небольшой однородной деформации, направленной в сторону шлица, должно значительно облегчать рихтовку игл (при ударе не будет повреждаться шлиц), а также не исключает возможности применения автомата для правки игл. Надо также отметить, что для уменьшения деформации и придания ей полной однородности необходимо, чтобы глубина бассейна с закаливающей средой была достаточно велика. Как показали опыты, она должна быть не менее 1 м. Необходимо, чтобы игла, пролетая через закаливающую среду, успевала полностью охладиться и сделаться непластичной в момент удара о дно или выгружающую решетку.

Поверхность игл, подвергшихся индукционной закалке, отличается большой чистотой; имеются только цвета побежалости.

11. Закалка внутренних поверхностей малого диаметра

Из-за описанных выше затруднений закалка поверхностей отверстий с диаметром меньшим 20 мм кольцевым или спиральным индуктором либо невозможна, либо очень затруднена. Это особенно относится к отверстиям с большой длиной, каковыми являются, например, проушины траков танка или гусеничного трактора.

В этом случае задача может быть разрешена индуктором, предложенным автором и осуществленным инженером лаборатории ЛЭТИ А. Д. Демичевым. В качестве индуктора применялась трубка красной меди диаметром на 2—3 мм меньшим диаметра отверстия, подлежащего закалке. При этом закалочный ток имел направление, совпадающее с осью отверстия, а не лежащий в плоскости круга, как при кольцевых индукторах. Так как при этом система индуктор — подводящие концы образует в конечном случае кольцевой контур, являющийся

причиной сосредоточения тока из-за кольцевого эффекта внутри витка, то нагрев поверхности отверстия получается односторонним. Для избежания этого применялось, где это надо, вращение закаливаемого кольца.

Используя этот метод, удалось достигнуть закалки проушин траков длиной около 400 мм. Здесь вращения не требовалось, так как допускалась односторонняя закалка. Закалка здесь велась на частоте 2000 гц, хотя с успехом может производиться и на радиочастотах.

12. Закалка деталей танка

Уже через два года после начала применения высокочастотного метода была установлена его надежность и применимость в области автостроения, но в то же время высказывались сомнения по поводу закалки этим методом ответственных деталей танка.

Во время войны необходимость более широкого применения дешевых и углеродистых сталей взамен дорогих и легированных заставила идти на широкие опыты закалки индукционным методом деталей танка, так как этот метод в ряде случаев допускает указанную выше замену без ущерба для надежности.

Результат этих опытов вполне оправдал себя, и сейчас нет сомнений в том, что многие детали танка с успехом могут калиться индукционным методом, так как десятки тысяч танков, участвовавших в войне, имели детали, закаленные токами высокой частоты.

Этот успех обязан предвидению и настойчивости конструктора танков генерал-лейтенанта Ж. Я. Котина и его сотрудников, а также труду и знаниям инженеров челябинского филиала лаборатории проф. Вологодина при ЛЭТИ — А. Д. Демичева, А. А. Фогеля, А. Е. Слухоцкого, С. В. Шашкина, Д. И. Руденко, а также инженера Кировского завода Цуканова и кандидата технических наук М. М. Замятина.

В табл. 48 приведены детали танка ИС, закаленные поверхностной закалкой.

Таблица 48

Детали танка, закаливавшиеся индукционным методом

№ детали	Название детали	Примененная сталь	Твердость R_c	Глубина закаленного слоя мм	Время нагрева или скорость перемещен., сек. или мм/сек	Способ закалки
1	Водило	Л-36	52	5	4,5	Последовательная
2	Шлицевые валы: грузовой, промежуточный, ведомый и ведущий	45Х и 40СХ. Улучшение до 3,5—3,8Вг	52—58	4/6	5,2/3,1	"
3	То же, коробки перемены передач	То же	52—54	6	4,5	"
4	Поводки и стержень замка	1045. Улучшение до 85—95 кг/мм	52	—	—	Одновременная
5	Зубчатое муфтовое соединение	40СХ или 38ХСА	45—54	4,5	9	"
6	Кронштейн	Л-36	54	4—8	2,5	Последовательная

Закалка всех деталей производилась на частоте 2000 *гц*, за исключением детали 3, которая может калиться также на ламповом генераторе. Охлаждение всех деталей производилось водой. До применения поверхностной закалки здесь применялись стали 12Х2Н4А и 12ХНЗА.

Помимо приведенных деталей, была проведена опытная работа по закалке шестерен, которая дала хорошие результаты. Здесь закалка велась также на частоте 2000 *гц* по одному зубу, на станке-автомате.

Опыт работы в танковой промышленности показал, что в дальнейшем может быть значительно расширен ассортимент закаливаемых деталей. Все детали могут с успехом калиться также и на частоте 5000—8000 *гц*, которая особенно благоприятна для деталей 4, а затем и 2, 3, 4. Для избежания отколов при закалке можно рекомендовать самоотпуск с применением предельно низких температур нагрева под закалку. Применение для стали 45Х водяного охлаждения дало возможность получения значительной твердости при отсутствии трещин, которые были бы неизбежны при водяном охлаждении и обычной закалке.

Более подробно металлургические вопросы, связанные с индукционной закалкой деталей танка, описаны в статье инженера Кировского завода В. А. Цуканова, которому внедрение этого метода в танковую промышленность многим обязано¹.

13. Применение индукционного метода закалки за границей

Одновременно с разработкой метода индукционной закалки у нас в СССР та же работа велась и за границей. Здесь она была сосредоточена в американской фирме The Ohio Crankshaft Company, или, сокращенно, Токко². Эта фирма интересовалась почти исключительно коленчатыми валами, как это вытекало и из самого ее названия, а позднее и кулачковым валиком. По разнообразию закаливаемых деталей и теоретической проработке метода до самой войны наша страна в лице лаборатории Электротехнического института стояла далеко впереди других стран.

Довоенные установки Токко первоначально базировались на частоте 2000 *гц* и мощности 200 *квт*, имея для закалки коленчатых валов громоздкий многопозиционный станок коридорной системы, а для кулачкового валика — станок-автомат для закалки двух валиков одновременно.

С течением времени Токко начала увеличивать частоту закалочного тока, перейдя к 1939 г. на 3000 *гц*, а в годы войны остановилась на 9600 *гц*. В результате постепенного развития метода фирмой была принята как нормальная серия машинных установок различных мощностей, приведенная в табл. 49.

Из этих машин вся серия, за исключением 200 *квт*, имеет частоту 9600 *гц* и последние типы — 2000 и 3000 *гц*.

За годы войны несколько изменилось и общее оформление закалочных установок. Вместо отдельно расположенного машинного агрегата, конденсаторов, контакторов, таймлеров и других устройств, помещаемых в огороженном пространстве, представляющем целую подстанцию с большой площадью, были созданы компактные установки, заключающие в себе машинный генератор до 125 *квт*, 9600 *гц*, со все-

¹ В. А. Цуканов, Металлургические вопросы в электрозакалке в книге "Токи высокой частоты в производстве", Челябинский Обком ВКП(б), март 1944 г.

² Тоссо.

ми перечисленными выше приборами, а также и с трансформатором с железной магнитной цепью и измерительными приборами, т. е. полное закалочное устройство.

Таблица 49

Генераторы типа Токко

Модель	Генератор квт	Мотор л. с.	Вес с упаков- кой, фунты
71/2SCMG 10A	7,5	15	1400
15STMG 10A	15	30	3000
10B	15	30	3000
20SCMG 10A	20	40	3400
10B	20	40	3400
20STMG 10A	20	40	3600
10B	20	40	3600
50PMG 10A	50	90	9200
10B	50	90	9600
10C	50	90	10000
75PMG 10A	75	130	10700
10B	75	130	11100
10C	75	130	11500
100PMG 10A	100	175	13400
10B	100	175	13800
10C	100	175	14200
125PMG 10A	125	225	13900
10B	125	225	14300
10C	125	225	14700
20 MG 3A	200	310	13800
3B	200	310	14300

Все устройство оформлено в виде пульта с размерами 2400××1700 мм при высоте 1720 мм.

Небольшие размеры и закрытая форма устройства позволяют устанавливать его в потоке в непосредственной близости от закалочного станка, иногда же описанное устройство имеет закалочное приспособление непосредственно на пульте. Для повышения мощности два таких устройства включаются параллельно, давая совместно до 250 квт.

Установки этого вида получили широкое применение и очень удобны при массовой закалке стандартных деталей, не сильно отличающихся по своей форме, например при закалке валиков, мелких шестерен, инструментов и т. п.

Опыт применения этого рода установок на ЗИС показал, однако, что при закалке громоздких деталей или деталей, требующих сложных станков, а также при закалке не в потоке они не всегда удобны, так как недостаточно универсальны.

Помимо закалочных установок с машинными генераторами, та же фирма выпускает устройство с ламповыми генераторами мощностью до 20 квт для закалки мелких предметов при тонком закаленном слое.

Что касается ассортимента закаливаемых деталей, то за годы войны в США он чрезвычайно расширился, охватив, помимо коленча-

тых валов, мелкие валики, шестерни, бегунки, а также закалку и улучшение круглого материала. Помимо закалки, еще в более широком масштабе те же устройства применяются для отпуска, отжига и нагрева под поковку, пайку и прессовку.

На большое распространение метода указывает также увеличение числа фирм, занимающихся изготовлением аппаратуры для поверхностной закалки. Кроме Тоссо, теперь в США можно назвать Tocco Div., Ajax Electrothermic Corp., Budd Induction Heating Inc., General Electric Co, Westinghouse Electric & Mfg. Co, Cyclonics Mfg. Co, Ecco High Frequency Corp., Lepel High-Frequency Labor., Scientific Electric Div., «S» Corrugated Quenched Gap Co, Van Norman Company, Federal Tel. & Radio Corp., Induction Heating Corp., RCA Victor Div., Illinois Tool Works и др.

Наблюдая развитие метода в США, можно видеть, что, начав со сравнительно низких частот в 2000 гц, американцы перешли затем на 3000 и, наконец, на 9600 гц. Частоты лампового диапазона порядка 100—300 тыс. гц применяются только в специальных случаях. Лаборатория автора в ЛЭТИ начала, наоборот, с ламповых частот в 300 тыс. гц и постепенно спустилась до 2000, даже 500 гц, хотя в качестве наиболее употребительной частоты она считает 5000—10 000 гц. При этом лаборатория ЛЭТИ каждой частоте отводит свое место в процессе.

Интересно остановиться на тех взглядах, которые создались к настоящему времени в США и вызвали дискуссию в нашей стране. В первую очередь лицами, стоящими вне лаборатории автора, выдвигалось положение о целесообразности использовать для закалки лишь радиочастоты, приводились цифры для к. п. д. лампового устройства, его стоимости и т. д., оспариваемые автором.

В беседе с нашим представителем один из инициаторов поверхностной закалки в США привел отношение стоимости лампового генератора к машинному, конечно, в соответствующих диапазонах частот, как 2,5 : 1, так же точно дав для эксплуатации в том и другом случае отношение 2 : 1. Аналогичные данные можно видеть в статье инж. General El. Co I. P. Jordan, где он дает, кроме того, для к. п. д. лампового генератора цифры, не превышающие 55%, а для машинного — 85%. (Metals and Alloys, May 1944).

ТАБЛИЦА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

$$F(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\left(1 + \frac{1}{2z^2}\right) \int_0^z e^{-\zeta^2} d\zeta + \frac{1}{2z} e^{-z^2} \right]$$

$$F_1(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\int_0^z e^{-\zeta^2} d\zeta + \frac{1}{2z} e^{-z^2} \right]$$

z	$F(z)$	$F_1(z)$	z	$F(z)$	$F_1(z)$	z	$F(z)$	$F_1(z)$
0,00	—	—	0,40	2,969	1,630	0,80	1,694	1,114
0,01	112,9	56,41	0,41	2,905	1,602	0,81	1,679	1,109
0,02	54,47	28,22	0,42	2,842	1,574	0,82	1,655	1,105
0,03	37,60	18,82	0,43	2,784	1,548	0,83	1,652	1,101
0,04	28,23	14,14	0,44	2,726	1,522	0,84	1,639	1,097
0,05	22,60	11,32	0,45	2,674	1,500	0,85	1,626	1,093
0,06	18,82	9,434	0,46	2,623	1,477	0,86	1,614	1,089
0,07	16,15	8,101	0,47	2,574	1,456	0,87	1,602	1,086
0,08	14,14	7,096	0,48	2,533	1,437	0,88	1,591	1,082
0,09	12,58	6,317	0,49	2,482	1,417	0,89	1,579	1,079
0,10	11,32	5,698	0,50	2,441	1,399	0,90	1,568	1,076
0,11	10,30	5,192	0,51	2,399	1,382	0,91	1,557	1,073
0,12	9,449	4,769	0,52	2,360	1,365	0,92	1,547	1,070
0,13	8,732	4,415	0,53	2,323	1,350	0,93	1,536	1,067
0,14	8,112	4,110	0,54	2,288	1,335	0,94	1,526	1,064
0,15	7,577	3,844	0,55	2,252	1,321	0,95	1,517	1,062
0,16	7,113	3,617	0,56	2,219	1,308	0,96	1,508	1,059
0,17	6,700	3,413	0,57	2,187	1,295	0,97	1,498	1,057
0,18	6,335	3,235	0,58	2,157	1,283	0,98	1,489	1,055
0,19	6,009	3,076	0,59	2,127	1,271	0,99	1,480	1,052
0,20	5,716	2,933	0,60	2,099	1,260	1,00	1,472	1,050
0,21	5,452	2,805	0,61	2,072	1,249	1,01	1,463	1,048
0,22	5,211	2,687	0,62	2,045	1,239	1,02	1,455	1,046
0,23	4,991	2,581	0,63	2,019	1,231	1,03	1,447	1,044
0,24	4,790	2,484	0,64	1,994	1,220	1,04	1,440	1,043
0,25	4,607	2,396	0,65	1,971	1,211	1,05	1,432	1,041
0,26	4,438	2,316	0,66	1,948	1,202	1,06	1,425	1,039
0,27	4,280	2,240	0,67	1,926	1,194	1,07	1,418	1,038
0,28	4,135	2,171	0,68	1,904	1,186	1,08	1,411	1,036
0,29	3,999	2,106	0,69	1,883	1,179	1,09	1,404	1,035
0,30	3,873	2,048	0,70	1,863	1,172	1,10	1,396	1,033
0,31	3,755	1,992	0,71	1,844	1,165	1,11	1,390	1,032
0,32	3,647	1,942	0,72	1,825	1,158	1,12	1,384	1,031
0,33	3,542	1,892	0,73	1,807	1,152	1,13	1,378	1,029
0,34	3,445	1,847	0,74	1,789	1,146	1,14	1,372	1,028
0,35	3,355	1,806	0,75	1,772	1,140	1,15	1,366	1,027
0,36	3,268	1,766	0,76	1,756	1,134	1,16	1,360	1,026
0,37	3,186	1,728	0,77	1,739	1,129	1,17	1,354	1,025
0,38	3,110	1,694	0,78	1,724	1,124	1,18	1,349	1,024
0,39	3,038	1,662	0,79	1,709	1,119	1,19	1,343	1,023

Продолжение таблицы

z	$F(z)$	$F_1(z)$	z	$F(z)$	$F_1(z)$	z	$F(z)$	$F_1(z)$
1,20	1,337	1,022	1,50	1,221	1,006	1,75	1,163	1,002
1,21	1,333	1,021	1,51	1,217	1,006	1,76	1,161	1,002
1,22	1,327	1,020	1,52	1,215	1,006	1,77	1,159	1,002
1,23	1,323	1,019	1,53	1,212	1,005	1,78	1,157	1,001
1,24	1,318	1,018	1,54	1,210	1,005	1,79	1,156	1,001
1,25	1,313	1,018	1,55	1,207	1,005	1,80	1,154	1,001
1,26	1,309	1,017	1,56	1,204	1,005	1,81	1,152	1,001
1,27	1,304	1,016	1,57	1,202	1,005	1,82	1,150	1,001
1,28	1,299	1,015	1,58	1,199	1,004	1,83	1,149	1,001
1,29	1,295	1,015	1,59	1,197	1,004	1,84	1,147	1,001
1,30	1,290	1,014	1,60	1,194	1,004	1,85	1,146	1,001
1,31	1,286	1,013	1,61	1,192	1,004	1,86	1,145	1,001
1,32	1,282	1,013	1,62	1,190	1,004	1,87	1,143	1,001
1,33	1,278	1,012	1,63	1,187	1,003	1,88	1,142	1,001
1,34	1,274	1,012	1,64	1,185	1,003	1,89	1,140	1,001
1,35	1,270	1,011	1,65	1,183	1,003	1,90	1,139	1,000
1,36	1,266	1,011	1,66	1,181	1,003	1,91	1,137	1,000
1,37	1,263	1,010	1,67	1,179	1,003	1,92	1,136	1,000
1,38	1,260	1,010	1,68	1,176	1,003	1,93	1,134	1,000
1,39	1,256	1,009	1,69	1,174	1,002	1,94	1,133	1,000
1,40	1,252	1,009	1,70	1,172	1,002	1,95	1,131	1,000
1,41	1,249	1,009	1,71	1,170	1,002	1,96	1,130	1,000
1,42	1,245	1,008	1,72	1,168	1,002	1,97	1,129	1,000
1,43	1,242	1,008	1,73	1,166	1,002	1,98	1,128	1,000
1,44	1,239	1,008	1,74	1,165	1,002	1,99	1,126	1,000
1,45	1,236	1,007						
1,46	1,233	1,007						
1,47	1,229	1,007						
1,48	1,226	1,006						
1,49	1,223	1,006						

z	$F(z)$	z	$F(z)$	z	$F(z)$	z	$F(z)$	z	$F(z)$	z	$F(z)$
2,00	1,125	2,15	1,108	2,30	1,095	2,45	1,083	2,60	1,074	2,75	1,066
2,01	1,124	2,16	1,107	2,31	1,094	2,46	1,083	2,61	1,073	2,76	1,066
2,02	1,123	2,17	1,106	2,32	1,093	2,47	1,082	2,62	1,073	2,77	1,065
2,03	1,121	2,18	1,105	2,33	1,092	2,48	1,081	2,63	1,072	2,78	1,065
2,04	1,120	2,19	1,104	2,34	1,091	2,49	1,081	2,64	1,072	2,79	1,064
2,05	1,119	2,20	1,103	2,35	1,091	2,50	1,080	2,65	1,071	2,80	1,064
2,06	1,118	2,21	1,102	2,36	1,090	2,51	1,079	2,66	1,071	2,81	1,063
2,07	1,117	2,22	1,102	2,37	1,089	2,52	1,079	2,67	1,070	2,82	1,063
2,08	1,116	2,23	1,101	2,38	1,088	2,53	1,078	2,68	1,070	2,83	1,062
2,09	1,115	2,24	1,100	2,39	1,088	2,54	1,078	2,69	1,069	2,84	1,062
2,10	1,113	2,25	1,099	2,40	1,087	2,55	1,077	2,70	1,069	2,85	1,062
2,11	1,112	2,26	1,098	2,41	1,086	2,56	1,076	2,71	1,068	2,86	1,061
2,12	1,111	2,27	1,097	2,42	1,085	2,57	1,076	2,72	1,068	2,87	1,061
2,13	1,110	2,28	1,096	2,43	1,085	2,58	1,075	2,73	1,067	2,88	1,060
2,14	1,109	2,29	1,095	2,44	1,084	2,59	1,075	2,74	1,067	2,89	1,060

ЛИТЕРАТУРА

Высокочастотная поверхностная закалка¹

Аскинази Б. и Бабат Г., Обработка металлов при индукционном нагреве токами высокой частоты, «Вестник металлопромышленности», 1939, № 10/11, октябрь-ноябрь, стр. 74 — 80.

Ассонов А., Опыт ЗИС по поверхностной закалке коленчатых валов, «Вестник металлопромышленности», 1940, № 3, март, стр. 61 — 66.

Бабат Г., О расчете индукторов и высокочастотных воздушных трансформаторов для установок индукционного нагрева, Материалы к конференции по электротермии и электропечам, М., Академия Наук СССР, 1939 (Отделение технических наук и Отделение научной пропаганды).

Бабат Г. и Лозинский М., Поверхностное упрочнение стали обработкой токами высокой частоты, М., Центральный дом техники Наркомсредмаша СССР, 1940, стр. 48.

Бабат Г. и Лозинский М., Закалка стали путем нагрева токами высокой частоты, «Электричество», 1938, № 7, стр. 24—34.

Бабат Г. и Лозинский М., Нагрев стали и чугуна для закалки токами высокой частоты, «Станки и инструмент», 1938, № 12, декабрь, стр. 1 — 3.

Бабат Г. и Лозинский М., Концентраторы вихревых токов для зонального нагрева стальных изделий, «Электричество», 1939, № 4, апрель, стр. 49—54.

Бабат Г. и Лозинский М., Поверхностная закалка инструмента токами высокой частоты, «Станки и инструмент», 1939, № 6, июнь, стр. 18 — 22.

Бабат Г. и Лозинский М., Высокочастотная электротермообработка, «Станки и инструмент», 1939, № 10/11, октябрь-ноябрь, стр. 3—8.

Богословский С., Поверхностная термообработка токами высокой частоты, «Машиностроитель», 1938, № 12, стр. 26 — 28.

Богословский С., Закалка токами высокой частоты шлицевых гаек, «Станки и инструмент», 1939, № 6, июнь, стр. 22.

Богословский С., Поверхностная закалка стальных изделий токами высокой частоты, «Стахановец», 1939, № 6, стр. 44.

Бургсдорф И. и Макогон М., Поверхностная электротермообработка деталей машин, «Металлург», 1938, № 7/8, июль-август, стр. 9 — 21.

Вологдин В., Поверхностная закалка индукционным способом. Метод лаборатории проф. В. П. Вологодина, ЛЭТИ, М.—Л., Metallurgizdat, 1939, стр. 244. Рец. проф. С. Я. Турлыгин, «Вестник электропромышленности», 1940, № 10, октябрь, стр. 60 — 62.

¹ Более раннюю литературу см. В. П. Вологдин, Поверхностная закалка индукционным способом, Metallurgizdat, 1939, стр. 236.

Вологдин В., Поверхностная индукционная закалка. Метод лаборатории проф. В. П. Вологодина, М.—Л., Оборонгиз, 1940, стр. 71 (Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова-Ленина).

Вологдин В., Поверхностная закалка токами высокой и повышенной частоты по методу лаборатории проф. В. П. Вологодина, Материалы к конференции по электротермии и электропечам. М., Академия Наук СССР, 1940, стр. 24 (Отделение технических наук и Отделение научной пропаганды).

Вологдин В., Закалка концов рельсов токами высокой частоты, «Сталь», 1938, № 8/9, август-сентябрь, стр. 47—51.

Вологдин В., Поверхностная закалка, «Наука и техника», 1939, № 21/22, ноябрь, стр. 5—7.

Вологдин В., О современном состоянии индукционной поверхностной закалки (метод лаборатории проф. В. П. Вологодина) и условия ее дальнейшего развития, «Вестник металлопромышленности», 1940, № 3, март, стр. 37—42.

Вологдин В. В., Поверхностная закалка рельсов токами высокой частоты, «Рабочий металлург», 1940, № 7, июль, стр. 9.

Вологдин В. П., «Электричество», № 10, 1940.

Вологдин В. П. и Сергеевич В. Л., «Вестник металлопромышленности», 1940.

Высокочастотная закалка внутренних поверхностей втулок, «Новости техники», 1940, № 9, май, стр. 43.

Гилельс Е. и Куксов Г., Выключатель для управления высокочастотной закалочной установкой, «Электричество», 1939, № 5, май, стр. 53—54. Источник величайшей экономии, газета «Машиностроение», 1939, № 264, 21 ноября, стр. 1 (Значение поверхностной электрозакалки металлов).

Кальман Г., Поверхностная закалка стали и перспективы применения ее в путевом деле, «Путеец», 1939, № 16, август, стр. 11—13.

Контор И., Поверхностная закалка токами высокой частоты в автопромышленности, «Автотракторное дело», 1939, № 1, стр. 30—34.

Конторович И. и Лившиц Л., Внутренние остаточные напряжения, вызываемые в сталях поверхностной высокочастотной закалкой, «Металлург», 1940, № 8, август, стр. 30—37.

Лозинский М., Непрерывно-последовательная поверхностная закалка стали при нагреве токами высокой частоты, «Вестник металлопромышленности», 1940, № 3, март, стр. 50—60.

Марголин С., Состояние внедрения поверхностной электрозакалки, «Вестник металлопромышленности», 1940, № 3, март, стр. 88—89.

Маханек А., Высокочастотная закалка рельсовых концов, «Сталь», 1938, № 11, ноябрь, стр. 46—53.

Моисеев А., Электрический ток закаляет сталь, газета «Ленинградская правда», 1940, № 231 (7720), 4 октября, стр. 3 (О работе лаборатории проф. В. П. Вологодина в ЛЭТИ).

Мондрус Д., Распределение плотности тока в теле, нагреваемом индукционным способом, «Электричество», 1939, № 5, май, стр. 54—55.

Островский А., Токи высокой частоты в самолетостроении, газета «Машиностроение», 1940, № 65, 20 марта, стр. 2.

Подолькин В., Поверхностная электрозакалка, «С.-х. машина», 1938, № 11, стр. 31—32.

Поляков Н., Новый метод закалки валов, «Машиностроитель», 1938, № 12, стр. 29—30.

Разоренов Г., О распространении тепла при нагревании стального тела индукционным током, Журнал Техн. Физики, 1939, т. 9, № 10, стр. 901—913.

Рубанов О., Электрические индукционные печи для поверхностной закалки, «Амер. техн. и пром.», 1938, т. 15, № 12, декабрь, стр. 591—604.

Рубанов О., Съезд и выставка по металлу (Детройт, 17—21 окт. 1938 г.) «Амер. техн. и пром.», 1939, т. 16, № 1, январь, стр. 37—40 (указываются установки

для высокочастотного нагрева и закалки следующих фирм: Ajax Electrothermic Co., Lepel High-frequency Labor., Inc., Ohio Crankshaft Co., Ecco High-frequency Co.).

Руденко Д. И., Поверхностная закалка, „Техника молодежи“, 1940, № 4.

Цирлин М. и Абаренков Н., Применение высокой частоты для целей поверхностной закалки и сушки автомобильных деталей на ГАЗ, „Автотракторное дело“, 1939, № 1, стр. 34—36.

Чириков В., Поверхностная закалка электротоками высокой частоты по методу проф. Вологодина, „Автотракторное дело“, 1939, № 3, стр. 20—23.

Широко внедрять поверхностную электрозакалку. Ценный опыт завода № 4 им. М. И. Калинина, газета „Машиностроение“, 1940, № 109, 14 мая, стр. 3.

Шлякова К., Электрозакалка шпинделей, „Машиностроитель“, 1938, № 12, стр. 28—29.

Babat G. et Losinsky M., La trempe superficielle de l'acier par chauffage au moyen de courants à haute fréquence, „Rev. Gén. Electr.“, 1938, v. 44, № 16, 22, Oct., p. 405—510. Поверхностная закалка стали токами высокой частоты.

Babat G. a. Losinsky M., Power oscillators. Circuit for surface hardening of steel. Wir. Eng., 1940, v. 17, № 196, Jan., p. 16—18. Мощные генераторы. Установка для поверхностной закалки стали.

Babat G. a. Losinsky M., Heat treatment of steel by high-frequency currents. Journ. IEE, 1940, v. 86, № 518, Febr., p. 161—168. Термообработка стали токами высокой частоты.

Conradi L., Heat treatment by high frequency induction, „Metal Progress“, 1938, v. 84, № 3, Sept., p. 214—217. Реф. „Вестник электрпромышленности“, 1939, № 2/3 февраль-март, стр. 59, Термическая обработка токами высокой частоты.

Electrical hardening of internal surface. Machinery (London), 1940, v. 56, № 1435, Apr. 11, 76. Электрозакалка внутренних поверхностей. Приспособления фирмы Budd (США) для индукционной закалки стенок отверстий до 50 мм. В случае длинных отверстий применяется движущаяся закалочная головка.

Etienne P., Le chauffage à induction à haute fréquence et le trempe superficielle. Rev. Chauffage Electr., 1939, № 4, Apr., p. 67—70. Индукционные печи высокой частоты и поверхностная закалка.

Graves W., Induction hardening in automotive production, Metal Progress, 1939, v. 36, № 4, Oct., p. 371. Индукционный нагрев в автопромышленности.

Haiduk H., Die Oberflächenhärtung von zylindrischen Stahlteilen durch Hochfrequenzströme, „Glaser's Ann.“, 1939, № 7, 1 Apr., S. 92—94. Поверхностная закалка цилиндрических стальных деталей токами высокой частоты.

Hardened by induction, „Machinist“, 1940, v. 84, № 8, Apr. 13, p. 82—83. Закалка токами высокой частоты.

Hardening camshafts by the Tocco Process. „Machinery“ (London), 1938, v. 52, № 1348, Aug. II, p. 587—588. Закалка кулачковых валов по методу Токко.

Härten mit Hochfrequenz. Techn. Rundschau, 1939, № 16, 21, Apr., S. 6. Закалка токами высокой частоты.

Hassel F., Oberflächenerhitzung mittels Hochfrequenzenergie, „Elektrowärme“ 1939, № 12, S. 241—244. Высокочастотный поверхностный нагрев.

Heat treating by electrical induction. Blast Furnace and Steel Plant, 1939, v. 271, № 12, Dec., p. 1237. Индукционная термообработка (Электрозакалка внутренних стенок цилиндров и втулок).

Hogel L., High frequency furnaces for hardening, forging and brazing. ASEA Journ., 1940, v. 17, № 1, Jan., p. 2—5. Высокочастотные печи для закалки,ковки и пайки. (Оборудование фабрики ASEA для термической обработки металлов токами высокой частоты).

Induction currents for surface hardening. Electr. World, 1940 v. 113, № 4, Jan 27, p. 68. Поверхностная закалка индукционными токами.

Induction hardening cuts distortion in worm gears. „Steel“, 1938, v. 103, № 2, July, II, p. 57; Metals and Alloys, 1938, v. 9, № 7, July, MA-468. Уменьшение коробления в червячных шестернях при закалке током высокой частоты.

Induction hardening of drill chuck bodies. „Iron Age“, 1939, v. 144, № 26, Dec. 28, p. 26—27. Индукционная закалка патронов для сверл.

Inside surfaces induction hardened, „Iron Age“, 1939, v. 144, № 22, Nov. 30, p. 40. Станок для индукционной закалики внутренних поверхностей.

Linnhoff F., Hochfrequenz-Kurbelwellenhärteanlage. AEG Mitt., 1939, № 3, März, S. 145—147. Высокочастотная установка для закалики коленчатых валов.

Meerkamp van Embden H., Hochfrequenz-erhitzung, Elektrotechnik, 1940, B. 18, S. 27—29. Высокочастотный нагрев (Статья на голландском языке. Автор сравнивает машинный и ламповый генераторы и указывает, что последний тип применяется для термической обработки фирмой Филипс).

Meerkamp van Embden H., Hochfrequenz-erwärmung. Эконом. Техн., 1940, B. 19, S. 184—188. Высокочастотный нагрев. (Работа обзорного характера на голландском языке. В конце автор указывает, что фирмой Филипс применяется для высокочастотной поверхностной закалики деталей 50-квт ламповый генератор).

New induction method hardens inside diameters. Heat Treating and Forging, 1939, v. 25, № 11, Nov., p. 541—542. Реф. „Новости техники“, 1940, № 9, май, стр. 43. Новый метод индукционной закалики внутренних поверхностей.

Shows time saved by inductions hardening. Journ. Soc. Automotive Eng., 1939, v. 45, № 5, Nov., p. 29—30. Экономия времени при применении индукционной закалики металлов.

Tocco hardening adopted for Jacobs chucks, „Machinery“ (N-Y.), 1939, v. 46, № 3, Nov., p. 202—203. Закалка процессом Токко сверлильных патронов Джакобс.

Шлейер Э. и Одинг И., Влияние поверхностной закалики токами высокой частоты на механическую прочность конструкционных сортов стали, „Вестник металлопромышленности“, 1940, № 7, июль, стр. 7—17.

Вологдин В. П., Поверхностная закалка токами высокой частоты. Лекция 32, Центральные заочные курсы, Metallurgizdat, 1941.

Поверхностная закалка индукционным методом, „Iron and Steel“, 1941, v. XIV, No 12.

Индукционная закалка внутренней поверхности цилиндров, „Metals and Alloys“, 1941, v. 13, No 6.

Подогрев, сварка и нормализация индукционным током, „Welding Journal“, 1941 v. 20, No 2.

Cope E. F., Ускоренная индукционная закалка тракторных деталей, „Metals and Alloys“, 1941, v. 14, No 5.

Электрозакалка внутренних цилиндрических поверхностей, „The Iron Age“, 1941, v. 148, No 1.

Карповский М. И., О распределении температур в плоских телах при одностороннем нагреве, Журнал технической физики, т. XI, № 4.

Поверхностная закалка индукционным нагревом, „Heat Treating and Forging“, 1941, v. 27.

Требования, предъявляемые к высокочастотному оборудованию, „Power Applications Instruments“, 1941, v. 14, No 12.

Индукционный нагрев в военной промышленности, „Metals and Alloys“, 1941, v. 14, No 6.

Индукционный нагрев, „Automotive Engineer“, 1941, v. 3, No 413.

Curtis F. W., Дальнейшие возможности применения индукционного нагрева, „Can. Machinery and Manufact. News“, 1942, v. 54, No 5.

Blow T. C., Расчет индуктивности соленоида, „Electronics“, 1942, v. 15, No 5.

Формулы скин-эффекта, „Electronics“, 1942, v. 15, No 2.

Точное регулирование процесса индукционной закалики, „Technologie“, 1942, v. 23, No 2.

Вологдин В. П., Поверхностная индукционная закалка (метод лаб. Вологодина), „Тяжелое машиностроение“, 1941, № 4.

Применение индукционного нагрева высокой частоты при ковке стаканов цилиндров, „Drum Forger“, 1942, v. 21, No 4.

- Индукционный нагрев авиадеталей, „Work Aviation“, 1942, No 8.
- Поверхностная закалка посредством индукционного нагрева, „Westinghouse Engineer“, 1942, v. 2, No 1.
- Электрооборудование для индукционного нагрева, „Westinghouse Engineer“, 1942, v. 2, No 1.
- Местная закалка индукционным методом, „Metals and Metals Industries“, 1942, v. 5, No 10.
- Индукционный нагрев для закалки, отпуска, пайки иковки, „Product Engineering“, 1942, v. 13, No 5.
- Металлургический контроль индукционной закалки, „Trans. of Am. Soc. Metals“, 1942, v. 30, No 2.
- Поверхностное упрочнение, „Heat Treating and Forging“, 1943, v. XXIX, No 9.
- Теория и практика промышленного электронного нагрева, „General Electric Review“, 1943, v. 46, No 12.
- Таранов, Нагрев вихревыми токами металлических частей опорной конструкции индукционной печи, 1943, завод „Электрик“.
- Пайка инструмента токами высокой частоты, „The Welding Engineer“, 1943, No 7.
- Teare B. R. и Wedd J. K., Скин-эффект в биметаллических проводниках „Electrical Engineer“, 1943, v. 62, No 6.
- Высокочастотный нагрев, „Modern Power and Engineering“, 1943, v. 37, No 12.
- Способ индукционного нагрева закаленной стали для отпуска, „Бюллетень Бюро изобретений“, 1943, № 6.
- Pickles A. E., Применение электронагрева в промышленности, „South-Afric. Engin. and Electr. Review“, 1943, v. 34, No 298.
- Taylor I. P., Применение энергии электричества радиочастот, „El. World“, 1943, v. 20, No 14.
- Sherman V. W., Закалка тонкого слоя с помощью радиочастотной энергии, „El. Communication“, 1943, v. 21, No 2.
- Curtis F. W., Перспективы применения индукционного нагрева, „Machine Shop. Magaz.“, 1943, v. 4, No 7.
- Jordan J. P., Нагрев токами высокой частоты, „Ind. Heating“, 1943, v. 10, No 12.
- Van Norman, Индукционная установка для поверхностной закалки, „Machinery“, 1943, v. 49, No 8.
- Способы закалки индукционным методом тел сложной конфигурации, имеющих острые углы, Бюро изобретат., 1943, № 4-5.
- Пайка карбидных инструментов при помощи индукционного нагрева, „The Machinist“, 1943, v. 87, No 25.
- Индукционная термообработка (по методу Лепеля), „Iron and Coal Trades Review“, 1943, v. 145, No 3927.
- Индукционная закалка деталей танка, „Steel Processing“, 1943, No 12.
- Применение электронных генераторов для индукционного нагрева, „Electronics“, 1943, v. 16, No 1.
- Индукционный нагрев и обработка, „Steel Processing“, 1943, v. 29, No 12.
- Закалка токами высокой частоты на глубину 0,125—0,8 мм, „Heat Treating and Forging“, 1943, v. 29, No 8, 9, 10.
- Индукторы для нагрева токами высокой частоты, „Electronics“, 1943, v. 16, No 10.
- Рабочие катушки для высокочастотного нагрева, „Electronics“, 1943, v. 16, No 10.
- Вологдин В. П., Новое применение токов высокой частоты для осадки калибров, Бюлл. 8 ВГПИ НКТП, 1943, № 10 (лит.).
- Вологдин В. П., Высокочастотная поверхностная закалка, Бюлл. 8 ВГПИ НКТП, 1943, № 10 (лит.).
- Вологдин В. П., Закалка тел сложной конфигурации, Бюлл. 8 ВГПИ НКТП, Челябинск, 1943 (лит.).
- Curtis F. W., Будущность индукционного нагрева в термообработке, ковке, плавке, „Steel“, 1943, v. 112, No 22—24.

Новый автомат для поверхностной закалки индукционным нагревом (Ф.-Тоссо), „Ind. Heating“, 1943, v. 10, No 11.

Белов Ф. И., Радиотермический нагрев при лужении металлов, „Американ. техника и промышленность“, т. 20, No 5.

Гиллеспи Г. И., Поверхностная закалка металлов, „Electronics“, 1944, July.

Нагрев с помощью радиочастот, „Wireless World“, 1944, v. 50, No 2, 3.

Электроника на службе в промышленности, „Electrical West“, 1944, v. 92, No 5.

Практические перспективы индукционного нагрева, „Iron Age“, 1944, v. 154, No 8.

Проектирование оборудования для высокочастотного нагрева, „Wireless World“, 1944, v. 50, No 5, 6, 7, 9, 4.

Индукционный нагрев как способ повышения производительности, „Product Eng.“, 1944, v. 15, No 3.

Высокочастотный индукционный нагрев, „Edison Electric Institute Bulletin“, 1944, v. 12, No 9.

Коэффициент полезного действия индукторов, „Electronics“, 1944, Aug.

Langton L. L., Нагрев радиочастотой, „El. Times“, 1944, v. 106, No 2763.

Новая попытка решения вопросов поля высокой частоты, „Radio Engin.“, 1944, v. 32, No 5.

Curtis F. W., Приспособления, облегчающие высокочастотный нагрев, ч. II, „Machinist“, 1944, v. 88, No 16.

Curtis F. W., Преимущества высокочастотного нагрева требуют новых методов конструирования, „Machinist“, 1944, v. 88, No 24.

Леви Ц. И., Методы и оборудование для высокочастотного нагрева, „Iron and Steel Engineer“, 1944, No 10.

Основные принципы применения индукционного нагрева, „Sheet Metal Ind.“, 1944, v. 20, No 210.

Sherman V. W., Цементация при помощи индукционного нагрева, „Canad. Metals & Hardening by Induct. Heating“, 1944, v. 7, No 12.

Nicols W., Высокочастотный нагрев, „Aircraft Production“, 1944, v. 6, No 74.

Close I. C., Индукционный нагрев в производстве каркасов самолетов, „Western Flying“, 1944, v. 24, No 9.

Mc-Quaid H. W., Как отразятся новые методы термообработки стали на конструировании, „Machine Design“, 1944, v. 16, No 8.

Индукционный нагрев в производстве, „Electronics“, 1944, v. 17, No 10.

Нагрев токами высокой частоты в промышленности, „Wireless World“, 1944, v. 50, No 10.

Somes H. E., Высокочастотный индукционный нагрев, „Edison El. Inst. Bul.“, 1944, v. 12, No 9.

Rodbum, Применение индуктивного нагрева и нагрева облучением в промышленности, G. El. Co, Journal II, v. 12.

Индукционный нагрев—выбор частоты, „El. Eng.“, 1944, v. 63, No 10.

Бабат Г. Некоторые особенности нагрева стали индукцией, Журнал прикладной физики, 1944, т. 15, No 12.

Arnold F. M., Электрический индукционный нагрев, „Steel“, 1944, v. 115, No 26.

Covert S. A., Лаборатория Токко сулит блестящую будущность применению токов высокой частоты, „Steel Processing“, 1944, v. 30, No 11.

Lery C. C., Методы индукционного нагрева и оборудование, применяемое для него, „Iron and Steel Engineer“, 1944, v. 21, No 10.

Поверхностная самозакалка деталей токами высокой частоты, Реф., „Steel“, 1944, v. 155, No 1.

Закалка токами высокой частоты при производстве деталей стрелкового оружия, „Machinist“, 1944, v. 88, No 30.

Curtis F. W., Неметаллические приспособления экономят электроэнергию при нагреве токами высокой частоты, „Amer. Machinist“, 1944, v. 88, No 21.

Основные принципы и применение индукционного нагрева, „Steel Metal Ind.“, 1944, v. 20, No 208.

- Нагрев токами высокой частоты, „Aircraft Production“, 1944, v. 6, No 74.
- Двухпозиционный закалочный аппарат, „Ind. Heating“, 1944, v. 88, No 21.
- Приспособления токов высокой частоты для закалки деталей машины в лаборатории Тоссо, „Steel Processing“, 1944, v. 30, No 11.
- Нагрев токами высокой частоты, „Metal Treatment“, 1944, v. 11, No 38.
- Поверхностный нагрев индукцией, „El. Eng.“, 1944, v. 63, No 10.
- Сооружение новой лаборатории по изучению электрического индукционного нагрева, „Steel“, 1944, v. 115, No 23.
- Close G. S., Индукционный нагрев в производстве каркасов самолетов, „West Flying“, 1944, v. 24, No 9.
- Оборудование „Токко“ для высокочастотного нагрева, Тоссо. High-frequency induction heating equipment, 1944, v. 51, No 2.
- Curtis F. W., Конструирование индукторов для высокочастотного нагрева, „Machinist“, 1944, v. 87, No 48.
- Eagan T. E., Преимущества способа по опыту америк. завода, „Steel“, 1944, v. 114, No 4.
- Непрерывная термообработка прутковой стали, „Steel“, 1944, v. 115, No 1.
- Приспособление для нагрева токами высокой частоты, „Machinist“, 1944, v. 88, No 12.
- Современная технология поверхностной закалки, „Metal Progress“, 1944, v. 45.
- Нагрев токами высокой частоты облегчает формовку из пластиков, „South Power Ind.“, 1944, v. 62, No 12.
- Методы индукционного нагрева и оборудование для него, „Iron and Steel Engineer“, 1944, v. 21, No 10.
- Shaad G. E., Высокочастотный индукционный нагрев, „Iron and Steel Engineer“, 1944, v. 21, No 6.
- Curtis F. W., Влияние преимущества закалки с нагревом токами высокой частоты на методы конструирования, „Product Eng.“, 1944, v. 15, No 4.
- Brajnicoff B. J., Высокочастотная электротермия в технологии металлов, „Light Metals“, 1944, v. 7, No 73.
- Основные принципы и применение индукционного нагрева, „Steel Metal Ind.“, 1944, v. 20, No 208.
- Сооружение новой лаборатории по изучению электро-индукционного нагрева, „Steel“, 1944, v. 115, No 23.
- Новый индукционный аппарат для сверхвысокой частоты, „Product Eng.“, 1944, v. 15, No 1.
- Somes X. E., Нагрев токами высокой частоты, „Edison Electr. Inst. Bul.“, 1944, v. 12, No 9.
- Ellis O. W., Псевдоморфизм перлита в закаленной стали, „Trans. Amer. Soc. for Metals“, 1944, v. 32.
- Закалка токами высокой частоты деталей вооружения, „Amer. Machinist“, 1944, v. 85, No 15.
- Жмаев С. Н., Индукционный нагрев токами нормальной частоты, „Промышленная энергетика“, 1944, № 1.
- Радиочастотный нагрев самолетных лонжеронов и газовых баков, „Electronics“, 1944, v. 17, No 2.
- Curtis F. W., Нагрев зубчатых колес токами высокой частоты для закалки „Machinery“ (London), 1944, v. 64.
- Hoyle T. E., Индукционная закалка бронебойных снарядов, „Iron Age“, 1944, v. 154, No 1.
- Непрерывная индукционная термообработка, „Iron Age“, 1944, v. 154, No 3.
- Номограммы для проектирования высокочастотных нагревательных устройств, „Electronics“, 1944, v. 17, No 4.
- Повышение производительности путем применения высокочастотного нагрева, „Machinist“, 1944, v. 88, No 12.

Промышленное применение высокочастотных методов нагрева, „Journ. of the Inst. of Electr. Eng.“, 1944, v. 91, No 41.

Практическое применение индукционного нагрева, „Iron Age“, 1944, v. 154, No 8.

Wologdin, V. Oberflächenhärtung nach dem Induktionsverfahren, Auswertungen aus dem technischen Feindschrifttum, Berlin, 1944.

Вологдин В. П., Индукционный нагрев и новые области его применения. Изд. Академии Наук СССР, ОТН, 1944, № 12.

Curtis F. W., Приспособление для нагрева токами высокой частоты, „Machinist“, 1944, v. 88, No 12.

Vore M. P., Ускорение производства путем применения высокочастотного нагрева, „Product Eng.“, 1944, v. 15, No 3.

Необходимые предосторожности при нагреве индукцией и пламенем, „Metal Progress“, 1944, v. 46, No 6.

Быстрая закалка звездочек, „Metal Progress“, 1944, v. 45, No 2.

Индукционная пайка, „Metal Industr.“, 1944, v. 64, No 10.

Индукционный нагрев алюминия, „Mill and Factory“, 1944, v. 35, No 3.

Контрольное оборудование для индукционного нагрева, „General Electric Review“ v. 47, March, 1944.

Усовершенствования в конструкциях машин для индукционного нагрева, „Machine Design“, 1944, v. 16, No 137.

Основные принципы применения индукционного нагрева, Выбор установки, „Sheet Metal Industries“, 1944, v. 20, No 210.

Индукционная закалка деталей дизельных двигателей, „Steel“, 1944, v. 114, No 15.

Новые машины для ультравысоких частот, „Product Engineering“, 1944, No 15—23.

Металлургический контроль индукционной закалки, „Metal Progress“, 1944, v. 45, No 4.

Местный отпуск поверхностно закаленных деталей, „Вестник машиностроения“, 1945, № 11—12.

Нагрев деталей для закалки под водой током высокой частоты, „Вестник машиностроения“, 1945, № 11—12.

Вологдин В. П. Применение высокочастотной закалки в танкостроении, „Вестник танковой промышленности“, 1944, № 1.

Ииж. Иванов В. А. и Ключин Г. В., Станки для поверхностной электрозакалки, „Вестник машиностроения“, 1945, № 6—7.

Ииж. Щепеляковский К. З. и Рыский С. Е., Многоместный индуктор для закалки токами высокой частоты, „Вестник машиностроения“, 1945, № 6—7.

Лозинский М. Г., Универсальные высокочастотные установки Л-60 для электротермии и плавки, „Вестник машиностроения“, 1945, № 1—2.

Аратюнянц А. А., Производство тонкостенного литья из различных сплавов в зоне токов высокой частоты, „Вестник машиностроения“, 1945, № 8.

A. P. Mazzucchelli u. R. E. Nicolson, Обжиг смоляных покрытий при помощи индукционного нагрева, „Iron Age“, 1945, v. 155, No 18.

Евгений Миттельман, Регулировка мощности при электронном нагреве, „Electronics“, 1945, 11 Febr.

Производство установок для индукционного и диэлектрического нагрева в США, „Electronics“, 1945, Aug.

Поверхностная закалка металлов, „Industrial Heating“, 1945, v. 18, No 3.

Чикагская конференция по индукционному и диэлектрическому нагреву, „Electronics“, 1945, v. 18, No 3.

Мондрус Д. Б., Рациональные пути развития поверхностной индукционной электрозакалки в СССР, Бюлл. „Севзаппромэлектропечь“, 1945, № 4.

Ароизон Г. С., Расчет электромагнитного поля при наличии железа, „Электричество“, 1945, № 10.

Теория индукционного и диэлектрического нагрева, „Industrial Heating“, 1945, Dec.

- Curtis F. W., Приспособления из неметаллических материалов экономят электроэнергию при высокочастотном нагреве, „Machinist“, 1945, v. 88, No 46.
- Roberds W. M., Применение радиочастоты для получения высокой концентрации мощности при нагреве, „Proc. IRE“, 1945, v. 33, No 1.
- Baker R. M., Нагрев движущейся ленты и магнитного материала индукционным способом, „El. Eng.“, 1945, v. 64, No 4.
- Beal R. R., Исследования в области электроники открывают новые горизонты, „Proc. IRE“, 1945, v. 33, No 1.
- Бартлетт Г., Преобразователи частоты, „General Electric Review“, 1945, v. 45, No 1.
- Baker R. M., Madsen C. J., Высокочастотный нагрев проводников и непроводников, „El. Eng.“, 1945, v. 64, No 2.
- Sherman, Индукционный нагрев с частотой в миллионы герц, „Steel“, 1945, v. 116, No 11.
- Benninghoff W. E., Osborn H. B., Циклы процесса индукционного нагрева, „Can. Metals and Metallurg. Ind.“, 1945, v. 8, No 2.
- Chesnut F. T., Индукционный нагрев, „Iron Age“, 1945, v. 155, No 12.
- Close G. C., Поверхностная закалка и пайка с применением индукционного нагрева, „Steel Processing“, 1945, v. 31, No 1.
- Bauble R., Цех индукционного нагрева, „Steel“, 1945, v. 116, No 2.
- Such I. H., Непрерывная термообработка труб, „Steel“, 1945, v. 116, No 7.
- Birdsall G. W., Индукционный нагрев, „Steel“, 1945, v. 116, No 9.
- Конференция по индукционному нагреву, „Iron Age“, 1945, 8/II, v. 155, No 6.
- Вологдин В. П., Токи высокой частоты и пути их развития в промышленности, „Плановое хозяйство“, 1945, № 5.
- Benninghoff W. E., Osborn H. B., Практические взгляды на выбор частоты и времени при индукционном нагреве металлических изделий, „Trans. Amer. Soc. for Metals“, 1945, v. 34.
- Вайншток А. М., Термообработка токами высокой частоты. Информац. материал. НИИ ОРГАВИАПРОМ, 1945.
- Элджер П. Л., Стоклей Д., Индукционный нагрев, „General Electric Review“, 1945, v. 48, No 2.
- Сообщение о прогрессе в деле индукционного нагрева, сделанное в Федеральной комиссии связи (США), „Steel“, 1945, v. 116, No 5.
- Индукционный нагрев, „Iron Age“, 1945, No 12.
- Анализ электромагнитных сил, „El. Eng.“, 1945, v. 64, No 10.
- Martin D. L., Wiley F. E., Индукционная закалка простых углеродистых сталей, „Trans. Amer. Soc. for Metals“, 1945, v. 34.
- Somes H. E., Индукционный нагрев внутренних поверхностей в автомобильной промышленности, „Steel Processing“, 1945, v. 31, No 2.
- Аппарат „Токкотрон“ для высокочастотного нагрева, „Product Eng.“, 1945, v. 16, No 3.
- Обзор различных областей применения индукционного нагрева, „Iron Age“, 1945, v. 155, No 6.
- Аппарат фирмы G. E. со мощностью 50 квт для высокочастотного нагрева, „Amer. Machinist“, 1945, v. 89, No 5.
- Необычные методы применения нагрева токами высокой частоты, „Electronics“, 1945, v. 18, No 4.
- Высокочастотный нагрев и коммерческий инженер-энергетик, „El. World“, 1945, v. 123, No 9.
- Регулировка нагрузки во время нагрева токами высокой частоты, „Electronics“, 1945, v. 18, No 2.
- Новые области применения концентрированного высокочастотного нагрева, „El. News and Eng.“, 1945, v. 54, No 5.

Закалка и горячая посадка, „Steel“, 1945, v. 116, No 18.

Основные принципы и применение индукционного нагрева, „Sheet Metal Ind.“ 1945, v. 21, No 214.

Бабат Г. И., Высокочастотная электротехника, „Вестник электропромышленности“, 1945, № 4—5.

Глуханов Н. П., Применение токов высокой частоты в промышленности. Ленинград, электротехнич. ин-т им. Ульянова-Ленина, 1945.

Инж. Ю. Б. Вигдорович и инж. Разгуляев, Высокочастотные плавильно-закалочные установки завода „Электрик“, 1945.

Вайншток А. М., Термообработка токами высокой частоты. Применение токов высокой частоты для термообработки изделий. Типы установок. Способы нагрева. Нагревательные индукторы. Способы охлаждения. Микроструктура и механические свойства изделий, обработанных токами высокой частоты. Технологические карты. „Сталь“, 1946, № 2.

Клюшин и Иванов, Обеспечение равномерного прогрева изделий при индукционной закалке, „Электричество“, 1946, № 7.

Нагрев и поверхностная закалка токами высокой частоты, „Промышленная энергетика“, 1946, № 4—5.

Вологдин В. П., Применение токов высокой частоты в промышленности, „Промышленная энергетика“, 1946, № 4—5.

Высокоинтенсивный индукционный нагрев, „Steel“, 1946, v. 118, No 11.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Активный слой 12, 28, 62
Аустенита образование 144 и сл., 146, 150, 151
- Бандажи 179, 241 и сл.:
- паровозные 242 и сл.
 - тормозного барабана 241 и сл.
- Беннета формула 16, 175
Близости явление 87, 94, 95, 104
Бурильные трубы 248 и сл.
Валики 179:
- кулачковые 120, 122, 123, 255
 - рифленные 239, 241
- Валки правильные и прокатные 236 и сл.
- Валы 179:
- коленчатые 220 и сл.: деформации при закалке 223, испытания 232 и сл., поводка при нагреве 222, прогиб 223, станок ЗИС для их закалки 225 и сл., станок ХТЗ для их закалки 234 и сл.
- Воздушный трансформатор 80, 154:
- — к. п. д. 185
 - — размеры 162 и сл.
 - — расчет 154 и сл.: по методу подобия 160 и сл., электрических параметров обмоток 156 и сл.
 - — режим: короткого замыкания 159, холостого хода 158
 - — характеристики 160
- Вода закалочная 200, 205, 206, 227, 238: кольцо для подачи 200, 238
- Время нагрева 22, 25, 31, 146:
- — для отпуска концов рельсов 253
 - — и перегрева стали 146 и сл., 150 и сл.
 - — и температура закалки 24, 25, 144
 - — минимальное 22, 25
 - — определение по методу подобия 144 и сл.
 - — при закалке различных деталей 200, 202, 203, 212, 216, 217, 236, 237, 245, 251, 253, 262, 264, 267
 - — разных сортов стали 24, 27
- Генератор 16 и сл., 179 и сл., 188 и сл., 194:
- вес 189 и сл.
 - выбор системы 179, 180, 193
 - к. п. д. 182, 185, 189, 270
 - коэффициент мощности 181
 - ламповый 189, 193, 194, 264: питание 195, схема 194, 264, частота 179, 188, 193, 195, 201
 - машинный 188, 193: завода ХТЗ 189 и сл., завода «Электросила» 189 и сл., типа Токко 269, мощность 181, 186, 187, 189, размерные чертежи 190, 191, цена 189
- Гильзы цилиндров двигателя 180
Глубина закаленного слоя 22, 32, 33, 75, 77, 212:
- — условия получения 33, 77
- Глубина проникновения тока 13, 83, 85, 133:
- — — и выбор частоты 33, 179, 201
 - — — при расчетах по методу подобия 133, 141
 - — — эквивалентная 84
- Глубинный нагрев 12, 29, 66:
- — внутренней цилиндрической поверхности 64 и сл.
 - — наружной поверхности полого цилиндра 60 и сл.
 - — плоского тела 45 и сл.
 - — сплошного цилиндра 55
- Диффузии уравнение 146
Джоулево тепло 12, 14, 30
- Емкость батареи конденсаторов 195, 196 и сл.:
- — — при закалке различных деталей 217, 237, 239, 242
- Закалка внутренних поверхностей 62 и сл., 64 и сл., 105, 207, 208, 246 245 и сл., 266, двух цилиндров 119
- — — краткое описание процесса 14 и сл.
 - — — мелких предметов 263 и сл.
 - — — местная 260

Закалка внутренних поверхностей одно-
временная 16, 182, 209, 215, 216,
220, 246, 254:

- — — термический к. п. д. 26, 44,
49, 55, 67, 182
- — — плоских 15, 38 и сл.,
70 и сл., 209 и сл., 249
и сл.
- — — сложной конфигурации 107,
108, 120 и сл., 253
- — — последовательная 183, 188,
205, 206, 211, 236 и сл., 241,
247 и сл.: термический к. п. д.
183
- — — способом «растушевки» 210
- — — цилиндрических 15, 30, 35, 52
и сл., 105, 107, 110 и сл., 190
и сл., 199 и сл., 204 и сл.,
215 и сл., 236 и сл., 241 и сл.

Закалочное устройство 16, 188 и сл.

Звездчатки 257 и сл.:

- большого диаметра 257 и сл.
- закалка по частям 259
- индуктор для закалки 257
- станок для закалки 258

Зигзагообразный индуктор 176, 210

Иглы 263 и сл.:

- ламповый генератор для закалки
264
- устройство для закалки 265

Индуктивное сопротивление обмоток
трансформатора 157

Индуктор 16 и сл., 154, 167 и сл.:

- без железа 173
- для закалки: внутренних поверхно-
стей 207, 208, 209
- — — внутренних поверхностей ста-
кана автосцепки 247
- — — звездчатки 257, игл 265, ко-
ленчатых валов 220 и сл.
- — — зубьев шестерен большого
модуля 261, плоских предметов
213, рельсов 213, 251, цилиндри-
ческих поверхностей 204 и сл.,
шейки крейцкопфа 215, шейки
поперечного бруса 216, шестерен
254, 261
- зигзагообразный 176, 210; к. п. д.
электрический 184, кольцевой 205;
с воздушным дутьем 206, многовит-
ковый 204
- одновитковый для одновременной и
последовательной закалки 204, 205
- параметры 173
- петлеобразный 15, 174
- с железной магнитной цепью 176,
177, 209
- сравнение с трансформатором 168
- цилиндрический, расчет 169 и сл.:
по методу подобия 173

Индукция 79

Инструмент 259

Катушечный эффект 104 и сл., 208

Коленчатые валы 179, 180, 220 и сл.:
деформации при закалке 223

Коленчатые валы испытания 232 и сл.

- — поводка при нагреве 222
- — прогиб 223
- — станок ЗИС для закалки 225
и сл.
- — станок ХТЗ для закалки 234
и сл.

Кольца подшипников 179, 246

Кольцевой индуктор 205, 206, 209

Кольцевой эффект 92

Конденсаторные батареи 195 и сл.:
емкость 196

Конденсаторы:

- бумажно-масляные 196, слюдяные
196, типа КИП 196

Контактор 228, 229

Коэффициент загрузки 187, 204

Коэффициент:

- концентрации тока 94, 95
- мощности 170 и сл., 180 и сл.; за-
висимость от размеров детали 172,
180, зависимость от частоты 172 и
стоимость конденсаторной батареи
181, загрузки генератора 187
- самоиндукции обмоток трансforma-
тора 156
- температуропроводности 38, 132
- Фильда 98

Коэффициенты подобия 130 и сл.:

- — для трансформатора 136, 140
- — для уравнения диффузии 147
- — для электрических величин ин-
дуктора или воздушного транс-
форматора 173
- — при моделировании 141

К. п. д.:

- агрегата мотор-генератор 185, 189,
270
- генератора 182, 185, 189, 270: лам-
пового 182, 185, 270, машинного
182, 185
- закалочного трансформатора 185
- закалочного устройства 181 и сл.
термический 23 и сл., 26 и сл., 43,
67, 182, 183:
глубинного нагрева 64, зависимость
от перегрева 25, 44, 183, при одно-
временной закалке 182, при после-
довательной закалке 183, при по-
стоянном перегреве плоского тела
49
- электрический (индуктора) 184: зави-
симость от частоты 179, 184

Крапва функция 40

Крестовина 179

Кривизна поверхности:

- — влияние на температуру и к. п. д.
52,
- — критический радиус 53

Критерий подобия Фурье 132

Критическая высота провода 98, 102,
104

Критическая скорость охлаждения 26:
для различных марок стали 27

Кулачок 120

Кулачковые валики 112, 122 и сл., 255,
«Кусковой» вопрос 109, 114

Ламповый генератор 16, 17, 189, 193
и сл.:

- для закалки игл 264
- для литья 195
- с самовозбуждением 17
- схема 194
- частота 195

Магнитная проницаемость 15

Магнитная цепь 81

Магнитное поле 36, 81, 85:

- при явлении близости 88

Магнитопровод железный 177:

- в индукторе 177, 209, 213, 261
- в трансформаторе 198

Магнитные экраны, расслоенные 104
и сл.

Макрошлифы различных деталей 122,
123, 219, 232, 234, 237, 239, 241,
244, 245, 246, 248, 249, 251, 257, 261

Мелкие предметы, массовая закалка
263

Местная закалка 260 и сл.

Метод подобию 130 и сл.:

- и определение времени нагрева и
температуры 144 и сл., при расчете
закалочного устройства 154 и сл.

Метчики 259

Микрошлифы различных деталей 219,
231, 248, 252, 257, 262

Минимальное время нагрева 22

Мощности коэффициент 170 и сл., 180,
172

Мощность 30, 80, 111:

- активная, отдаваемая трансформа-
тором 158, подводимая к трансфор-
матору 158
- генератора 186, 187, 189, 193, 201
и сл., 205: при закалке различных
деталей 201 и сл., 205, 216 и сл.,
221, 236, 237 и сл., 244 и сл., 248
и сл., 259, 262, тепловая 193, элек-
трическая 193
- из сети 186, 187, 202, 242, 244, 245,
253, 259, 262
- определение по методу подобию
137, 141, 158, 160 и сл., 164, 165
- передаваемая закаливаемому телу
39, 186, 187, 202
- подводимая к индуктору 186
- полезная 186
- удельная 15, 30, 41, 47, 49, 51, 62,
64, 141

Нагрев:

- быстрый 41
- влияние формы детали 107 и сл.
- в реальных условиях 34
- глубинный 12, 29, 51 и сл., 66
- медленный 41
- поверхностный 15, 21, 29, 38 и сл.,
48, 67, 71, 73
- сплошной 75
- стали 144 и сл.
- тела: бесконечной толщины 38 и
сл., конечной толщины 48 и сл.,
тепловым потоком 12

Нагрев:

- тип 29, 31, 33
- условия получения данного типа
30, 31, 33
- цилиндрического тела 15, 30, 35

Напряжение генератора 180, 189:

- на зажимах индуктора 154, 171
- на конденсаторах 196
- трансформатора 135 и сл., 138 и
сл., 154: расчет по методу подо-
бия 154, 158, 160 и сл., 163 и
сл., 166

Непрерывно-последовательная закалка
205

Низкие частоты 37

Одновременная закалка 182, 209 и сл.

Отверстия, закалка 105

Отпуск:

- паровозных бандажей 243 и сл.
- рельсов 253

Охлаждение нагретой поверхности 15,
69 и сл., 76:

- скорость 22, 69 и сл.: критическая
23

Параметры:

- закалочных устройств 178 и сл.
- индуктора 173
- индукционной закалки 22 и сл.
- Паровозные бандажи 242 и сл.
- Перегрев наружной поверхности 22,
25, 38, 42 и сл., 49:
и термический к. п. д. 42 и сл., 44,
49
- и распределение температуры 23,
25, 44 и сл.
- и температура закалки 25 и сл.,
44, 45
- и укрупнение зерен стали 144 и сл.,
150 и сл.
- Петлевой индуктор 15, 174
- Плоские предметы большой длины
209, 249 и сл.
- Плотность мощности 15, 20
- Плотность тока 13, 32, 36, 98 и сл.:
- при поверхностном эффекте 83
и сл., 117
- при эффекте близости 88 и сл.
- распределение: вблизи острых
углов 124, в закаливаемых те-
лах 36, 83 и сл., 88, 98 и сл.,
104, 175, в кольцо и спирали 92,
в проводе над пластинкой 90 и
сл., 104 и сл.

Поверхностный нагрев 11 и сл., 29,
38 и сл., 48, 67, 71, 73:

- — полого цилиндра 60 и сл.
- — сплошного цилиндра 52 и сл.
- — типы 29, 31

Поверхностный эффект 13, 82, 87, 93,
104, 117, 133:

- — и подобие электрических вели-
чин 133
- — и распределение токов 83 и сл.,
86, 92, 98, 117

Поверхность:

- внутренняя 62 и сл., 164 и сл., 207 и сл., 246 и сл., 266
- плоская 38 и сл., 209 и сл., 249 и сл.
- цилиндрическая 52 и сл., 62 и сл., 199 и сл., 204, 205, 215, 236 и сл.

Поводка при закалке различных деталей 217, 218, 220, 222, 224

Подобие 130 и сл., 133 и сл., 137 и сл., 141, 144 и сл., 151, 160:

- в теплопередаче 130 и сл.
- и время нагрева 144 и сл.
- и параметры закалочного устройства 137 и сл.
- и температура нагрева 131, 141 и сл., 146
- коэффициенты 130 и сл., 132, 133, 134, 136, 137, 140, 141, 147, 151, 173
- неполное 133
- полное 134
- при моделировании 141
- при расчете: закалочного устройства 130 и сл., 137 и сл., индукторов 134, 138, 173, трансформаторов 134, 138, 154 и сл., 160, 163 и сл.
- электрических величин 133, 134, 137, 173

Подшипники 246

Полый цилиндр 60 и сл., 66

Последовательная закалка 183, 205, 211, 236 и сл., 241

Потери закалочной установки 182

Правильные валки 179, 236 и сл.

Производительность 201, 204:

- и тип нагрева 31
- и частота 31, 178, 179, 204
- при закалке различных деталей 204, 205, 215

Прокатные валки 236 и сл.

Распределительные валы 179

«Растушевки» способ 210

Расчет:

- индуктора по методу подобия 134 и сл., 169 и сл., 173 и сл.
- трансформатора 104, 134 и сл., 138, 154, 156: по методу подобия 154 и сл., 160 и сл., 163 и сл.

Рейтеры 108, 221

Рельсы 179, 249 и сл.

Рифленые валки 239, 241,

Ролики тракторов 179

Сверла 259

Скорость индуктора при последовательном нагреве 212

Скорость охлаждения 22, 23, 69 и сл., 71 и сл., 74:

- — влияние на толщину закаленного слоя 69
- — и глубина закаленного слоя 75
- — и метод подобия 141
- — критическая 23, 26, 27
- — при сплошном нагреве 75

Соппротивление:

- влияние на к. п. д. 184
- и подобие 133, 134 и сл., 173

Соппротивление при высоких частотах 86

— при поверхностном эффекте 82

— провода в пазу 100 и сл., 103

— удельное 82, 83, 184

Стаканы автосцепки 247, 248

Станок закалочный для:

- — — звездчаток 258
- — — коленчатых валов: ЗИС 225 и сл., ХТЗ 234 и сл.
- — — кулачковых валиков 255, 256
- — — рельсов 252
- — — шейки поперечного бруса трактора 217
- — — шестерен большого модуля 263

Танка детали 267

Твердость:

- коленчатых валов 233
- паровозных бандажей 245
- правильных валков 237
- прокатных валков 238
- рельсов 251
- шеек бруса тракторов 219
- шеек кривошипа 239

Температура закалочная 22, 23, 24, 66 и сл., 67:

- — для сталей различных марок 24
- — и время нагрева 25, 146 и сл., 150 и сл.
- — определение по методу подобия 144 и сл.
- — при глубинном нагреве 64, 65, 66
- — при охлаждении 73
- — при поверхностном нагреве 28
- — при сплошном нагреве 75
- — распределение: в плоской поверхности при охлаждении 70, в плоском теле 38 и сл., 40, 41, 48 и сл., 50, 51, в полой цилиндрической 59 и сл., 61, 62, 63, в сплошном цилиндре 53, 55, 56, в теле 23

Температура отпуска:

- — бандажей 245
- — рельсов 253

Температурнезависимый фактор 146

Температуропроводности коэффициент 38, 132

Тепло в закаливаемом слое 29, 43, 45 и сл.

Теплоемкость при нагреве 15, 39

Теплопередача при закалке 38 и сл.

Теплопроводности уравнение 12, 38

Термический к. п. д. 23, 24, 26, 27, 43, 67, 182:

- — зависимость от перегрева 44, 49, 183
- — при нагреве: плоского тела 38 и сл., 49, 51, сплошного цилиндра 55, 60
- — при поверхностном нагреве 55, 67

Типы нагрева 29, 30, 33:

- — условия получения 30 и сл.

Токи высокой частоты 81

Точка Кюри 15

Трансформатор воздушный 16, 80, 154 и сл., 197 и сл.

Трансформатор воздушный к. п. д. 158, 160, 185:
— — — размеры 162, 163 и сл., 178
— — — расчет 104, 138 и сл., 154 и сл., 156 и сл.: по методу подобию 154 и сл., 160 и сл.
— — — характеристики 160
Трансформатор с железной цепью 198
Трубы бурильные 248 и сл.

Удельная мощность 15, 20, 39:

— — — при быстром и медленном нагреве 41
— — — при глубоком нагреве 47, 51
— — — при нагреве: плоского тела 49, полого цилиндра 62,
— — — сплошного цилиндра 54, 57

Удельное сопротивление при нагреве 15

Устройство закалочное:

— — — для игл 265
— — — для правильных валков 236 и сл.
— — — для тормозных бандажей 242
— — — для шеек кривошипа 240
— — — к. п. д. составных частей 181 и сл.
— — — мощность 186
— — — основные параметры 178 и сл.
— — — составные части 16 и сл., 188
— — — схема 16, 17, 188

Фильда:

— коэффициент 98
— эффект 104 и сл.

Цапфы крейцкопфа 215

Цилиндрические поверхности 200, 205, 206, 207, 215, 236, 241 и сл.:
— — — внутренние 246 и сл.
— — — наружные 199 и сл.
— — — одновременная закалка 246
— — — последовательная закалка 247 и сл.

Частота закалочного устройства 31, 33, 178 и сл., 195, 278:

— — — для получения закаленного слоя одинаковой толщины 120
— — — для разных типов нагрева 30 и сл.
— — — зависимость от глубины закаливаемого слоя 33, 179
— — — зависимость от рода деталей 120, 121 и сл., 179
— — — и конденсаторы 196
— — — и концентрация мощности 80
— — — и коэффициент мощности 178, 180
— — — и к. п. д.: генератора 179, 195, электрический 182, устройства 182, 187

Частота закалочного устройства и параметры индуктора 137, 173

— — — и поверхностный эффект 13, 82 и сл., 85
— — — и размеры трансформатора 17, 80
— — — и сопротивление провода 82, 86, 103
— — — низкая 37, 113
— — — при закалке: внутренних поверхностей 208, 246, двух цилиндров 119, звездчаток 259, игл 263, инструмента 259, коленчатых валов 221, 234, кулачковых валиков 122, 123, 258, мелких предметов 263, паровозных бандажей 244, плоскостей 210, 251, подшипников 246, прокатных и правильных валков 236, рельсов 251, цапф крейцкопфа 215, цилиндрических поверхностей 178 и сл., 184, 201, 202, 215 и сл., шеек поперечного бруса трактора 216, шестерен 108, 121, 123, 124, 254
— — — при моделировании 141
— — — при расчетах по методу подобию 133, 134, 136, 137, 138, 160

Шариковые подшипники 179

Шейки:

— коленчатого вала 25, 220, 222, 230 и сл.
— крейцкопфа 179, 215
— кривошипа двигателя 238 и сл.
— поперечного бруса трактора 25, 216
Шестерни 107 и сл., 120, 122 и сл., 179, 180, 254, 260 и сл.
Шпиндели 179

Э. д. с., индуцируемая:

— — — в теле 79, 80
— — — на закаливаемой поверхности 16
— — — петель 16, 174

Электрическое поле 85 и сл.

Энергия:

— индуцируемая в теле 110, 114
— расходуемая на закалку 187
— удельная при закалке различных деталей 202, 216, 237, 238, 239, 241, 242, 244, 245, 246, 248, 249, 251, 255, 262

Эффект:

— близости 87, 94, 95, 104
— кольцевой 92
— Фильда 98, 104 и сл.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Принятые обозначения	5

Глава I

Введение

1. Преимущества индукционного метода и вопросы, связанные с ним . .	11
2. Краткое описание процесса закалки	14
3. Составные части закалочного устройства	16
4. Особенности, характеризующие индукционный метод закалки	18
5. Основные закономерности, использованные лабораторией автора при разработке метода	19
6. Содержание отдельных глав	19

Глава II

Нагрев под поверхностную закалку индукционным методом.

Типы нагрева. Частота и связь ее с типами нагрева

1. Требования, предъявляемые к методу	21
2. Основные параметры, определяющие метод	22
3. Закалочная температура T_k	24
4. Перегрев наружной поверхности ΔT по отношению к закалочной температуре T_k	25
5. Время нагрева под закалку t_k	25
6. Критическая скорость охлаждения $\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{кр}$	26
7. Термический к. п. д.	26
8. Требования, предъявляемые термической стороной процесса к нагреву под закалку	28
9. Нагрев с выделением тепла внутри закаливаемого слоя. Глубинный нагрев $\xi \approx x_k$	29
10. Типы нагрева	29
11. Осуществление требуемого типа нагрева и зависимость от частоты . .	30
12. Прохождение процесса нагрева в действительных условиях без допущенных ранее упрощений	34

Глава III

Основные вопросы теплопередачи, относящиеся к индукционной закалке

1. Распределение температур и термический к.п.д. при нагреве тела бесконечной толщины с плоской поверхностью. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$	38
2. Нагрев тела бесконечной толщины с плоской поверхностью при выделении тепла в активном слое глубиной $\xi > 0$	45
3. Тело конечной толщины с плоской поверхностью. Поверхностный нагрев, $\xi = 0$	48
4. Тело конечной толщины с плоской поверхностью. Глубинный нагрев, $\xi > 0$	51

	<i>Стр.</i>
5. Влияние кривизны поверхности на распределение температуры и величину к.п.д.	52
6. Сплошное цилиндрическое тело. Чисто поверхностный нагрев, $\xi = 0$	52
7. Сплошной цилиндр. Глубинный нагрев, $\xi > 0$	55
8. Полый цилиндр. Нагрев внешней поверхности	60
9. Полый цилиндр. Глубинный нагрев внешней поверхности. Активный слой, $\xi > 0$	62
10. Полый цилиндр. Нагрев внутренней поверхности, $\xi = 0$	62
11. Внутренняя цилиндрическая поверхность при глубинном нагреве. Активный слой, $\xi > 0$	64
12. Заключение. Общий обзор зависимости распределения температуры θ по глубине x от кривизны поверхности, толщины нагреваемого тела h и от величины активного слоя ξ	66

Глава IV

Скорость охлаждения тела при нагретом поверхностном слое

1. Значение скорости охлаждения в процессе закалки	69
2. Общее решение задачи	70
3. Первый метод числовых расчетов. Поверхностный нагрев	71
4. Второй метод числовых расчетов. Поверхностный нагрев	73
5. Сплошной нагрев, $\varphi(x) = \text{const} = \theta_1$	75
6. Применение уравнений скорости охлаждения для определения глубины закаленного слоя x_k	75

Глава V

Основные законы, связанные с индуктированием и прохождением электрического тока по проводникам, положенные в основу метода закалки

1. Закон индукции	79
2. Закон магнитной цепи	81
3. Особенности, связанные с прохождением токов высокой частоты	81
4. Поверхностный эффект	82
5. Взаимное распределение магнитного и электрического полей	85
6. Сопротивление при высоких частотах	86
7. Явление близости	87
8. Кольцевой эффект. Распределение плотности переменного тока в кольце и спирали	92
9. Выражения упрощенного вида для поверхностных явлений, могущие служить при решении вопросов поверхностной закалки	93
10. Распределение тока в проводе, окруженном с трех сторон расслоенным железом. Критическая высота провода, помещенного в расслоенное железо	98
11. Применение выведенных формул при расчете трансформаторов	104
12. Сравнение влияния, оказываемого поверхностным эффектом, явлением близости, катушечным эффектом и расслоенными магнитными экранами (эффект Фильда), на распределение плотности тока в проводящих телах	104

Глава VI

Влияние формы закаливаемой поверхности

1. Необходимость учета формы закаливаемой поверхности и замена сложной поверхности системой цилиндрических поверхностей	107
2. Решение задачи получения закаленного слоя приблизительно одинаковой толщины у двух цилиндров различного радиуса чисто тепловым методом	110
3. Получение закаленного слоя приблизительно одинаковой толщины у двух цилиндров, находящихся в однородном переменном магнитном поле, путем использования тепловых и электрических зависимостей, связанных с кривизной цилиндра и частотой поля	114
4. Закалка тел сложной конфигурации	120
5. Лабораторные работы, подтверждающие метод	121
6. Распределение поля и тока вблизи острых углов между гранями детали	124

Глава VII

Применение закона подобия для решения вопросов, связанных с поверхностной закалкой и закалочными устройствами

1. Общие данные о подобии	130
2. Подобие в теплопередаче. Критерий подобия и коэффициенты подобия	130
3. Подобие электрических величин. Специальные единицы	133

	<i>Стр.</i>
4. Коэффициенты подобия для электрических величин R , L и M при отсутствии поверхностного эффекта	133
5. Коэффициенты подобия для R , L и M при поверхностном эффекте. Первый случай: $\omega = 2\pi f = \text{const.}$ Неполное подобие	133
6. Коэффициенты подобия для R , L и M при поверхностном эффекте. Второй случай: ω может меняться. Полное подобие	134
7. Метод подобия при расчете трансформаторов и индукторов при наличии поверхностного эффекта	134
8. Коэффициенты подобия для величин, связывающих электрическую и тепловую задачи	137
9. Примеры использования подобия для определения параметров закалочного устройства. Первый случай: частота может меняться при изменении размеров	137
10. Второй случай. Использование метода подобия при постоянной частоте. Применение в случае расчета трансформатора	138
11. Метод подобия при моделировании	141
12. Применения подобия в вопросах, связанных со скоростью охлаждения	141

Глава VIII

Применение метода подобия к определению времени нагрева и температуры, дающих полную закалку без перегрева

1. Два рода процессов, происходящих при нагреве под закалку	144
2. Образование аустенита при нагреве под закалку. Зависимость между температурой и временем нагрева	146
3. Крупное зерно при перегреве. Время и температура нагрева, обуславливающие отсутствие перегрева	150

Глава IX

Применение метода подобия к расчету закалочного трансформатора

1. Воздушный трансформатор. Особенности трансформаторов, применяемых для закалки индукционным методом	154
2. Расчет электрических параметров обмоток воздушного трансформатора	156
3. Применение метода подобия для расчета воздушных трансформаторов	160

Глава X

Основы работы индуктора в закалочных устройствах

1. Система индуктор—нагреваемое тело как трансформатор	167
2. Особенности работы индуктора по сравнению с обычным трансформатором	168
3. Основания расчета цилиндрического индуктора большой длины, приведенного к 1 см высоты	169
4. Изменение параметров индуктора при изменении длины и частоты	173
5. Индуктор для плоских предметов без железа	173
6. Индуктор с железной магнитной цепью	177

Глава XI

Основные параметры закалочных устройств

1. Частота	178
2. Напряжение	180
3. Коэффициент мощности системы: индуктор — закаливаемое тело	180
4. Коэффициент мощности генератора	181
5. Коэффициент полезного действия различных частей закалочного устройства	181
6. Мощность	186
7. Энергия, потребляемая на закалку	187

Глава XII

Закалочное устройство

1. Схема закалочного устройства	188
2. Генераторы машинного типа	188
3. Замечания о машинных генераторах повышенной частоты	193
4. Ламповые генераторы	193
5. Конденсаторные батареи закалочного устройства	195
6. Трансформаторы, применяемые в закалочных устройствах	197

Глава XIII

Закалка поверхностей простейшей формы

	Стр.
1. Общие замечания	199
2. Цилиндрические поверхности	199
3. Наружная цилиндрическая поверхность	199
4. Цилиндрическая поверхность небольшой длины и диаметра	200
5. Индуктор для одновременной закалки цилиндрических поверхностей	204
6. Цилиндрические поверхности большой длины. Непрерывно-последовательный метод	205
7. Цилиндрические поверхности большого диаметра и малой высоты	206
8. Цилиндрические поверхности со стенкой ограниченной толщины	207
9. Внутренние цилиндрические поверхности	207
10. Плоские поверхности	209
11. Одновременная закалка плоских поверхностей	209
12. Закалка поверхностей небольшой толщины	211
13. Последовательная закалка плоских поверхностей	211

Глава XIV

Закалка различных деталей

1. Цилиндрические предметы простой формы. Наружные поверхности	215
2. Закалка коленчатых валов	220
3. Последовательная закалка. Цилиндрические поверхности большой длины	236
4. Цилиндрические поверхности весьма большого диаметра и малой высоты. Последовательная закалка	241
5. Закалка внутренних цилиндрических поверхностей	246
6. Закалка плоских предметов большой длины	249
7. Закалка тел, имеющих поверхность сложной конфигурации	253
8. Закалка инструмента	259
9. Местная закалка	260
10. Массовая закалка мелких предметов индукционным методом	263
11. Закалка внутренних поверхностей малого диаметра	266
12. Закалка деталей танка	267
13. Применение индукционного метода закалки за границей	268
Приложение. Таблица вспомогательных функций	271
Литература	273
Предметный указатель	283