

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра физического металловедения и физики твёрдого тела

621. 78(07)
К709

Ю.Д. Корягин, В.И. Филатов

ИНДУКЦИОННАЯ ЗАКАЛКА СТАЛЕЙ

Учебное пособие

Челябинск
Издательство ЮУрГУ
2006

УДК [621.78 : 669.14] (075.8)
К709

Одобрено
учебно-методической комиссией
физико-металлургического факультета.

Рецензенты:
профессор, д.ф.-м.н. С.В. Рущиц;
профессор, д.т.н. Б.А. Чаплыгин.

Индукционная закалка сталей: учебное пособие / Ю.Д. Корягин, В.И. Филатов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 52 с.

ISBN 5-696-03591-4

Учебное пособие по курсу «Теория и практика термической обработки» предназначено для студентов специальности «Металловедение и термическая обработка металлов», выполняющих практические задания по расчётам индукторов для поверхностной закалки стальных деталей с помощью токов высокой частоты.

В пособии предложены контрольные задания. Каждому контрольному заданию предшествует краткое теоретическое введение, где рассмотрены основные понятия, необходимые для решения задач и упражнений по данной теме. Пособие составлено на основе материалов, опубликованных в технической литературе по закалке ТВЧ.

УДК [621.78 : 669.14] (075.8)

ISBN 5-696-03591-4

© Издательство ЮУрГУ, 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов технических университетов, академий и институтов, обучающихся по специальностям 1105 «Металловедение и термическая обработка металлов» и 0709 «Физика металлов»; оно также может быть использовано для специальности 1208 «Материаловедение в машиностроении» и других, в учебных планах которых рассматриваются вопросы применения и расчёта термического оборудования.

Пособие является руководством по практическому использованию в расчётах теоретических представлений, полученных из курсов металлургического цикла («Металлургические печи», «Металлургическая теплотехника», «Нагревательные печи», «Оборудование термических цехов» и т. д.).

В каждом из разделов учебного пособия кратко изложены основные теоретические представления и формулы, применяемые в дальнейшем. Использование расчётных формул и методов предполагает знание основ курсов математики, физики и электротехники.

В настоящем пособии рассмотрены методы расчёта индукторов для поверхностной закалки цилиндрических и плоских деталей.

В связи с ограниченным объёмом пособия в него не включены справочные данные, которые студенты могут легко найти в литературе.

ВВЕДЕНИЕ

В развитии машиностроительной промышленности, повышении качества, надёжности и долговечности машин большая роль принадлежит термической обработке, как одному из эффективных и экономичных методов упрочнения металлов и металлических сплавов.

Термическая обработка металлов является составной частью общего цикла изготовления деталей машин и инструмента. Особенно большие успехи в разработке теории и внедрении передовых методов термической и химико-термической обработки достигнуты на машиностроительных заводах автомобильной, тракторной, станкостроительной и шарикоподшипниковой промышленности.

Одним из выдающихся достижений российской науки и техники явилось создание метода индукционной поверхностной закалки при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ) и внедрение машин–автоматов для осуществления этого прогрессивного метода.

Индукционная закалка – наиболее дешёвое и технически совершенное средство для поверхностного упрочнения и повышения твёрдости разнообразных деталей станков, машин и сооружений.

В учебном пособии рассмотрено основное оборудование, применяемое для индукционной закалки токами высокой частоты, конструкции и методики расчёта индукторов.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основоположником метода индукционной термической обработки и промышленного использования токов высокой частоты для нагрева металла является профессор В. П. Вологдин, который разработал теорию индукционного нагрева и создал первые промышленные установки. Ему принадлежит мировой приоритет в этой области [1].

Индукционный нагрев, широко применяемый в настоящее время в различных отраслях промышленности, обеспечивает высокую производительность, экономичность, автоматизацию производства, улучшение условий труда и повышение качества нагреваемых заготовок. Индукционный нагрев с последующей закалкой является одним из наиболее совершенных и рациональных методов поверхностного упрочнения стальных деталей. Однако индукционный нагрев имеет также некоторые недостатки, ограничивающие его применение. Использование индукционных установок экономично только для нагрева изделий одинаковых сечений. При нагреве деталей сложной формы коэффициент полезного действия (КПД) таких установок очень низок (0,1...0,2). При сквозном индукционном нагреве изделий трудно обеспечить высокую равномерность их нагрева. Индукционные установки мало пригодны для низкотемпературного нагрева.

Для нагрева металла электрическим током в настоящее время пользуются преимущественно токами высокой частоты. Как известно, переменный электрический ток в городской сети имеет частоту 50 Гц и относится к токам низкой частоты

(промышленная частота). Переменный электрический ток с частотой выше 50 Гц называют током высокой частоты.

ТВЧ для индукционного нагрева металла получают в специальных установках – генераторах. Они бывают машинными, полупроводниковыми и ламповыми. В машинных генераторах получают токи с частотой от 500 до 10 000 Гц, в полупроводниковых преобразователях – от 4000 до 66 000 Гц, а в ламповых генераторах – до 10 000 000 Гц (10 МГц).

Сущность индукционного нагрева заключается в следующем. Заготовка (деталь) помещается в переменное магнитное поле проводника, несущего ток промышленной или повышенной частоты. Этот проводник называется индуктором и обычно изготавливается из медных трубок, которые навиваются в виде спиралей круглого или другого сечения (в зависимости от формы нагреваемой заготовки). Ему может быть придана любая другая форма, если это необходимо для получения заданного температурного поля детали. Вследствие электромагнитной индукции в детали возникает вихревой ток (ток Фуко), который её нагревает. Ферромагнитные материалы нагреваются в этих условиях также теплом, выделяющимся при перемагничивании заготовки. Количество выделившегося тепла (Q), можно вычислить по формуле (1.1) Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau, \text{ Дж}, \quad (1.1)$$

где I – сила тока, А;

R – электрическое сопротивление материала заготовки, Ом;

τ – время нахождения детали в переменном магнитном поле индуктора, с.

Изменяя силу тока I , можно получить любое количество тепла и, следовательно, любую температуру и любую скорость нагрева.

Возникающие в детали индукционные токи отесняются к её поверхности. Плотность вихревого тока i_x у поверхности максимальна (рис. 1.1) и убывает по мере приближения к центру детали, подчиняясь экспоненциальному закону (поверхностный эффект):

$$i_x = \frac{i_0}{e^{x/\delta}}, \quad (1.2)$$

где i_x – плотность индукционного тока на глубине x от поверхности детали, А/см²;

i_0 – плотность тока на поверхности детали, А/см²;

e – основание натурального логарифма ($e = 2,718$);

x – расстояние от поверхности детали, см;

δ – глубина проникновения вихревого тока в металл, см.

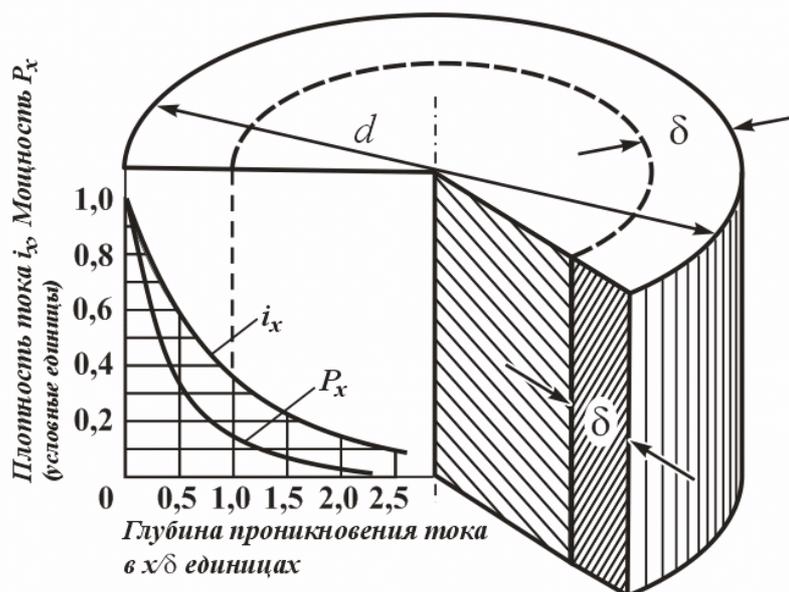


Рис. 1.1. Плотность ТВЧ i_x и поглощаемая деталью мощность P_x как функция расстояния от поверхности детали

В технических расчётах используется термин «глубина проникновения тока» – это поверхностный слой δ нагреваемого изделия, в котором выделяется основное количество индуцированного тока. Эту величину можно вычислить, пользуясь следующей формулой:

$$\delta_{\text{хол.}} = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \quad (1.3)$$

где $\delta_{\text{хол.}}$ – глубина проникновения вихревого тока в ферромагнитный (холодный) материал (деталь), см;

ρ – удельное электрическое сопротивление нагреваемого тела, Ом·см;

μ – магнитная проницаемость нагреваемого тела;

f – частота тока, питающего индуктор, Гц.

Так, для холодной магнитной углеродистой стали при $\rho = 1,2 \cdot 10^{-5}$ Ом·см, $\mu = 50$ и $f = 50$ Гц глубина проникновения вихревого тока $\delta_{\text{хол}}$ составит $\approx 3,5$ мм, а при частоте 2500 Гц – около 0,5 мм, то есть чем больше частота тока, тем меньше $\delta_{\text{хол.}}$.

С повышением температуры металла ρ возрастает, а μ уменьшается и для сталей при переходе из ферромагнитного состояния в парамагнитное μ становится равной 1 Гс/Э, вследствие чего глубина проникновения тока в изделие увеличивается и она может быть определена для конструкционных сталей по формуле

$$\delta_{\text{гор.}} \approx \frac{50}{\sqrt{f}}, \quad (1.4)$$

где $\delta_{\text{гор.}}$ – глубина проникновения вихревого тока в горячий металл, см;

f – частота тока, Гц.

Глубина проникновения тока при «горячем режиме» может быть принята за глубину нагрева, так как в этом слое выделяется основная часть ($\approx 86\%$) энергии (см. рис. 1.1).

В табл. 1.1 приведены данные по глубине проникновения тока в материалы при различных температурах и частотах тока.

Таблица 1.1

Глубина проникновения индукционного тока в различные материалы в зависимости от температуры и частоты тока

Материал	Температура, °С	Глубина проникновения тока, см, при частоте, Гц					
		50	1000	2500	8000	70 000	150 000
Конструкционная сталь	20	0,280	0,064	0,040	0,022	0,007	0,005
	1 000	8,500	1,900	1,200	0,700	0,220	0,160
Аустенитная сталь	20	3,220	0,715	0,450	0,250	0,085	0,058
	1 000	8,550	1,900	1,200	0,670	0,220	0,155
Алюминий	20	1,200	0,270	0,170	0,095	0,032	0,021
	600	2,400	0,540	0,340	0,170	0,064	0,042
Медь	20	0,95	0,210	0,134	0,075	0,025	0,013

Необходимую частоту тока (f , Гц) в зависимости от формы изделия и толщины закалённого слоя (глубины проникновения тока δ в мм) можно определить по следующим формулам:

$$f \approx \frac{5 \cdot 10^4}{\delta^2} \quad \text{– для деталей простой конфигурации;} \quad (1.5)$$

$$f \approx \frac{5 \cdot 10^5}{\delta^2} \quad \text{– для деталей сложной конфигурации;} \quad (1.6)$$

$$f \approx \frac{5 \cdot 10^6}{m^2} \quad \text{– для шестерён с модулем } m \text{ более 8 мм.} \quad (1.7)$$

Превышать полученные частоты не рекомендуется, т. к. это сопровождается увеличением времени нагрева и снижением КПД установки. Необходимая частота зависит также от диаметра детали. Ниже приведены рекомендуемые частоты для нагрева деталей различного диаметра.

Таблица 1.2

Частоты электрического тока, рекомендуемые для нагрева деталей различного диаметра

Частота тока, Гц	50	500	1000	2500	8000	60 000 и выше
Диаметр детали, см	15	7...15	5...12	3...8	2...4	Меньше 3

Практически для индукционного нагрева при термической обработке используют три частоты:

1) $f = 60\,000 \dots 80\,000$ Гц – для деталей диаметром меньше 3 см при источнике тока от ламповых генераторов и тиристорных преобразователей. Большие частоты не применяют, так как они входят в диапазон радиочастот;

2) $f = 1000 \dots 10\,000$ Гц – для деталей диаметром 3...15 см и толщиной нагретого слоя свыше 20 мм. Используются машинные или тиристорные преобразователи;

3) $f = 50$ Гц – для поверхностного нагрева деталей диаметром больше 15 см, а также для сквозного нагрева с питанием от электрической сети.

Из работ И. Н. Кидина [2] известно, что максимальную эксплуатационную прочность поверхностно закалённые цилиндрические изделия диаметром d получают уже тогда, когда отношение $x_k/d \geq 0,14$, где x_k глубина слоя закалённого на мартенсит. Наибольшая эффективность поверхностной высокочастотной закалки достигается при выполнении процесса нагрева по глубинному типу, когда $x_k \approx \delta$. При таком виде нагрева получается наименьшая потеря тепла в более глубокие слои изделия и фиксируется довольно узкая переходная зона.

При индукционной поверхностной закалке стали (закалке ТВЧ) нагреваются выше критических точек и затем быстро охлаждаются только поверхностные слои детали, а сердцевина детали не испытывает фазовых превращений, т. е. остаётся вязкой (рис. 1.2).

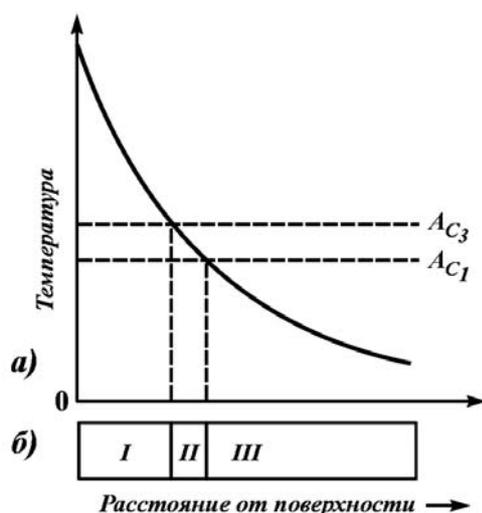


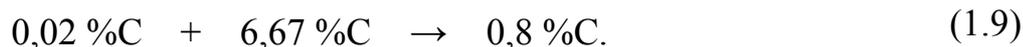
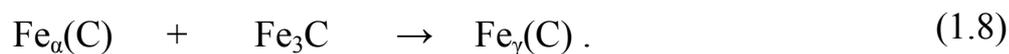
Рис. 1.2. Распределение температуры по сечению детали при поверхностной закалке (а) и зоны доэвтектоидной стали после закалки (б):
I – полная закалка;
II – неполная закалка;
III – незакалённая зона с сохранившейся исходной структурой

Скорости нагрева металла при поверхностной закалке ТВЧ могут достигать 500...1000, °C/с. При этом энергия, необходимая для разогрева индуктируется непосредственно в поверхностном слое закаливаемой детали. Высокие скорости нагрева при закалке ТВЧ определяют своеобразие превращений в стальных деталях.

Они сводятся к следующему:

1. Фазовые превращения протекают практически одновременно во всём слое, соответствующем глубине проникновения вихревого тока, т. к. во всём слое к моменту закалки температура примерно одинакова. В результате уменьшается опасность перегрева и во всём закалённом слое создаются почти одинаковая структура и соответственно одинаковые свойства стали.

2) При большой скорости нагрева диффузионные фазовые превращения смещаются в область более высоких температур, например процесс превращения феррито–карбидной структуры в аустенит:



При этом возможно смещение окончания перлито–аустенитного превращения до температур, лежащих выше температуры полиморфного превращения структурно свободного феррита (рис. 1.3).

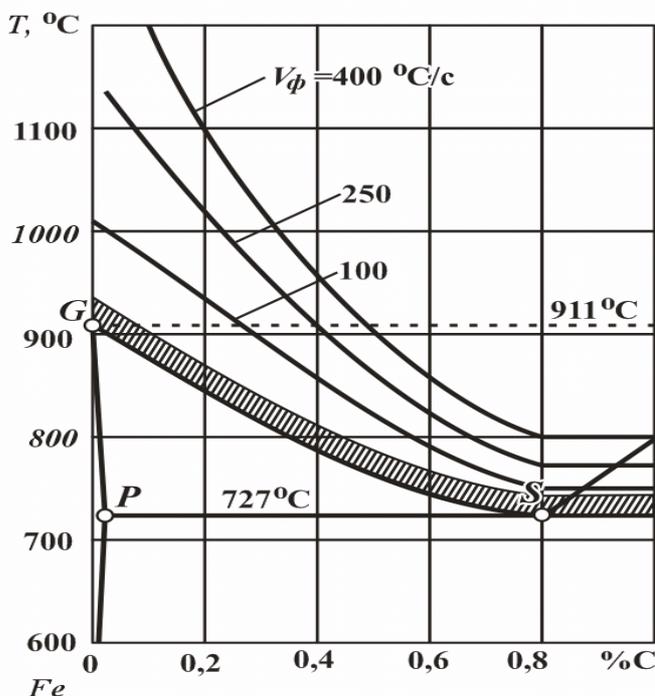


Рис. 1.3. Влияние содержания углерода на температуру нагрева под закалку углеродистых сталей при различных скоростях нагрева в интервале температур фазовых превращений. Заштрихован интервал температур медленного нагрева под закалку [3]

3) Перлито-аустенитное превращение происходит не при одной неизменной температуре (A_{c1}), а в интервале температур ($A_{c1} \dots A_{c3}$), величина которого тем больше, чем выше скорость нагрева (см. рис. 1.3). При этом начало превращения перлита в аустенит отмечается при температуре намного превышающей критическую точку A_{c1} , когда создаются условия для возникновения и устойчивого существования зародышей аустенита.

4) В связи с образованием сверхмелкого аустенитного зерна мартенсит, получаемый при индукционной закалке, обычно имеет безигольчатое или мелкоигольчатое строение; в наследственно мелкозернистой легированной стали игольчатость строения мартенсита закалки проявляется только при значительном перегреве. В структуре закалённой стали иногда может наблюдаться мелкоигольчатый троостит.

5) Большая скорость нагрева и незначительная выдержка определяют незавершённость диффузионных процессов при высокочастотном нагреве. Поэтому образующийся аустенит в микрообъёмах неоднороден по содержанию углерода* и его превращение в мартенсит при охлаждении происходит в некотором диапазоне температур ($M_H^B - M_H^H$) (рис. 1.4). При этом в микрообъёмах с пониженной кон-

* В стали 40 максимальное количество углерода в микрообъёмах аустенита может достигать 1,6...1,7% [4].

центрацией углерода (x') кристаллы мартенсита образуются при более высокой температуре M_H^B . У таких кристаллов в процессе охлаждения (при закалке) развивается самоотпуск, т.е. происходит частичное выделение мелкодисперсных карбидов и в результате возникает структура – мартенсит закалки, мартенсит отпуски, карбиды и сохраняется 2...3 % остаточного аустенита.

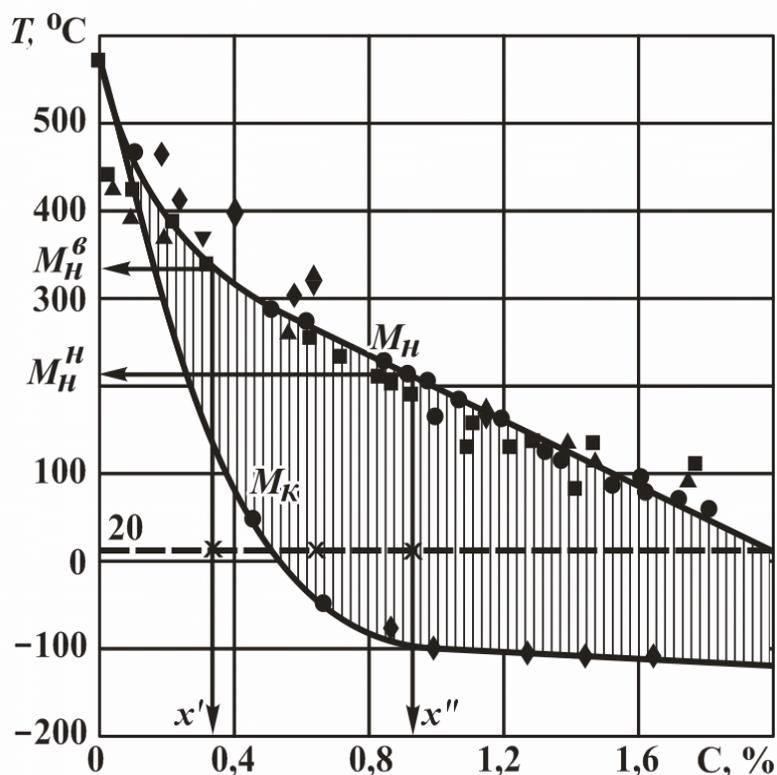


Рис. 1.4. Зависимость температуры начала M_H и окончания M_K мартенситного превращения от содержания углерода в стали. Точки на графике – экспериментальные данные многих исследователей [5]

В результате свойства стали после закалки ТВЧ отличаются от свойств той же стали после закалки с объёмным нагревом. Так, например, у стали У8 после объёмной закалки твёрдость обычно не превышает 62...64 HRC, в то время как после закалки ТВЧ твёрдость этой же стали достигает 66...68 HRC (явление сверхтвёрдости).

Для обеспечения требуемой закаливаемости поверхностной закалке ТВЧ подвергают углеродистые и малолегированные стали с содержанием углерода не менее 0,4 %. Чаще всего здесь используют углеродистые стали пониженной прокаливаемости (стали 55ПП, 60ПП и т. п.). В этих сталях должно быть пониженное содержание таких элементов, как кремний, марганец, хром и никель, которые существенно повышают прокаливаемость стали.

Вследствие кратковременности нагрева при поверхностной закалке ТВЧ к исходной структуре стали предъявляются повышенные требования. В частности, крупные ферритные участки, имеющиеся в исходной доэвтектоидной стали, не успевают раствориться в аустените при нагреве и остаются в закалённой зоне, при этом резко снижаются механические свойства и износостойкость изделия:



где Φ – феррит, P – перлит, $M_{зак.}$, $M_{отп.}$ – мартенсит закалки и мартенсит отпуска, K – карбиды, и $A_{ост}$ – аустенит остаточный.

В связи с этим закалке ТВЧ целесообразно подвергать доэвтектоидные стали после предварительной термической обработки – закалки с высоким отпуском (улучшение), либо нормализации, если она приводит к получению дисперсной тонкопластинчатой структуры – сорбита или троостита без избыточного феррита или с мелкими его включениями.

Практика проведения поверхностной закалки ТВЧ показала, что для каждой скорости нагрева имеется определённый интервал температур (рис. 1.5), обеспечивающий получение мелкозернистой структуры. Для некоторых сталей построены диаграммы преимущественных режимов нагрева под закалку, на которых в зависимости от длительности нагрева или его скорости (в температурной области выше равновесных критических точек) нанесены зоны недогрева, оптимальных режимов и перегрева.

Из приведённых на рис. 1.5 диаграмм видно, что интервал температур закалки при медленном печном нагреве (1) лежит значительно ниже, чем при скоростном нагреве. Наиболее низкие температуры при индукционном нагреве недостаточны для завершения процесса образования аустенита и исчезновения феррита в доэвтектоидных сталях, при этом не может быть достигнута заданная твёрдость. Более высокие температуры нагрева вызывают интенсивный рост аустенитных зёрен, то есть имеет место перегрев. Пользуясь такими диаграммами, нетрудно выбрать режим скоростного нагрева данной стали.

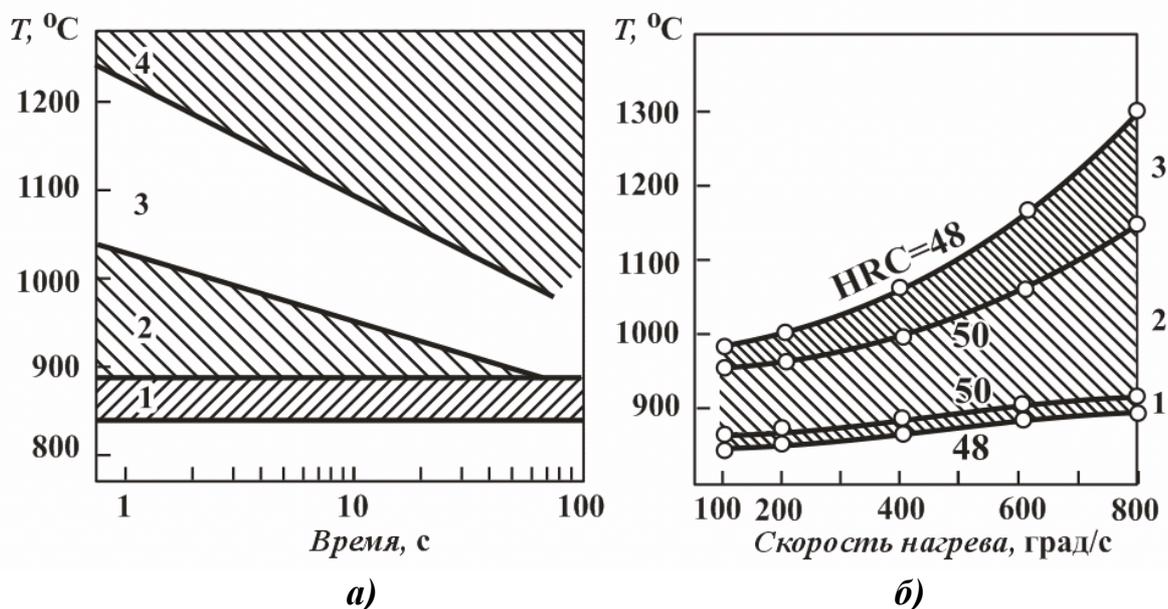


Рис. 1.5. Диаграммы преимущественных режимов для закалки:
***a* – сталь 38ХА, отожжённая (1 – зона закалки при медленном нагреве; 2, 3, 4 – соответственно зоны недогрева, закалки и перегрева при быстром нагреве); *б* – сталь 35 (1 и 3 – зоны допустимых режимов нагрева, 2 – зона оптимальных режимов нагрева) [4]**

В зависимости от конфигурации детали и мощности генератора применяют следующие способы нагрева деталей с помощью токов высокой частоты (**способы закалки ТВЧ**):

- **одновременный.** Здесь одновременно нагревают всю поверхность обрабатываемой детали, после чего её сразу охлаждают. При одновременной закалке для нагрева крупных деталей требуется генератор большой мощности, поэтому этот способ применяют в основном в термической обработке небольших деталей – мелко модульных шестерён, валиков, втулок и др. деталей малого сечения, а также при местной закалке части детали. Обычно при такой закалке ширина закалённой полосы детали оказывается примерно на 10...20% меньше высоты индуктора, чем и руководствуются при выборе высоты индуктирующего провода;

- **непрерывно-последовательный.** Сначала нагреву подвергается небольшой участок поверхности детали; по мере перемещения детали или индуктора происходит нагрев последующих участков, а ранее нагретые участки детали охлаждаются (закачиваются) с помощью спрейера. Такой способ позволяет осуществлять закалку крупногабаритных изделий при небольшой мощности генератора, в связи с чем, его широко применяют при термической обработке деталей металлургического и горнорудного оборудования. Непрерывно-последовательным способом осуществляют закалку крупных валов и других деталей. Высоту индуктора, определяющую ширину нагреваемой поверхности детали, здесь выбирают в зависимости от мощности генератора.

При одновременном и непрерывно-последовательном нагревах цилиндрические детали центрируются относительно индуктора и им придаётся вращательное движение для обеспечения равномерности зазора между наружной поверхностью детали и внутренней поверхностью индуктора, что обеспечит равномерность нагрева обрабатываемой детали;

- **последовательный.** Применяют в основном для крупномодульных зубчатых колёс в тех случаях, когда мощность генератора не позволяет производить одновременный нагрев всех зубьев шестерни. В этом случае закалку осуществляют путём последовательного нагрева и охлаждения отдельных зубьев или группы зубьев;

- **непосредственного включения.** Нагрев осуществляют при непосредственном пропускании тока высокой частоты через деталь. Этот метод применяют при закалке деталей сложной формы или закалке отдельной зоны детали у отверстий малого диаметра (звенья цепей, фильеры, матрицы и другие детали).

Режим охлаждения при закалке ТВЧ стали должен обеспечить получение преимущественно мартенситной структуры. Скорость охлаждения при такой закалке должна быть высокой, т. к. при индукционном нагреве образуются мелкие аустенитные зёрна, имеет место значительная концентрационная неоднородность при сохранении остатков нерастворённых карбидов, что существенно снижает устойчивость переохлаждённого аустенита и приводит к увеличению критической скорости закалки. Так при быстром индукционном нагреве до 845 °С стали 40ХН2М

её критическая скорость закалки возросла в 9 раз (от 15 °С/с – для медленного печного нагрева, до 135 °С/с) [4]. Главным образом по этой причине при закалке ТВЧ и углеродистые, и легированные стали охлаждают водяным душем (спрейерное охлаждение) или быстрым потоком воды.

После закалки ТВЧ детали подвергаются отпуску, режим которого определяется требуемыми от изделия свойствами. Так как от деталей после индукционной поверхностной закалки требуется высокая твёрдость и износостойкость, то обычно проводится низкий отпуск, который снижает внутренние напряжения и уменьшает хрупкость закалённого слоя. Такой отпуск может быть самостоятельной технологической операцией, который проводится при температурах 150...180 °С. Очень часто поверхностную закалку ТВЧ крупногабаритных деталей проводят с самоотпуском, т. е. отпуск происходит за счёт тепла, сохранившегося в сердцевине изделия при закалке. Режим такого охлаждения вначале рассчитывается, а затем экспериментально устанавливается для обрабатываемой детали.

2. УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРЕВА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Закалочные установки для индукционного нагрева состоят из генератора токов высокой частоты, понижающего трансформатора, конденсаторных батарей, индуктора, станка или приспособления и аппаратуры (реле времени, реле управления подачей закалочной жидкости и другие устройства).

В индукционных установках при средних частотах (500...10 000 Гц) применяют машинные генераторы ТВЧ, а в последнее время статические преобразователи тиристорного типа; при высоких частотах (60 000 Гц и выше) – ламповые генераторы. Перспективным видом генераторов являются полные преобразователи, так называемые экситронные генераторы. Они позволяют свести потери энергии к минимуму.

На рис. 2.1 показана схема установки с машинным генератором.

Кроме машинного генератора 2 с возбудителем 3 и двигателя 1, установка содержит понижающий трансформатор 5, конденсаторные батареи 4 и индуктор 6. Трансформатор понижает напряжение до безопасного (30...50 В) и одновременно увеличивает силу тока в 25...30 раз, доводя её до 5000...8000 А.

Часто генератор и двигатель соединяют в одном агрегате (мотор-генераторе). Это даёт возможность упростить конструкцию, сократить расход материалов (меди и железа) на их изготовление, а при наличии водяной рубашки – уменьшить шум от работы машины.

На свободном конце вала генератора устанавливается возбудитель для питания обмотки возбуждения генератора. Машинные генераторы имеют мощность 55...1500 кВт; КПД, равный 0,7...0,8. Они сравнительно просты в обслуживании, что позволяет успешно использовать их в массовом производстве – например, для поверхностного нагрева и закалки шеек коленчатых валов и других деталей в автомобильной и тракторной промышленности.

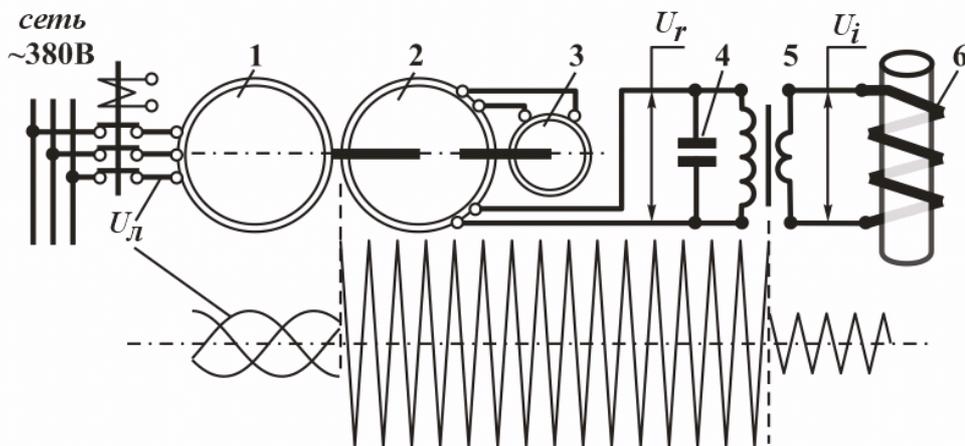


Рис. 2.1. Схема высокочастотной установки с машинным генератором и диаграмма напряжений

Установка с тиристорным преобразователем (рис. 2.2) состоит из следующих основных частей: выпрямителя 1 на управляемых тиристорах; фильтра 2, включающего индуктивность L и конденсатор C для сглаживания пульсации выходного напряжения выпрямителя; инвертора 3, который преобразует постоянный ток в переменный заданной частоты (он собран на четырёх управляемых тиристорах). Индуктор 5 подключается через трансформатор 4 в диагональ вентильного моста T_1-T_4 и T_3-T_2 .

Если открыты вентили T_1 и T_2 , ток течёт в направлении J_1 , а при открытых вентилях T_3 и T_4 – в обратном направлении. Коммутация вентиля осуществляется ёмкостью C_k . Импульсы на тиристоры подаются попеременно со сдвигом на 180° по диагонали инвертора. Поскольку ёмкость C_k включена параллельно первичной обмотке трансформатора 4, то на вторичной его обмотке возникает переменное напряжение с частотой коммутации вентиля $1000 \dots 66\,000$ Гц. Конденсатор C_k также компенсирует реактивную мощность индуктора, повышая коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Полупроводниковые тиристорные преобразователи частоты по сравнению с машинными имеют более высокий КПД (на $10 \dots 15\%$), меньшие габариты и возможность регулирования рабочей частоты. Тиристорные преобразователи имеют мощность $5 \dots 500$ кВт и частоту $1000 \dots 66\,000$ Гц.

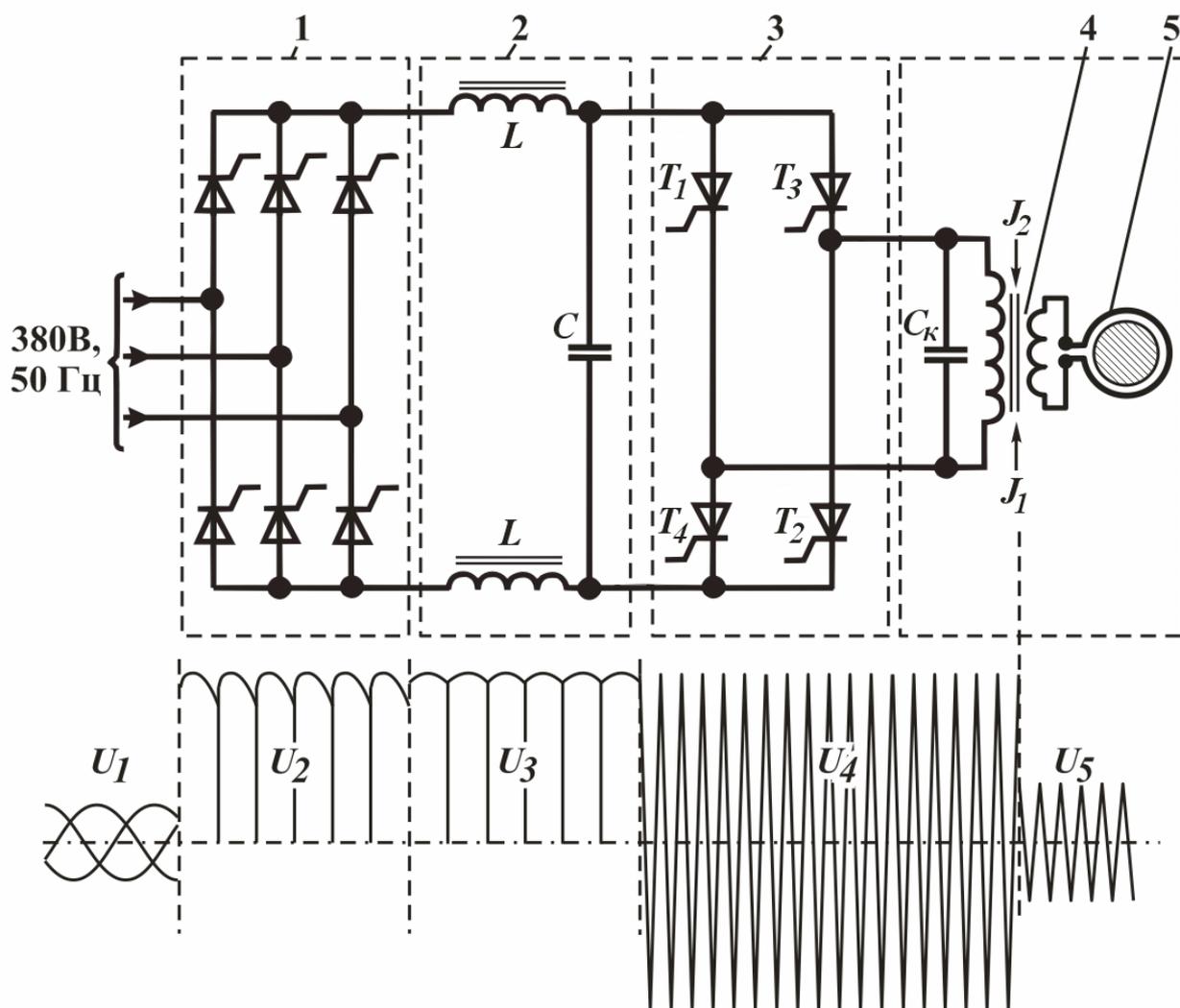


Рис. 2.2. Схема установки с тиристорным преобразователем и диаграмма напряжений

Принципиальная схема установки с ламповым генератором представлена на рис. 2.3.

В установку входят повышающий трансформатор 1, выпрямитель 2 с анодным трансформатором, генераторный блок 3, колебательный контур 4 и система управления. Напряжение питающей сети $U_1 = 220/380$ В с частотой 50 Гц повышается трёхфазным трансформатором 1 до $U_2 = 8000 \dots 10\,000$ В. Это напряжение подаётся на газотронный выпрямитель 2, преобразующий переменный ток высокого напряжения в постоянный с напряжением U_3 . Выпрямленный ток поступает в ламповый генератор, работающий на самовозбуждение, с автотрансформаторной сетчатой связью, в котором постоянный ток высокого напряжения U_4 преобразуется в переменный ток высокой частоты напряжением U_5 . Высокочастотный трансформатор понижает напряжение U_5 до U_6 . Это напряжение используется в индукторе 5 для нагрева под закалку.

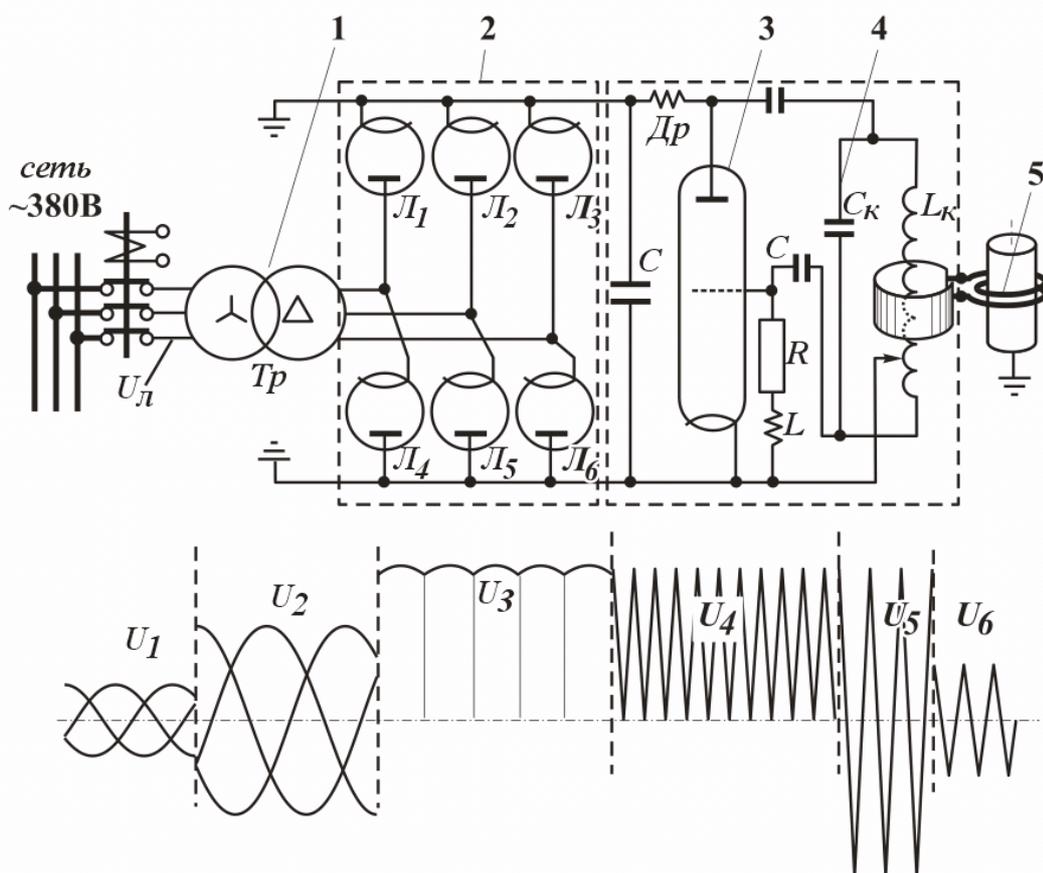


Рис. 2.3. Принципиальная схема лампового генератора и диаграмма напряжений

Основные характеристики ламповых генераторов представлены в табл. 2.1 .

Таблица 2.1

Технические характеристики ламповых установок, применяемых для закалки ТВЧ

Тип установки	Мощность, кВт	Частота, МГц	Тип генераторной лампы	Габаритные размеры установки, м	Расход охлаждающей воды, л/мин
В2Г1-60/0,066	60	0,066	ГУ-66А	2,7×1,5×2,3	25
В2Г1-100/0,066	100	0,066	ГУ-68А	3,0×1,8×2,3	40
В2Г3-160/0,066	160	0,066	ГУ-68А	4,0×3,0×2,3	60

Индукционный нагрев металла происходит в индукторе, который является одним из основных элементов высокочастотной установки, в значительной мере определяющий КПД установки и форму закалённого слоя. Индуктор представляет собой катушку из медных трубок круглого или прямоугольного сечения. Необходимо, чтобы толщина стенки трубки была больше глубины проникновения тока в медь. Для индуктора, охлаждаемого водой в течение всего периода работы, толщина стенок составляет 1,5...2 мм. При спрейерной закалке, когда вода в трубки поступает только в момент охлаждения, толщину стенок активной части индуктора принимают равной 4...6 мм; индуктор в этом случае делают литым или свар-

ным из отдельных листов. Чтобы избежать замыкания витков индуктора, их изолируют асбестовым шнуром, пропитанным жидким стеклом.

При установке детали в индуктор необходимо соблюдать равномерность зазора A (рис. 2.4). Не допускается касание детали и индуктора при нагреве.

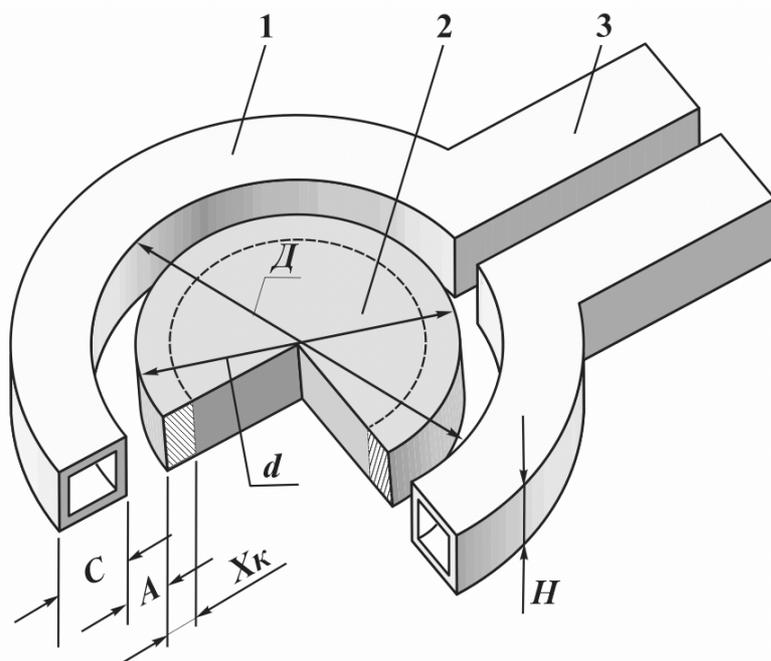


Рис. 2.4. Система индуктор–деталь: 1 – индуктор, 2 – деталь, 3 – шина, H – высота индуктора, C – ширина индуктора, A – воздушный зазор, X_k – нагретый слой детали

Ряд конструкций индукторов для высокочастотного нагрева деталей показан на рис. 2.5 .

Поверхностная закалка разнообразных деталей получила широкое распространение. Это вызвало необходимость иметь большое разнообразие закалочных станков, установок и приспособлений. На многих заводах такие установки полностью автоматизированы, и нагрев деталей ТВЧ введён в производственный поток.

В комплект универсальной закалочной установки входит следующее оборудование: закалочная головка с соответствующим типизированным закалочным трансформатором; конденсаторная батарея; исполнительный механизм с приводами и системой технологического охлаждения водой или эмульсией; пульт управления приводами исполнительного механизма, индукционным нагревом и охлаждением с приборами для контроля режима закалки.

При сквозном нагреве необходимо получить достаточно однородную структуру по всему сечению нагреваемого изделия, что возможно при минимальном перепаде температур между поверхностью и центром изделия. Поскольку глубина проникновения тока сравнительно невелика, в особенности при нагреве до температур ниже точки Кюри, решающее значение в получении минимального температурного перепада приобретает теплопроводность материала изделия, вследствие чего скорость нагрева должна быть относительно небольшой. Следует, однако, иметь в виду, что по сравнению с нагревом в печах и ваннах сквозной индукционный нагрев осуществляется, как правило, в десятки и даже сотни раз быстрее.

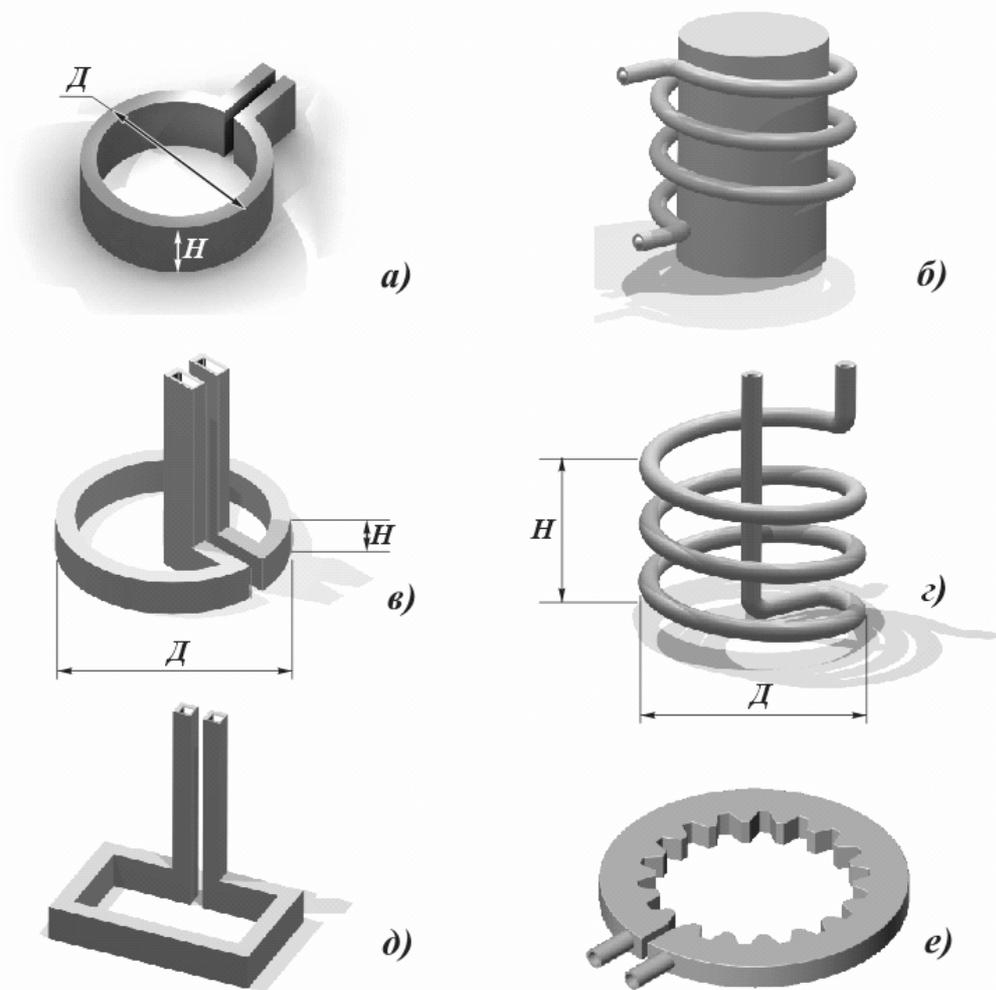


Рис. 2.5. Индукторы для нагрева ТВЧ: *a, в* – одновитковые индукторы для нагрева наружных и внутренних поверхностей цилиндрических деталей; *б, г* – многовитковые индукторы для нагрева наружных и внутренних поверхностей цилиндрических деталей; *д* – петлевой индуктор для нагрева плоских поверхностей деталей; *е* – индуктор фасонной формы для нагрева шестерён

Следовательно, основным достоинством сквозного индукционного нагрева по сравнению с обычным печным нагревом является бóльшая скорость нагрева, благодаря которой удаётся повысить качество обрабатываемых изделий.

Довольно высокие скорости нагрева в области фазового превращения, меньшее время пребывания изделия в интервале температур аустенитизации и отсутствие выдержки по достижении конечной температуры нагрева предотвращают рост зерна аустенита при нагреве и приводят к меньшему окислению поверхностных слоёв нагреваемого изделия. Однако последнее справедливо лишь в том случае, если перед сквозным индукционным нагревом изделие не имело окалины (образующейся в результате предварительной горячей обработки). По тем же причинам при сквозном индукционном нагреве обезуглероживание незначительно по сравнению с печным нагревом.

- Сквозной индукционный нагрев может быть осуществлён тремя способами:
- поддержанием в процессе нагрева постоянного напряжения на индукторе (обычный нагрев);
 - поддержанием в процессе нагрева постоянной температуры на поверхности изделия (ускоренный нагрев);
 - чередованием нагрева с паузами (ступенчатый нагрев).

Сквозной индукционный нагрев изделий под различные операции термической обработки может осуществляться как одновременным, так и последовательным методами. При этом непрерывно-последовательный метод нагрева под закалку и отпуск, благодаря узкой зоне нагрева и лучшим условиям охлаждения движущегося изделия, обеспечивает наименьшие из возможных деформацию и поводку, особенно на таких изделиях, как трубы, листы, прутки. Схема проходного индуктора для сквозного нагрева приведена на рис. 2.6 .

Индуктор представляет собой соленоид 1 из профилированной медной трубки, залитый в огнеупорную пористую массу 3. При нагреве коротких деталей (с длиной меньше, чем длина индуктора) их перемещение осуществляется по направляющим 2. Длинные прутки круглого или квадратного сечения передвигаются с помощью роликов, установленных с обеих сторон индуктора. Ток повышенной частоты подводится к индуктору по шинам. В процессе работы индуктор охлаждается водой, пропускаемой по трубке 1 соленоида. При нагреве заготовок сечением 20 мм и более число индукторов может достигать 6...8 на одну установку.

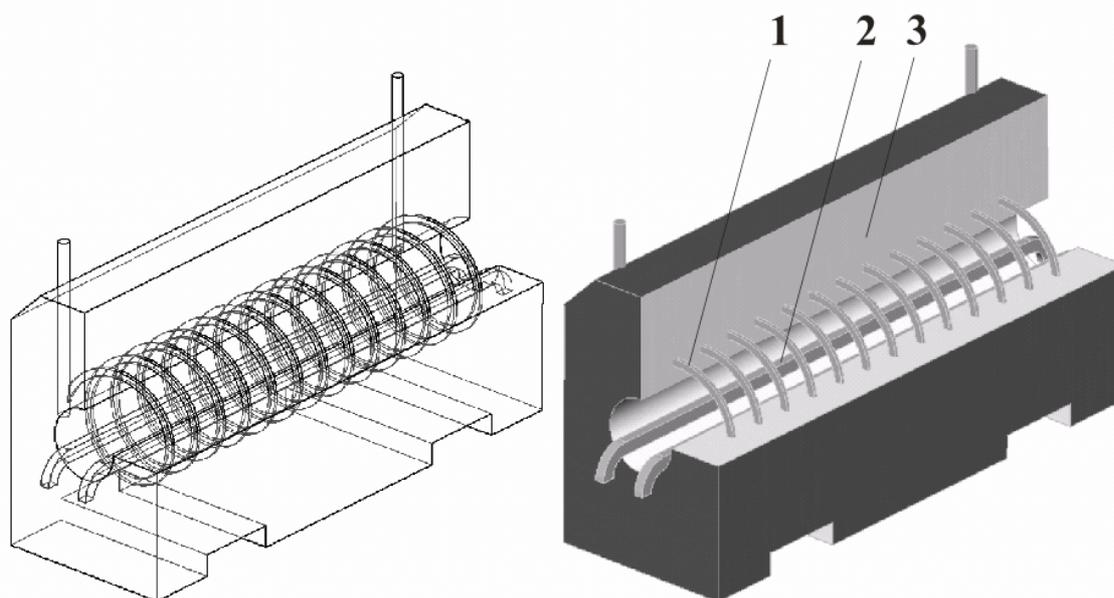


Рис. 2.6. Схема проходного индуктора с теплоизоляцией из жаростойкого бетона: 1 – водоохлаждаемая спираль из медных трубок; 2 – направляющие полозки; 3 – пористая огнеупорная масса

3. РАСЧЁТ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО ГРАФИКАМ А.Е. СЛУХОЦКОГО

3.1. Расчёт цилиндрического индуктора

Расчёт индуктора складывается из теплового и электрического расчётов, результаты которых представлены на рис. 3.1–3.6. Результаты теплового расчета нагрева представлены на графиках 3.1–3.3, из которых можно определить время нагрева t_k и требуемую удельную мощность p_0 в зависимости от диаметра нагреваемого цилиндра D_2 и глубины закалённого слоя x_k . Результаты электрического расчёта представлены на графиках рис. 3.4 –3.6, из которых можно определить ток в индукторе и напряжение на его зажимах.

Все тепловые расчеты выполнены для конструкционных углеродистых сталей при температуре поверхности, равной 900 °С [6].

При других температурах поверхности значения времени нагрева и удельной мощности могут значительно отличаться от приведённых на графиках 3.1–3.3.

Ориентировочно можно принять, что отклонение температуры поверхности на ± 50 °С от исходного значения 900 °С приводит к изменению времени нагрева примерно в 1,7 раза в обратном направлении и удельной мощности примерно в 1,5 раза в прямом направлении по отношению к величинам, найденным из графиков. Эти же графики могут быть использованы для определения времени нагрева и удельной мощности при других частотах.

Для поверхностной термообработки изделий малого диаметра режимы нагрева приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Зависимость времени нагрева и удельной мощности от диаметра цилиндра и глубины закалённого слоя при $f \geq 440$ кГц [7]

D_2 , см	x_k , см					
	0,1		0,2		0,5	
	t_k , с	p_0 , кВт/см ²	t_k , с	p_0 , кВт/см ²	t_k , с	p_0 , кВт/см ²
0,5	0,77	0,85	—	—	—	—
1,0	1,47	0,8	3,14	0,416	4,25	0,33
1,5	1,6	0,8	4,53	0,408	6,9	0,28
2,0	1,9	0,8	5,9	0,39	8,5	0,28

Примечание: x_k – глубина закалённого слоя; D_2 – диаметр цилиндра; t_k – время нагрева и p_0 – удельная мощность.

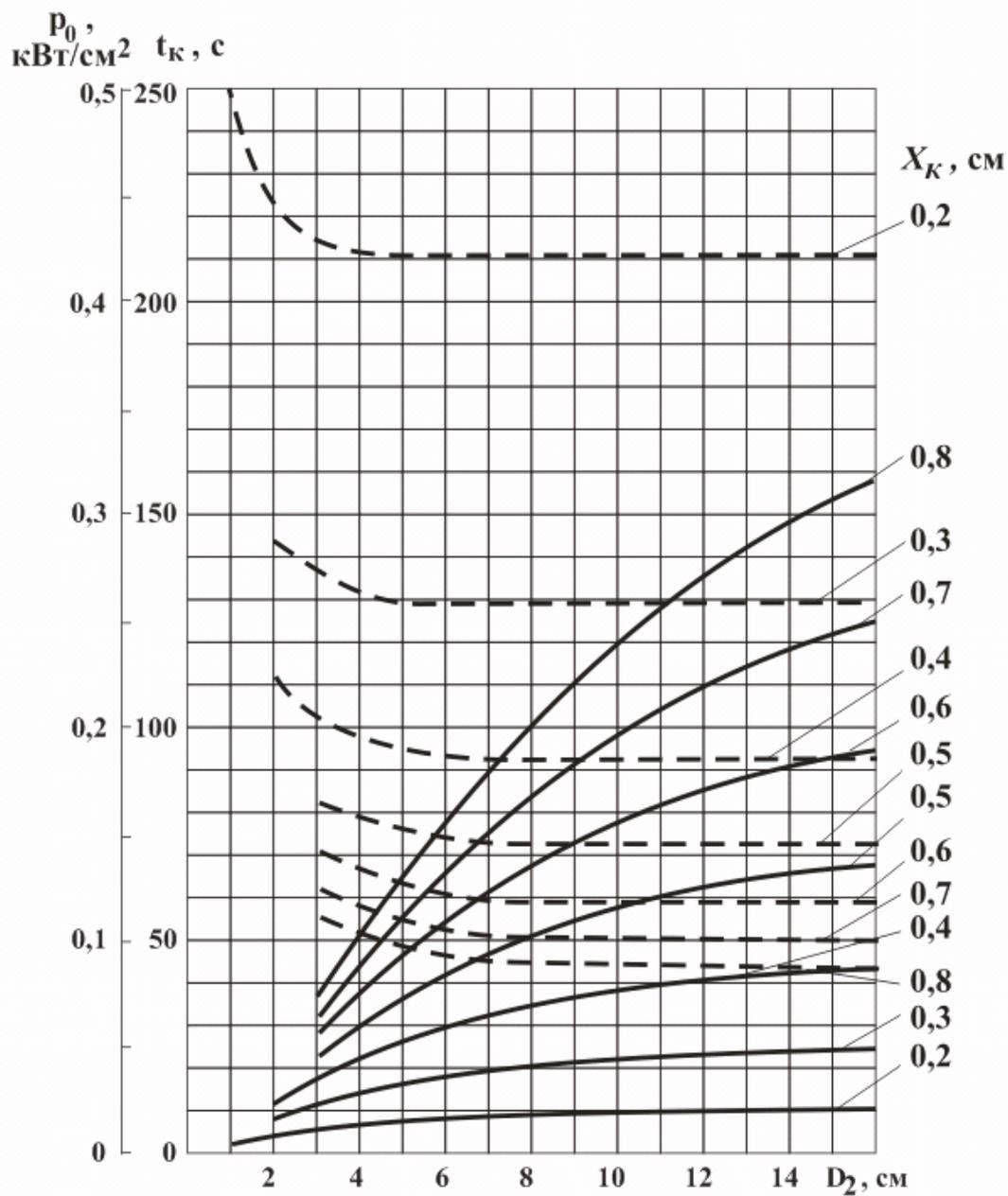


Рис. 3.1. Зависимость времени нагрева t_k (сплошные линии) и удельной мощности p_0 , сообщаемой детали (штриховые линии), от диаметра D_2 нагреваемого цилиндра при частоте, равной и большей 250 кГц (цифры на кривых указывают глубину закалённого слоя x_k , см)

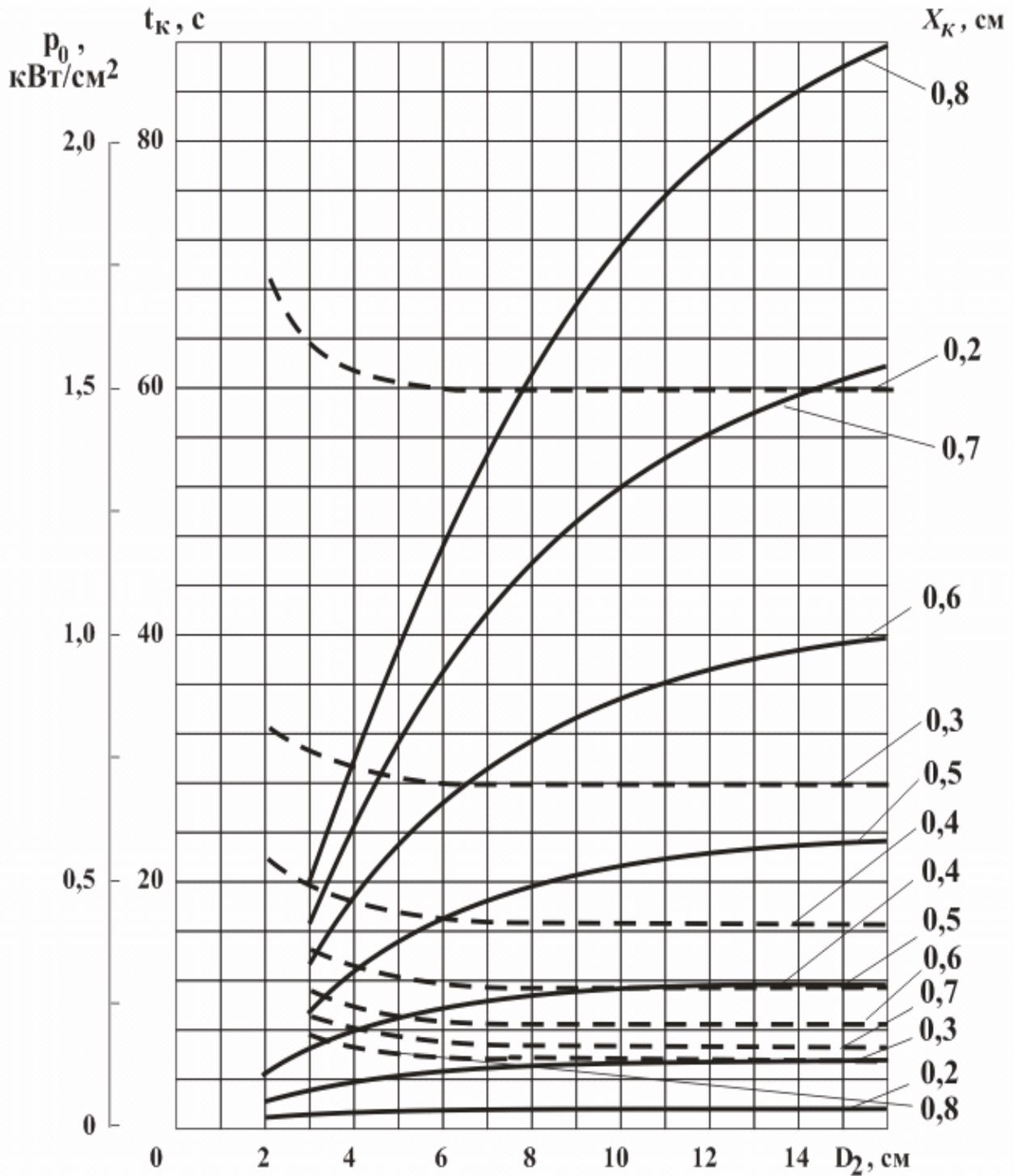


Рис. 3.2. Зависимость времени нагрева t_k (сплошные линии) и удельной мощности p_0 , сообщаемой детали (штриховые линии), от диаметра D_2 нагреваемого цилиндра при частоте тока 10 000 Гц (цифры на кривых указывают глубину закалённого слоя в см)

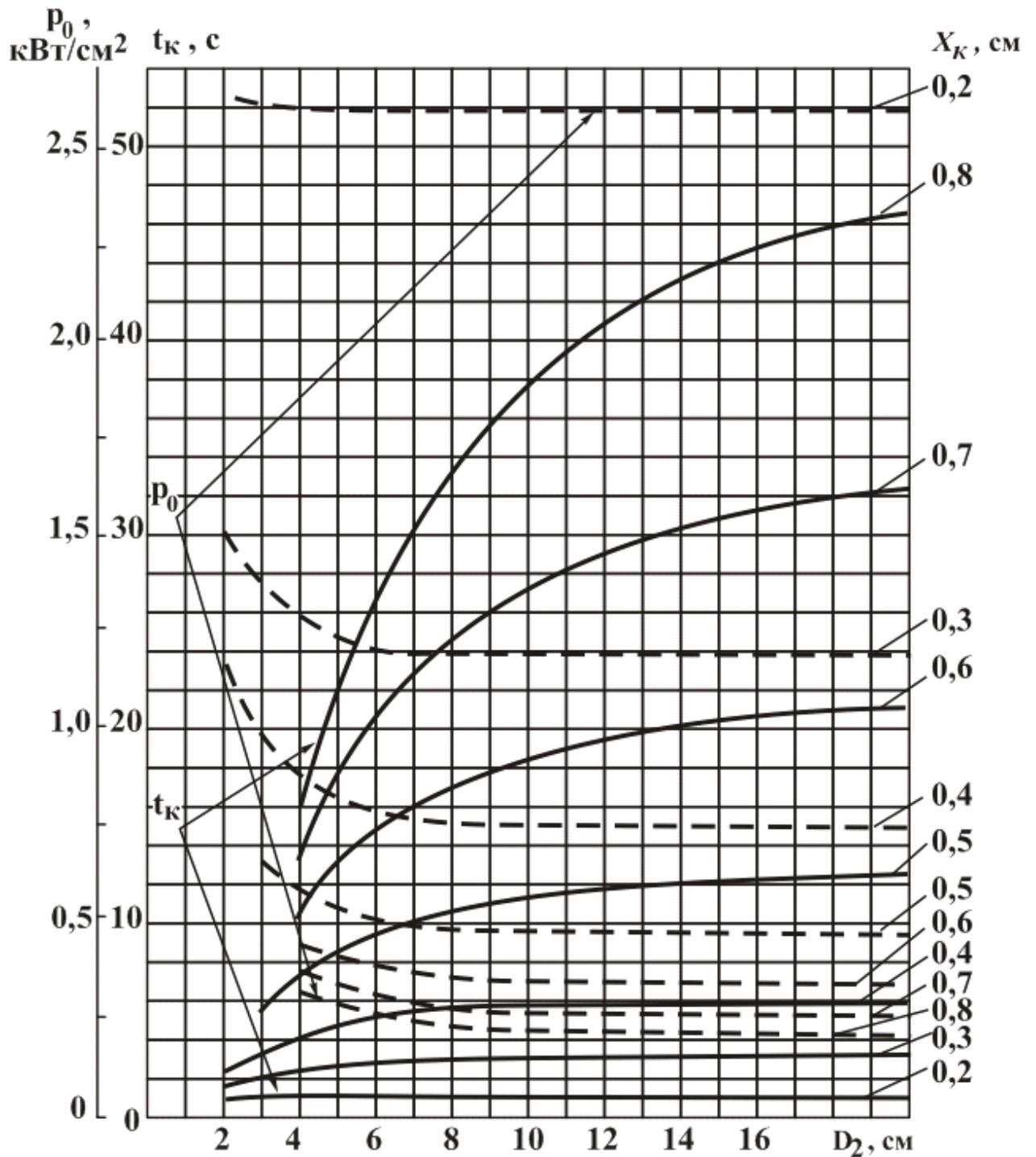


Рис. 3.3. Зависимость времени нагрева t_k (сплошные линии) и удельной мощности p_0 , сообщаемой детали (штриховые линии), от диаметра D_2 нагреваемого цилиндра при частоте тока 2500 Гц (цифры на кривых указывают глубину закалённого слоя в см)

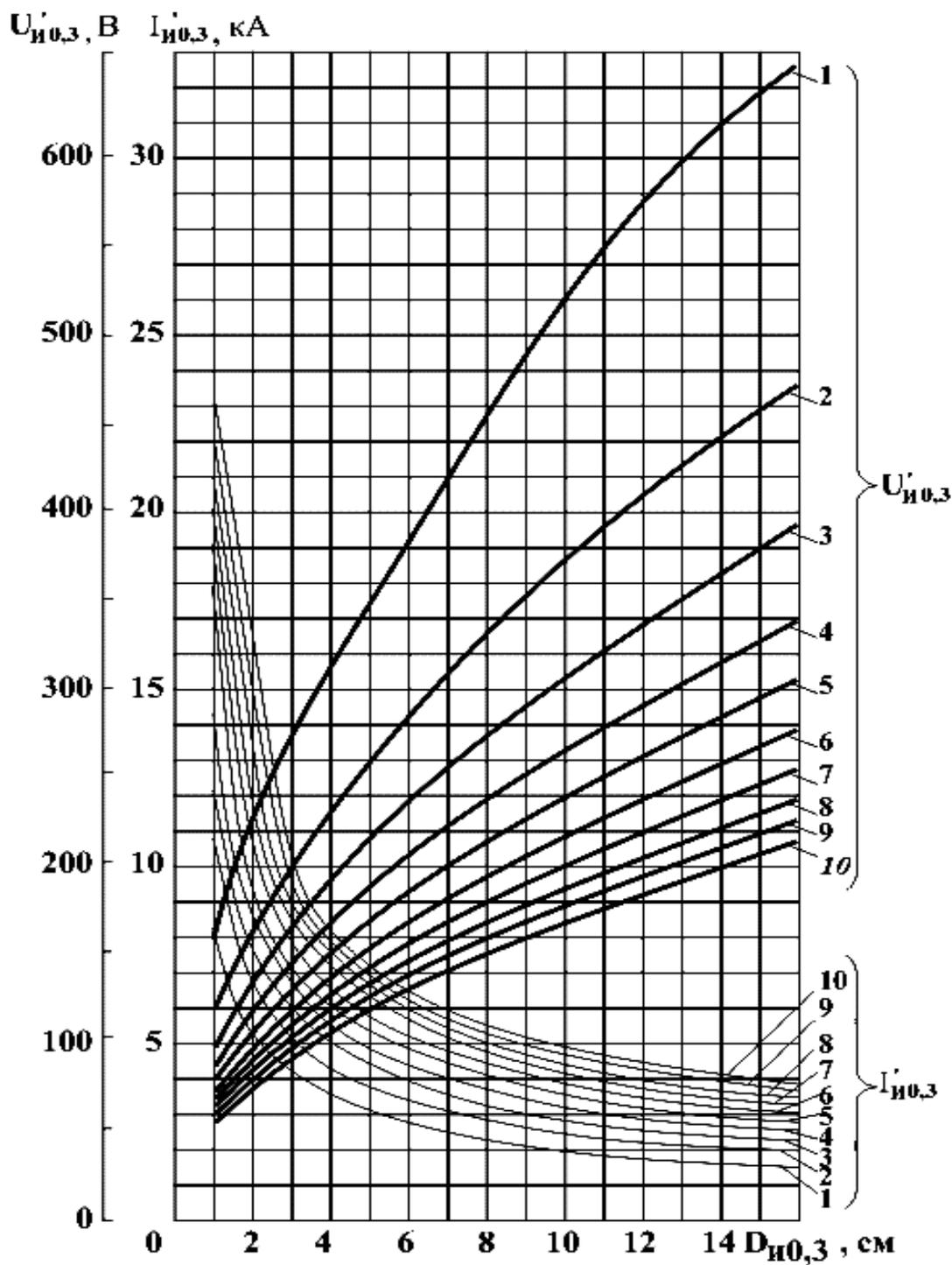


Рис. 3.4. Зависимость напряжения на индуктирующем проводе $U'_{И0,3}$ и тока в индукторе $I'_{И0,3}$ при частоте тока 440 кГц и мощности 100 кВт, подводимой к индуктору, от диаметра одновиткового индуктора $D_{И0,3}$. Зазор между индуктором и нагреваемой деталью принят равным 0,3 см (цифры на кривых указывают высоту индуктирующего провода)

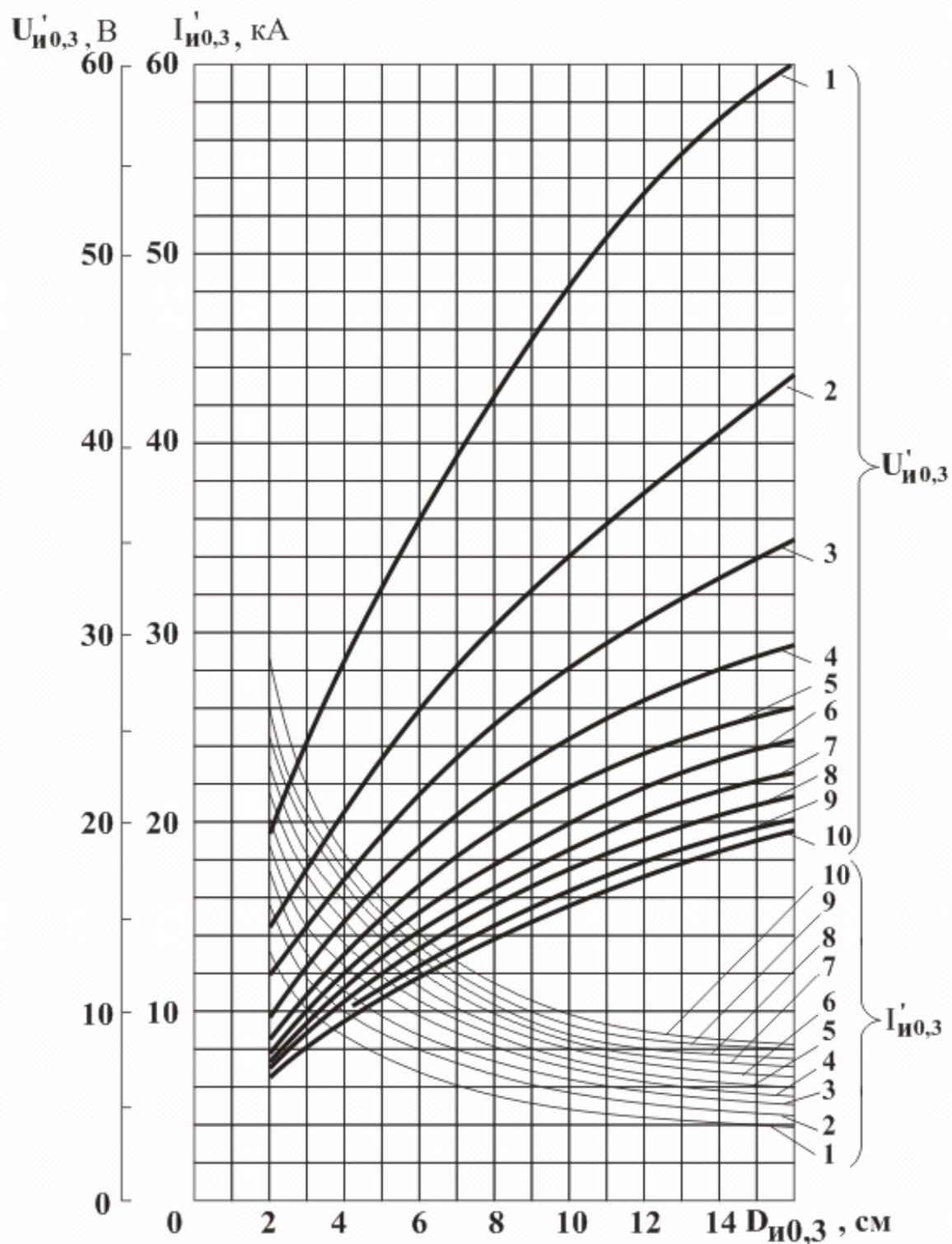


Рис. 3.5. Зависимость напряжения на индуктирующем проводе $U'_{И0,3}$ и тока в индукторе $I'_{И0,3}$ при частоте тока 10 000 Гц и мощности 100 кВт, подводимой к индуктору, от диаметра одно-виткового индуктора $D_{И0,3}$. Зазор между индуктором и нагреваемой деталью принят равным 0,3 см (цифры на кривых указывают высоту индуктирующего провода)

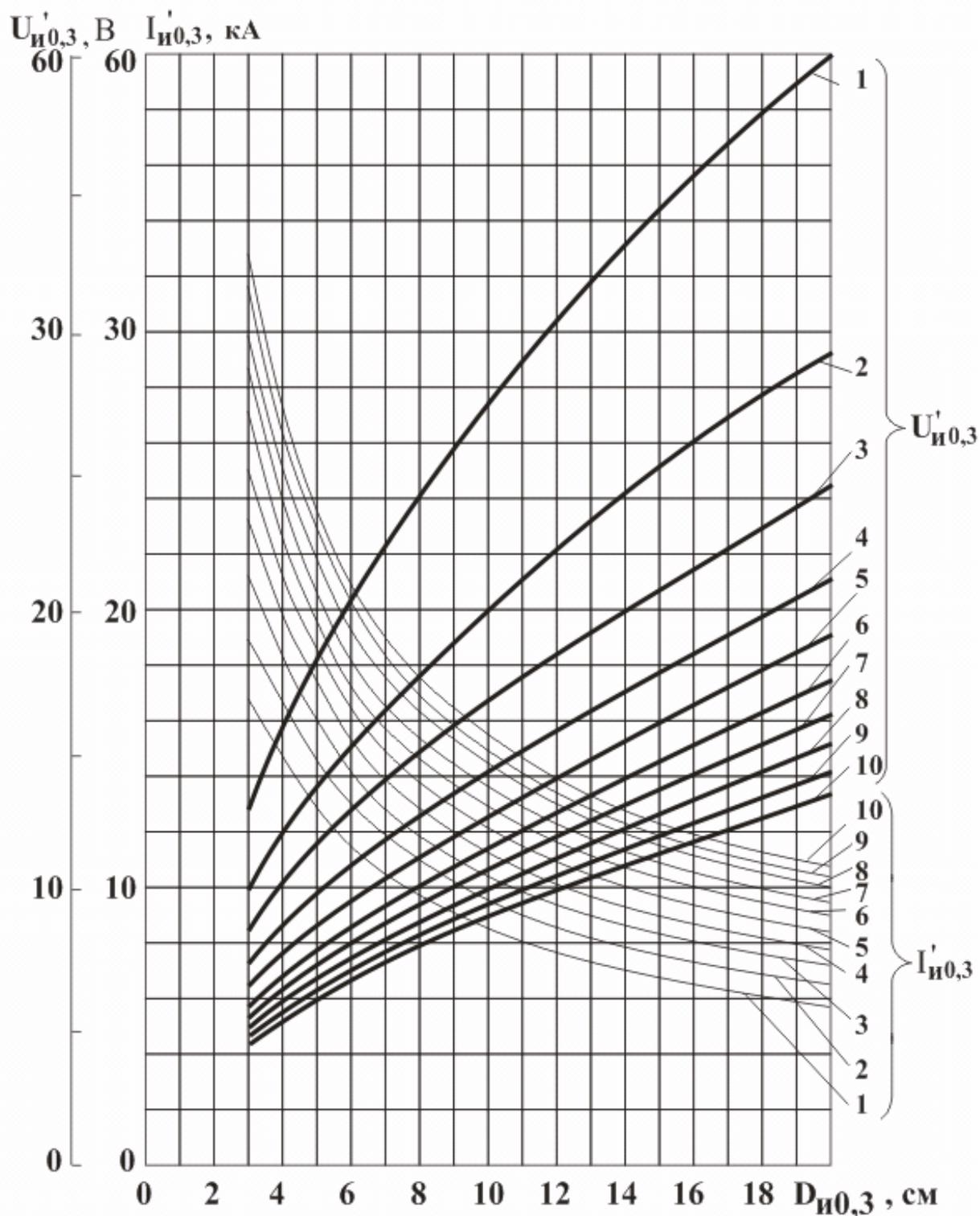


Рис. 3.6. Зависимость напряжения на индуктирующем проводе $U'_{и0,3}$ и тока в индукторе $I'_{и0,3}$ при частоте тока 2500 Гц и мощности 100 кВт, подводимой к индуктору, от диаметра одновиткового индуктора $D_{и0,3}$. Зазор между индуктором и нагреваемой деталью принят равным 0,3 см (цифры на кривых указывают высоту индуктирующего провода)

Для получения времени нагрева при частоте 70 кГц соответствующее его значение, полученное из рис. 3.1, следует разделить на 1,2. Удельная мощность, наоборот, увеличивается также в 1,2 раза. Время нагрева и удельная мощность при частоте 8000 Гц с большой точностью могут быть получены из графиков, приведённых на рис. 3.2, умножением значения t_k на 0,9 и p_0 на 1,08. При частоте 4000 Гц время нагрева, найденное для частоты 2500 Гц (см. рис. 3.3), умножается на 1,25, а удельная мощность на 0,83.

Во всех случаях удельная мощность вычислена без учёта отвода теплоты в осевом направлении, что с достаточно большой точностью справедливо при одновременном нагреве всей поверхности детали. При нагреве участка поверхности или при непрерывно-последовательном способе нагрева необходимо полученную из графиков удельную мощность увеличить в 1,2 раза.

Электрический расчёт проведён для частот 440 кГц, 10 000 и 2500 Гц при подводимой к индуктору мощности 100 кВт. При частоте 440 кГц принято, что всё сечение детали прогрето выше точки магнитных превращений. Это не вносит в расчёты ощутимых ошибок при глубине закалённого слоя больше 1 мм, так как горячая глубина проникновения вихревого тока в деталь при такой частоте составляет доли миллиметра и прогрев на большие глубины осуществляется за счёт теплопроводности. При частотах 10 000 и 2500 Гц в качестве средних данных принята глубина закалённого слоя, равная половине глубины проникновения тока в сталь, нагретую выше точки магнитных превращений (точки Кюри), а относительная магнитная проницаемость – равная 16.

На рис. 3.4 – 3.6 приведены значения тока в индукторе и напряжения на его зажимах в зависимости от диаметра индуктора при различной его высоте H (см. рис. 2.4). Зазор между индуктором и деталью принят равным 0,3 см.

Если необходимо определить ток и напряжение при других частотах, мощности и зазорах, можно пользоваться следующими формулами:

$$U_{и0,3} = 0,1 \cdot U'_{и0,3} \sqrt{P_{и}} (f/f_{баз})^{2/3}, \quad (3.1)$$

$$I_{и0,3} = 0,1 \cdot I'_{и0,3} \sqrt{P_{и}} (f/f_{баз})^{2/3}, \quad (3.2)$$

где $U_{и0,3}$ – напряжение на зажимах индуктора при мощности $P_{и}$, частоте f и зазоре 0,3 см; $U'_{и0,3}$ – то же, но при мощности 100 кВт и частоте $f_{баз}$, соответствующей одному из рис. 3.4 – 3.6; $I_{и0,3}$ – ток в индукторе при мощности $P_{и}$, частоте f и зазоре 0,3 см; $I'_{и0,3}$ – то же, но при мощности 100 кВт и частоте $f_{баз}$; $f_{баз}$ – частота, соответствующая одному из рис. 3.4 – 3.6.

При пересчёте выбирается частота, наиболее близкая к требуемой частоте f . В наиболее интересных для практики случаях имеем формулы пересчёта: при неизменной частоте:

$$U_{и0,3} = 0,1 \cdot U'_{и0,3} \sqrt{P_{и}}; \quad I_{и0,3} = 0,1 \cdot I'_{и0,3} \sqrt{P_{и}}; \quad (3.3)$$

с частоты 440 кГц на частоту 70 кГц:

$$U_{и0,3} = 0,0294 U'_{и0,3} \sqrt{P_{и}}; \quad I_{и0,3} = 0,158 \cdot I'_{и0,3} \sqrt{P_{и}}; \quad (3.4)$$

с частоты 10 000 Гц на частоту 8000 Гц:

$$U_{и0,3} = 0,0862 U'_{и0,3} \sqrt{P_{и}}; \quad I_{и0,3} = 0,106 \sqrt{P_{и}}; \quad (3.5)$$

с частоты 2 500 Гц на частоту 4 000 Гц:

$$U_{и0,3} = 0,137 U'_{и0,3} \sqrt{P_{и}}; \quad I_{и0,3} = 0,0889 I'_{и0,3} \sqrt{P_{и}}. \quad (3.6)$$

Если зазор h между внутренней поверхностью индуктора и наружной поверхностью детали отличается от 0,3 см, то следует пользоваться формулами перехода:

$$U_{и} = U_{и0,3} \cdot (h/0,3)^n; \quad (3.7)$$

$$I_{и} = I_{и0,3} \cdot (D_{и}/D_{и0,3})^{4/3}, \quad (3.8)$$

где h – принятый зазор, см; $D_{и} = D_2 + 2h$ – действительный диаметр индуктора; $D_{и0,3}$ – диаметр индуктора при $h = 0,3$ см.

Показатель степени n зависит от частоты тока, так как активные и внутренние реактивные электрические сопротивления, а также электросопротивление рассеяния имеют различную зависимость от частоты.

В таблице 3.2 приведены значения n в зависимости от частоты тока.

Таблица 3.2

Значения коэффициента n в зависимости от частоты электрического тока

f , кГц	70 и выше	8...10	4	2,5
n	3/4	1/2	1/3	1/4

Расчёт производится в следующей последовательности.

1. По заданным частоте f , диаметру детали D_2 и требуемой глубине закалённого слоя x_k определяем время нагрева t_k и удельную мощность p_0 .

При частотах 250 кГц и выше используются кривые, приведенные на рис. 3.1, при 70 кГц t_k и p_0 умножаются на соответствующие коэффициенты, как было указано выше. При частотах 10 000 и 2500 Гц используются кривые, приведённые на рис. 3.2 и 3.3, соответственно. Переход к частотам 8000 и 4000 Гц осуществляется по соответствующим формулам пересчёта.

2. Определяем мощность, подводимую к индуктору:

$$P_{и} = p_0 \cdot \pi D_2 H / 0,75, \quad (3.9)$$

где $P_{и}$ – мощность, подводимая к индуктору, кВт; p_0 – удельная мощность, кВт/см²; D_2 – диаметр детали, см; H – высота индуктора, см; 0,75 – средний КПД индуктора.

Если нагревается участок поверхности или применяется непрерывно-последовательный нагрев, удельная мощность, полученная из рис. 3.1–3.3, увеличивается в 1,2 раза.

3. Определяем напряжение на индукторе и ток.

Внутренний диаметр индуктора при зазоре между индуктором и деталью, равном 0,3 см, составит: $D_{и0,3} = D_2 + 0,6$ см.

Из рис. 3.4 – 3.6 определяем напряжение $U'_{и0,3}$ и ток $I'_{и0,3}$, полученные при подведённой к индуктору мощности 100 кВт, при частотах 440, 10 и 2,5 кГц, соот-

ветственно. Если к индуктору подведена мощность, отличающаяся от 100 кВт, и частота не равна указанной на рисунках, то пересчёт напряжения и тока осуществляется по общим формулам (3.4 –3.6). В частных случаях пересчёта на другую мощность без изменения частоты, а также пересчёта с частоты 440 на 70 кГц, с 10 000 на 8000 Гц и с частоты 2500 на 4000 Гц можно пользоваться более простыми формулами (3.3 –3.6).

Если зазор h не равен 0,3 см, то для перехода к действительному зазору следует пользоваться формулами (3.7) и (3.8).

4. Определяем число витков индуктора. Если задано напряжение на вторичной обмотке закалочного трансформатора U_2 , то число витков индуктора равно

$$w = U_2/U_{и}, \quad (3.10)$$

где $U_{и}$ – напряжение на одновитковом индукторе.

Если число витков получается дробным, то округляем его в меньшую сторону, так как расчёт не учитывает падения напряжения на подводящих шинах.

Ток в индукторе и вторичной обмотке трансформатора равен

$$I_2 = I_{и}/w, \quad (3.11)$$

где $I_{и}$ – ток в одновитковом индукторе.

5. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi_{и} = P_{и}/(U_{и} \cdot I_{и}). \quad (3.12)$$

Пример расчёта цилиндрического индуктора:

первый при частоте 440 кГц, второй – при 70 кГц и третий – 4000 Гц.

Исходные данные для всех расчётов одинаковы.

1. Дано: диаметр детали $D_2 = 5$ см; глубина закалённого слоя детали $x_k = 0,3$ см, высота индуктора $H = 3$ см, зазор между внутренней поверхностью индуктора и наружной поверхностью детали $h = 0,5$ см, частота тока $f = 440$ кГц, напряжение на вторичной обмотке закалочного трансформатора $U_2 = 300$ В.

Определить: время нагрева t_k ; мощность, подводимую к индуктору $P_{и}$, напряжение $U_{и}$ и ток в индукторе $I_{и}$, коэффициент мощности индуктора $\cos \varphi_{и}$.

1. Из рис 3.1 находим: $t_k = 17,5$ с; $p_0 = 0,26$ кВт/см².

2. Определяем мощность, подводимую к индуктору (см. формулу 3.9),

$$P_{и} = 0,26 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 3 / 0,75 = 16,3 \text{ кВт.}$$

3. Имеем условный диаметр индуктора $D_{и0,3} = 5,6$ см. Из кривых, приведённых на рис. 3.4, находим:

$$U'_{и0,3} = 232 \text{ В; } I'_{и0,3} = 4050 \text{ А.}$$

При мощности 16,3 кВт получим, пользуясь формулами 3.3:

$$U_{и0,3} = 0,1 \cdot 232 \sqrt{16,3} = 93,7 \text{ В;}$$

$$I_{и0,3} = 0,1 \cdot 4050 \sqrt{16,3} = 1635 \text{ А.}$$

В действительности зазор $h = 0,5$ см и $D_{и} = 6$ см. Тогда имеем (см. формулы 3.7 и 3.8 и табл. 3.2):

$$U_{и} = 93,7(0,5/0,3)^{3/4} = 137 \text{ В; } I_{и} = 1635(6/5,6)^{4/3} = 1793 \text{ А.}$$

4. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi_{\text{и}} = 16300 / (137 \cdot 1793) = 0,0664.$$

5. Если напряжение на вторичной обмотке закалочного трансформатора $U_2=300$ В, то индуктор должен иметь несколько витков: $w = 300/137 \approx 2$; тогда напряжение на индукторе будет ($w \cdot U_{\text{и}}$) равно $2 \cdot 137 = 274$ В и ток в индукторе ($I_{\text{и}}/w$): $1793/2 = 897$ А.

С помощью этих расчётов определяется напряжение на индуктирующем проводе. Падение напряжения на токоподводящих шинах индуктора в среднем составляет 15...25% от напряжения одновиткового индуктора. При использовании многовитковых индукторов им можно пренебречь.

Если при выбранном зазоре между индуктором и деталью ламповый генератор не возбуждается при холодной детали, то следует увеличить зазор до 6...8 мм.

II. Частота $f = 70$ кГц.

$$t_{\text{к}} = 17,5/1,2 = 14,6 \text{ с}; p_0 = 1,2 \cdot 0,26 = 0,312 \text{ кВт/см}^2.$$

$$P_{\text{и}} = 0,312 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 3 / 0,75 = 19,6 \text{ кВт.}$$

Приняв $U'_{\text{и}0,3} = 232$ В и $I'_{\text{и}0,3} = 4050$ А, по формулам 3.3 находим:

$$U_{\text{и}0,3} = 0,0294 \cdot 232 \sqrt{19,6} = 30,2 \text{ В}; \text{ и } I_{\text{и}0,3} = 0,158 \cdot 4050 \sqrt{19,6} = 2833 \text{ А.}$$

Так как зазор $h = 0,5$ см, имеем:

$$U_{\text{и}} = 30,2(0,5/0,3)^{3/4} = 44,4 \text{ В}; I_{\text{и}} = 2833(6/5,6)^{4/3} = 3106 \text{ А.}$$

$$\cos \varphi_{\text{и}} = 19600 / (44,4 \cdot 3106) = 0,142.$$

III. Частота $f = 4000$ Гц.

Из рис. 3.3 находим: $t_{\text{к}} = 2,6$ с; $p_0 = 1,24$ кВт/см² при частоте 4000 Гц получим:

$$t_{\text{к}} = 1,25 \cdot 2,6 = 3,25 \text{ с}; p_0 = 0,83 \cdot 1,24 = 1,03 \text{ кВт/см}^2.$$

1. $P_{\text{и}} = 1,03 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 3 / 0,75 = 64,7$ кВт.

2. Из рис. 3.6 находим:

$$U'_{\text{и}0,3} = 12,3 \text{ В}; I'_{\text{и}0,3} = 14\,500 \text{ А.}$$

По формулам 3.3 получим

$$U_{\text{и}0,3} = 0,137 \cdot 12,3 \sqrt{64,7} = 13,6 \text{ В}; \text{ и } I_{\text{и}0,3} = 0,0868 \cdot 14\,500 \sqrt{64,7} = 10\,120 \text{ А.}$$

Если зазор $h = 0,5$ см, и $D_{\text{и}} = 6$ см, то имеем:

$$U_{\text{и}} = 13,6(0,5/0,3)^{1/3} \approx 16,1 \text{ В}; I_{\text{и}} = 10120(6/5,6)^{4/3} = 11\,100 \text{ А.}$$

4. $\cos \varphi_{\text{и}} = 64700 / (16,1 \cdot 11\,100) = 0,362.$

Из трёх рассмотренных вариантов расчёта лучший результат получен при использовании тока с частотой 4000 Гц.

При расчётах принималось, что закалке способом одновременного нагрева подвергается вся поверхность цилиндра длиной 3 см. Если высота индуктора H меньше длины цилиндра, то, как указывалось выше, мощность увеличивается в 1,2 раза. При средних частотах закалочные индукторы почти всегда делаются одновитковыми.

Если закалке подвергается шестерня или подобная ей по форме деталь, то при электрическом расчёте в качестве диаметра детали следует принять диаметр начальной окружности. Тогда зазор будет равен полуразности внутреннего диаметра индуктора и диаметра начальной окружности шестерни. Точность этого расчёта ниже, чем предыдущих, но он всё же может быть использован как ориентировочный.

3.2. Расчёт индукторов для закалки плоских поверхностей

Индукторы для закалки плоских поверхностей (см. рис. 2.5d) выполняются в виде плоских спиралей или одиночных витков, располагающихся над нагреваемой поверхностью. Индуктированный ток вследствие эффекта близости концентрируется под индуктором. При неподвижном индукторе можно наблюдать появление нагретой зоны, форма которой повторяет конфигурацию индуктора. В любой точке нагреваемой плоскости ток индуктируется прямой и обратной ветвями индуктора. Вследствие этого результирующий ток оказывается ослабленным по сравнению с индуктируемым одной ближайшей ветвью, что приводит к уменьшению мощности, сообщаемой нагреваемой поверхности, и к уменьшению электрического КПД индуктора. Поэтому расстояние между прямой и обратной ветвями индуктора должно быть больше четырех зазоров между индуктором и нагреваемой поверхностью. Однако при такой конструкции индуктора ширина нагретой зоны относительно велика, что не всегда допустимо. Магнитное сопротивление по пути замыкания магнитного потока в воздухе велико, что приводит к падению КПД.

Ток в индуктирующем проводе одновиткового индуктора в результате совместного действия кольцевого эффекта и эффекта близости частично протекает по стороне, обращённой к нагреваемой поверхности, и частично по внутренней боковой поверхности витка. Это усиливает магнитное поле в промежутке между проводами индуктора. Иногда индуктирующий провод выполняют в виде зигзага, расположенного над нагреваемой поверхностью.

Если требуется получить узкую нагретую зону, то можно обратные ветви индуктора расположить над прямыми, сделав их для уменьшения потерь значительно шире индуктирующего провода. Тогда при достаточном расстоянии токопроводы практически не будут индуктировать ток в нагреваемой поверхности. Ток в индуктирующем проводе под влиянием кольцевого эффекта будет частично стягиваться на внутреннюю поверхность. К этому случаю относится всё сказанное об индукторах для нагрева внутренних поверхностей. Кольцевой эффект ослабляется по мере удаления обратной ветви, но при этом в ней возрастают активные потери. КПД таких индукторов обычно бывает меньше 60 %. В этом случае следует применять индукторы с П-образными магнитопроводами, выполненными из листов электротехнической стали или феррита, и надетыми на прямой индуктирующий провод (рис. 3.7). Магнитопровод обращён открытой стороной паза к нагреваемой поверхности. Индуктированный ток концентрируется под пазом магнитопровода. Длина нагретой полосы примерно равна длине магнитопровода.

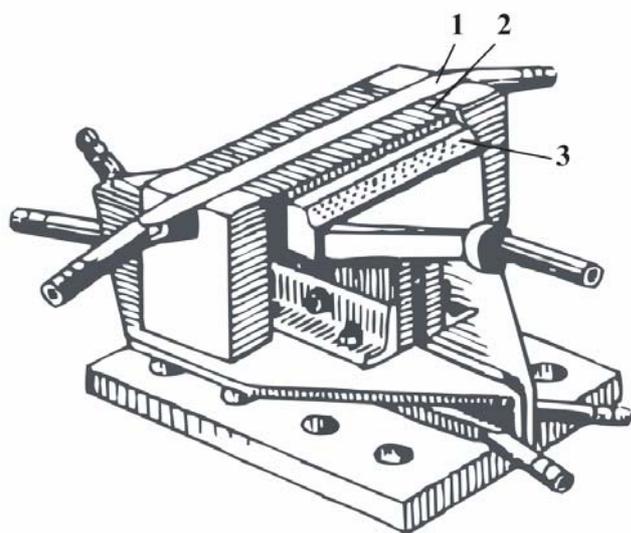


Рис. 3.7. Индуктор с магнитопроводом для закалки плоской поверхности непрерывно-последовательным способом:
1 – индуктирующий провод;
2 – П-образный магнитопровод;
3 – душирующее устройство для подачи закалочной воды

На рис. 3.8–3.10 приведены зависимости времени нагрева и удельной мощности от толщины плоской детали для различных глубин закалённого слоя при высокой частоте и частотах 8000...10 000 и 2500 Гц, вычисленные для конструкционной стали при температуре нагрева поверхности 900 °С [6].

Ориентировочно можно принять, что отклонение температуры поверхности на ± 50 °С от исходного значения 900 °С приводит к изменению времени нагрева примерно в 1,7 раза в обратном направлении и удельной мощности примерно в 1,5 раза в прямом направлении по отношению к величинам, найденным из графиков. Используя эти графики и формулы пересчёта, можно определить время нагрева и удельную мощность при других частотах.

Эти же зависимости с несколько меньшей точностью могут быть использованы и для случая нагрева внутренних поверхностей. Если плоская деталь нагревается с двух сторон, то в качестве d при пользовании графиками следует брать половину её толщины. Как указывалось выше, при отклонении температуры поверхности от 900 °С на ± 50 °С время нагрева изменяется примерно в 1,7 раза, а удельная мощность в 1,5 раза.

Удельную мощность и время нагрева для частоты 4000 Гц можно получить из рис. 3.10, умножив время нагрева на 1,25, а мощность на 0,83.

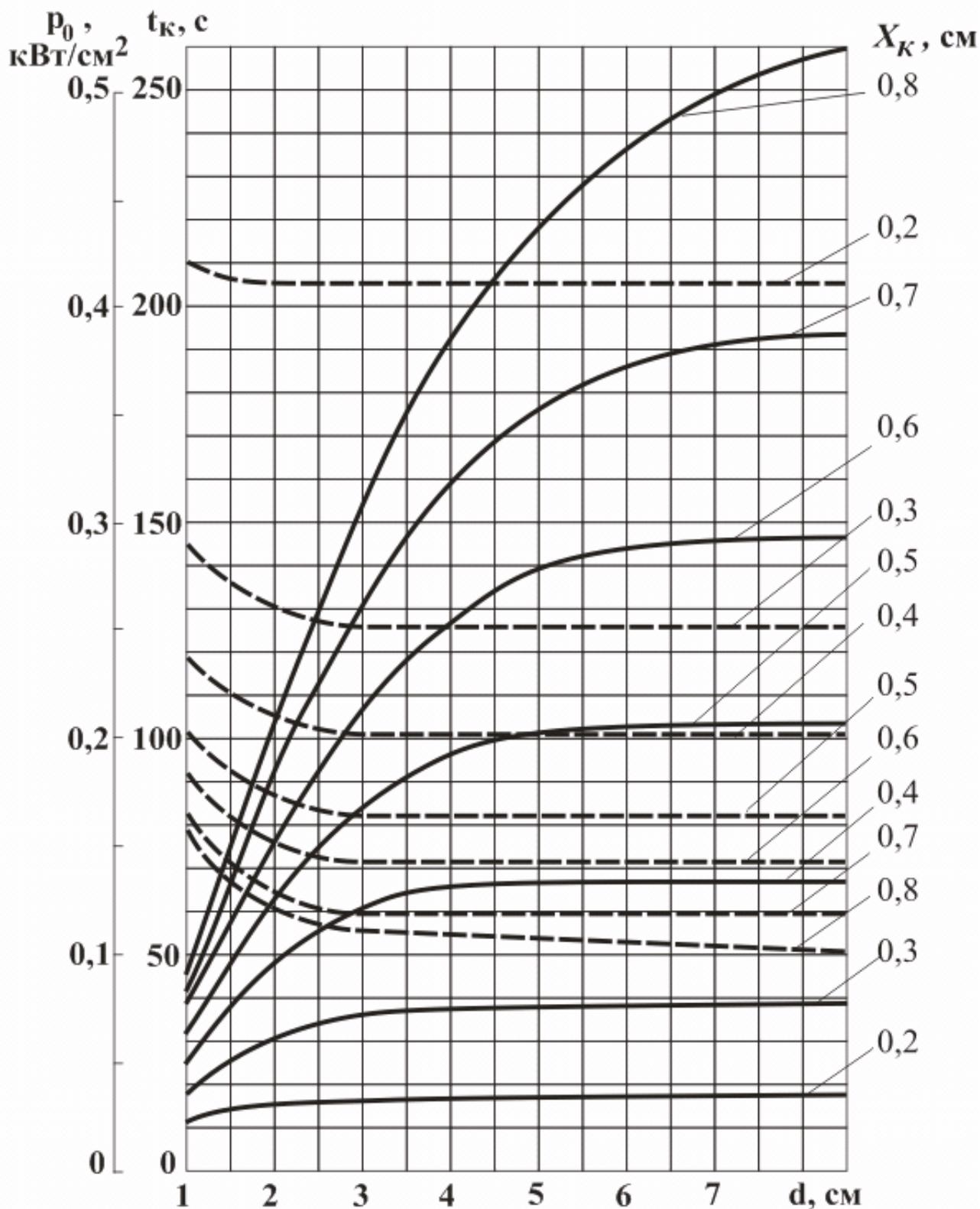


Рис. 3.8. Зависимость времени нагрева t_k (сплошные линии) и удельной мощности p_0 , сообщаемой детали (штриховые линии), от толщины плоской детали d при частоте тока, большей и равной 250 кГц (цифры на кривых указывают глубину закалённого слоя в см)

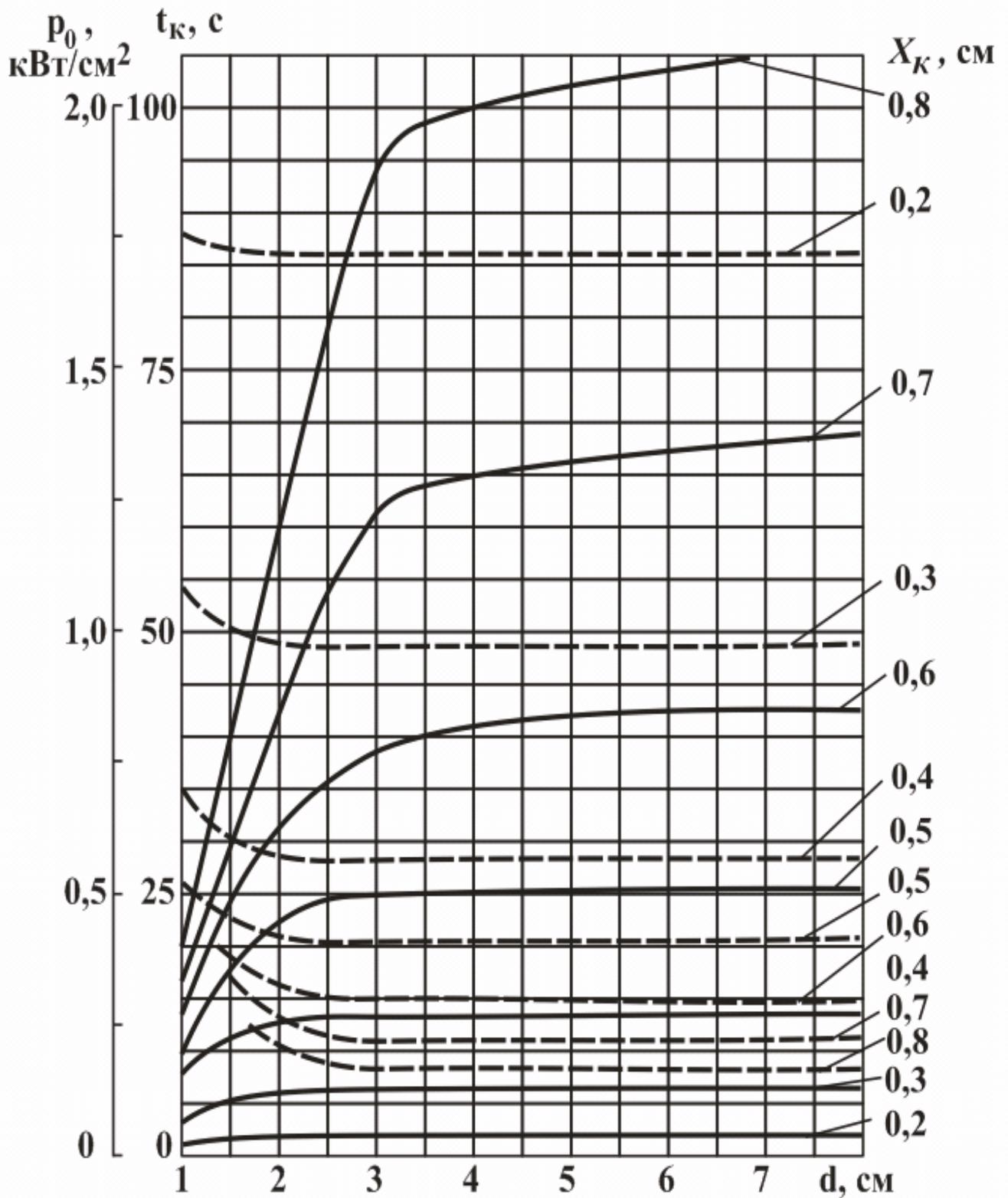


Рис. 3.9. Зависимость времени нагрева t_k (сплошные линии) и удельной мощности p_0 , сообщаемой детали (штриховые линии), от толщины плоской детали d при частотах тока 8000...10 000 Гц (цифры на кривых указывают глубину закалённого слоя в см)

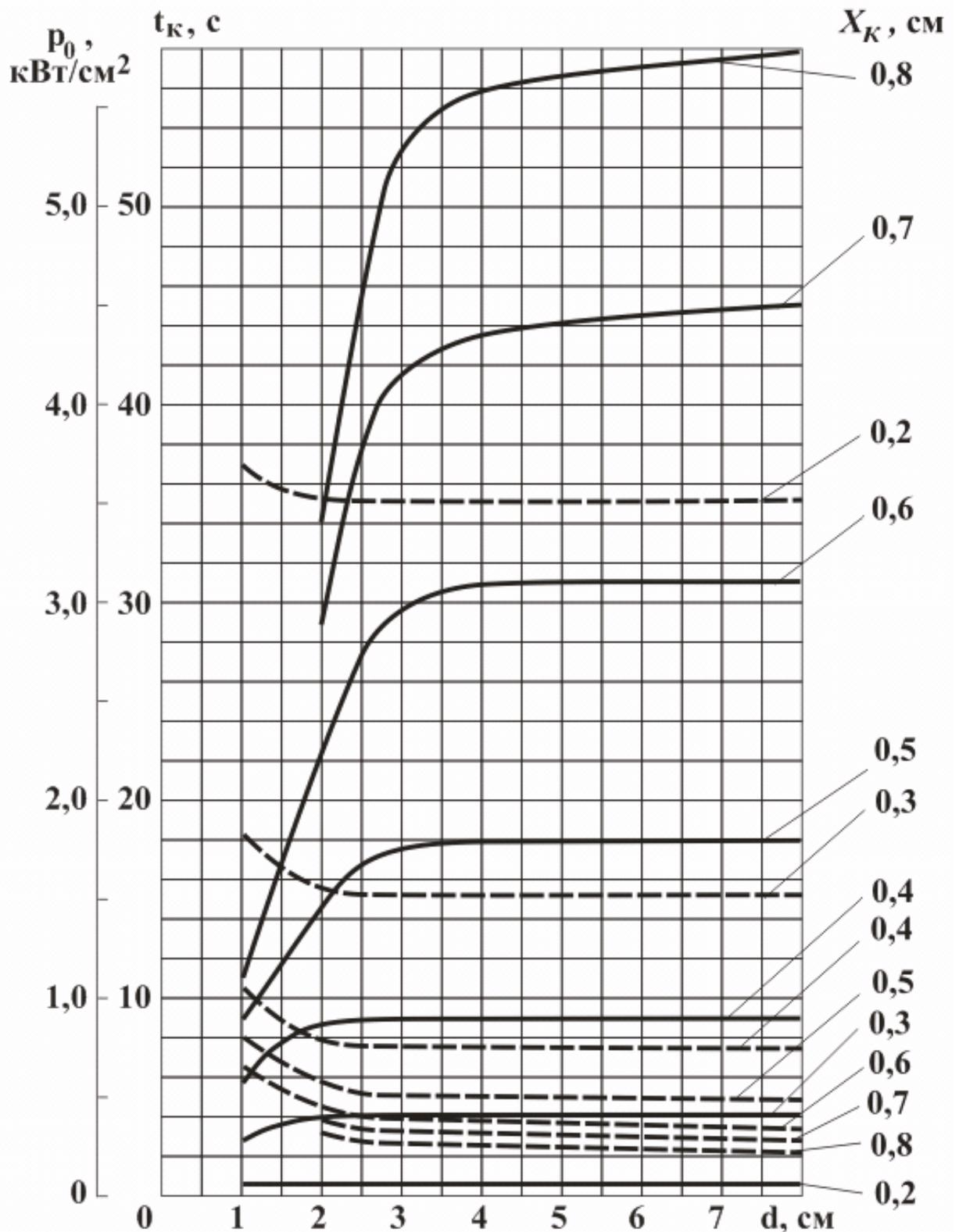


Рис. 3.10. Зависимость времени нагрева t_k (сплошные линии) и удельной мощности p_0 , сообщаемой детали (штриховые линии), от толщины плоской детали d при частоте тока 2500 Гц (цифры на кривых указывают глубину закалённого слоя в см)

На рис. 3.14 приведён эскиз плоского индуктора, на котором указаны условные обозначения, использованные в приводимой ниже схеме приближённого расчёта.

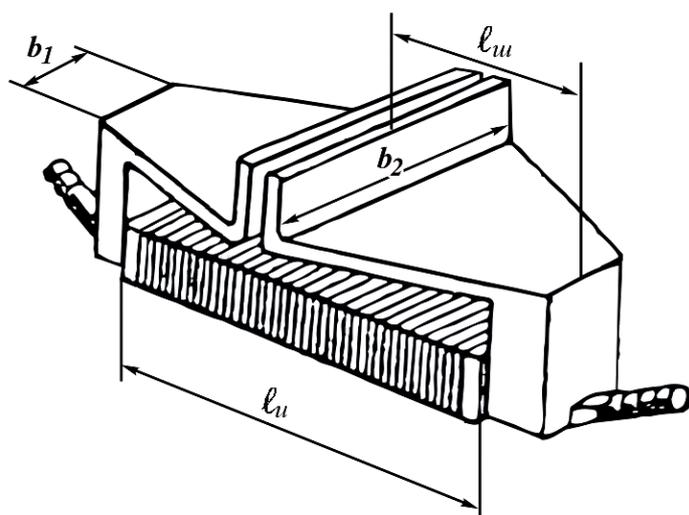


Рис. 3.11. Эскиз индуктора с магнитопроводом для закалки плоской поверхности детали непрерывно-последовательным способом:
 – $\ell_{\text{и}}$ длина индуктирующего провода;
 – $\ell_{\text{ш}}$ длина горизонтального участка токоподводящей шины;
 – b_1 ширина шины в конце токоподвода;
 – b_2 ширина шины в начале токоподвода

Теоретические расчёты и эксперименты показали, что для различных индукторов при определённых частоте и удельной мощности напряжение на единицу длины индуктирующего провода и ток, рассчитанный на единицу длины паза, при зазорах 4...6 мм колеблются в сравнительно небольших пределах.

В среднем можно считать, что при удельной мощности 1 кВт/см² будем иметь: при частоте 10 000 Гц:

$$U_0 = 1,45 \text{ В/см}, \quad I_0 = 2400 \text{ А/см};$$

при частоте 8000 Гц:

$$U_0 = 1,3 \text{ В/см}, \quad I_0 = 2500 \text{ А/см};$$

при частоте 4000 Гц:

$$U_0 = 0,93 \text{ В/см}, \quad I_0 = 3000 \text{ А/см};$$

при частоте 2500 Гц:

$$U_0 = 0,75 \text{ В/см}, \quad I_0 = 3400 \text{ А/см},$$

где U_0 – напряжение на 1 см длины индуктирующего провода при удельной мощности 1 кВт/см²; I_0 – ток на 1 см ширины паза в магнитопроводе при удельной мощности 1 кВт/см².

Если рассчитывается индуктор для закалки плоской детали, то достаточно рассчитать только реактивное сопротивление подводящих шин. Активным сопротивлением их можно пренебречь, так как ширина шин обычно много больше ширины индуктирующего провода. При этом имеет смысл рассчитывать реактивное сопротивление только горизонтального участка, которое значительно больше, чем сопротивление остальных участков.

При вычислении полного напряжения на индукторе напряжения на индуктирующем проводе и на шинах складываются арифметически, что, однако, не даёт большой ошибки вследствие низкого коэффициента мощности индуктора.

КПД таких индукторов находится в пределах 75...88 %. Для расчёта обычно принимают КПД равным 80 %.

В качестве примера рассчитаем индуктор для закалки непрерывно-последовательным способом плоского изделия шириной 69 и толщиной 4 см на глубину 0,6 см при частоте тока 2500 Гц.

1. Из кривых (рис. 3.10) находим значение времени нагрева t_k и удельной мощности p_0 :

$$t_k = 31 \text{ с} , p_0 = 0,36 \text{ кВт/см}^2.$$

2. Определяем ширину паза в магнитопроводе:

$$a = 0,64 \cdot P_{\Gamma} / (\ell_H \cdot p_0) ,$$

где a – ширина паза в магнитопроводе, см; P_{Γ} – мощность генератора, кВт; ℓ_H – длина закалённой полосы, примерно равная длине магнитопровода (ℓ_u), см.

Пусть задана мощность генератора $P_{\Gamma} = 100$ кВт, тогда получаем

$$a = 0,64 \cdot 100 / (69 \cdot 0,36) \approx 2,5 \text{ см}.$$

3. Ширина индуктирующего провода определяется

$$b = a - 2 \cdot \Delta b ,$$

где b – ширина индуктирующего провода, см; Δb – толщина изоляции, принимаемая равной 0,15 см с каждой стороны:

$$b = 2,5 - 2 \cdot 0,15 = 2,2 \text{ см}.$$

4. Высота индуктирующего провода выбирается из наличия сортамента круглых трубок, из которых изготавливается прямоугольная трубка для провода. При этом нужно иметь в виду, что для пропускания воды высота трубки в свету не должна быть меньше 0,5 см.

5. Ширина башмака магнитопровода C принимается равной

$$C = (0,30 \dots 0,75) \cdot a = 0,75 \dots 1,87 \text{ см}.$$

6. Напряжение на индуктирующем проводе:

$$U = \ell_H \cdot U_0 \sqrt{p_0} ; U = 69 \cdot 0,75 \sqrt{0,36} = 31 \text{ В}.$$

7. Ток в индукторе:

$$I_H = a \cdot I_0 \sqrt{p_0} ; I_H = 2,5 \cdot 3400 \sqrt{0,36} = 5100 \text{ А}.$$

8. Определяем реактивное сопротивление токоподводящих шин с размерами

$$\ell_{ш} = 34,4 \text{ см}; b_1 = 4 \text{ см}; b_2 = 18,5 \text{ см}.$$

Реактивное сопротивление обоих горизонтальных участков токоподводящих шин индуктора, изображённого на рис. 3.11, можно вычислить по формуле

$$x_{ш} = 2,5 \cdot 10^{-8} f \ell_{ш} \left(2,3 \lg \frac{4 \ell_{ш}}{b' + \Delta_1} + 0,5 \right), \quad (3.13)$$

где $x_{ш}$ – реактивное сопротивление обоих горизонтальных участков токоподводящих шин, Ом; f – частота тока, Гц; $\ell_{ш}$ – длина одного горизонтального участка токоподводящих шин, см; Δ_1 – глубина проникновения тока в медь зависит от применяемой частоты тока (принята, равной 0,14 см, см. табл. 1.1), $b' = (b_1 + b_2)/2$, – эквивалентная ширина шины см.

Размер b_2 обычно определяется длиной контактной колодки понижающего трансформатора:

$$b' = (18,5 + 4,0)/2 = 11,25 \text{ см};$$

$$x_{ш} = 2,5 \cdot 10^{-8} \cdot 2500 \cdot 34,4 \left(2,3 \lg \frac{4 \cdot 34,4}{11,25 + 0,14} + 0,5 \right) \approx 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

9. Падение напряжения на токоподводящих шинах $U_{ш} = x_{ш} \cdot I_{и}$:

$$U_{ш} = 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5100 = 33,1 \text{ В.}$$

10. Напряжение на индукторе $U_{и} = U_{ш} + U$:

$$U_{и} = 31,0 + 33,1 = 64,1 \text{ В.}$$

11. Мощность, подводимая к индуктору $P_{и} = p_0 I_{и} \cdot a / \eta_{и}$,
где $\eta_{и}$ – КПД индуктора, равный 0,8:

$$P_{и} = 0,36 \cdot 69 \cdot 2,5 / 0,8 = 77,5 \text{ кВт.}$$

12. Коэффициент мощности индуктора $\cos \varphi_{и} = P_{и} / U_{и} \cdot I_{и}$:

$$\cos \varphi_{и} = 77500 / (64,1 \cdot 5100) = 0,24.$$

4. УПРАЖНЕНИЯ

Упражнение № 1

Определение основных характеристических величин при поверхностном скоростном нагреве ТВЧ углеродистой стали

Цель – овладение упрощёнными методами определения численного значения характеристических величин скоростного поверхностного высокочастотного нагрева стали.

Исходные данные. Стальная цилиндрическая деталь (0,4 % С вес.) наружным диаметром d , длиной ℓ , нагрета на глубину x_k от начальной комнатной температуры t_H^0 до заданной конечной температуры t_K^0 за время τ (рис. 4.1).

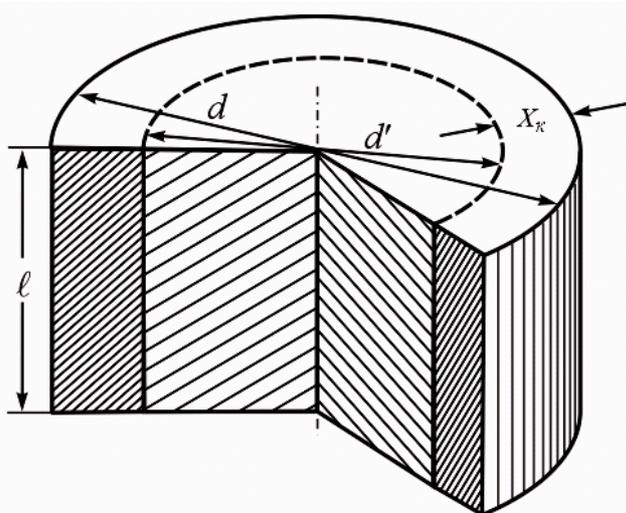


Рис. 4.1. Характер расположения температурных зон при чётко выраженном поверхностном нагреве цилиндрической детали

О п р е д е л и т ь:

– массу нагретого слоя, m ;

– мощность, необходимую для осуществления идеального нагрева изделия, P ;

– удельную мощность нагрева, p_0 ;

- частоту тока, f ;
- экономичность поверхностного нагрева ТВЧ по сравнению со сквозным нагревом под закалку, n ;
- тип генератора ТВЧ.

Методические указания

При выполнении упражнения приняты следующие допущения:

- деталь, наружным диаметром d , греется вся одновременно по всей длине ℓ (см. рис. 4.1);
- температура в нагретом слое толщиной x_k по всей толщине слоя одинакова и равна t_k^0 ;
- КПД процесса нагрева слоя x_k условно принят равным 100 %.

Масса нагретого слоя определяется по формуле (4.1)

$$m = \left[\frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi (d - 2x_k)^2}{4} \right] \cdot \ell \cdot \gamma \quad (4.1)$$

после преобразования формулы 4.1 получим

$$m = \pi \cdot x_k (d - x_k) \cdot \ell \cdot \gamma, \text{ г}, \quad (4.2)$$

где γ – удельный вес стали (принять равным $7,8 \text{ г/см}^3$).

Мощность, необходимая для осуществления идеального процесса нагрева (то есть когда греется только слой x_k , а сердцевина остается холодной), определяется по формуле

$$P = \frac{m \cdot c_p (t_k^0 - t_n^0)}{\tau}, \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

где c_p – удельная теплоёмкость, τ – время нагрева, с .

Удельная мощность нагрева (плотность мощности) определяется по формуле

$$p_o = \frac{P}{S_{\text{бок}}} = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot \ell}, \text{ Вт/см}^2, \quad (4.4)$$

где $S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности детали в зоне нагрева, берётся в см^2 .

Экономичность поверхностного нагрева по сравнению со сквозным нагревом под закалку (отпуск) до этой же температуры можно определить по формуле

$$n = \frac{0,25}{K(1 - K)}, \quad (4.5)$$

где K — отношение глубины закалённого слоя x_k к диаметру детали d .

Коэффициент n показывает, во сколько раз меньше потребляется энергии при поверхностном нагреве и последующей закалке только на глубину x_k по сравнению со сквозным нагревом и последующей закалкой на эту же глубину x_k .

Исходные данные к расчёту цилиндрического индуктора берут из таблицы приложения 1.

Тип генератора ТВЧ, обеспечивающего заданный процесс нагрева, определяют из таблиц приложений 2, 3, 4. По таблицам приложений 2 и 3, сообразуясь с глубиной нагреваемого слоя x_k и диаметром изделия d , подбирают частоту f , затем вычисляют оптимальную частоту по формуле

$$f_{\text{расч}} = \frac{50^2}{x_k}, \text{ Гц}, \quad (4.6)$$

где x_k – глубина закалённого слоя в см.

Производят сравнение выбранных по таблицам приложения и вычисленных теоретических значений частот и принимают обоснованное окончательное решение в выборе некоторой стандартной частоты в качестве оптимальной (f_{opt}). Пусть это будет частота 63 КГц. Как видно из таблиц приложений 2, 3 и 4, такую частоту вырабатывают ламповые генераторы типа ВЧИ, ВЧГ и ЛЗ либо тиристорные преобразователи типа ВТГ. Для выбора конкретного типа генератора следует в первую очередь учесть вычисленное значение необходимой мощности нагрева, P . Пусть вычисленное значение $P = 27,3$ кВт. В таблице приложения 4 нет генераторов ТВЧ с частотой 63 кГц и мощностью 27,3 кВт, а есть генераторы мощностью 5, 10, 25, 40 кВт и ещё с большей мощностью.

Выбираем генератор типа ВЧИ – 40/0,07-3П. Рекомендуются всегда выбирать генератор несколько большей мощности, чем расчётное значение.

Выбор варианта задания производится по таблице приложения 1, рассчитанной на 30 различных вариантов.

Пример. Задан вариант АЗ.

Здесь А обозначает индекс вертикальной графы, в которой надо искать все цифровые данные варианта. Цифра З обозначает № строки диаметров детали (в данном случае $d = 35$ мм). Остальные параметры берутся согласно пунктам 2-10 графы А таблицы приложения 1.

Отчёт о выполненной работе

В отчёт включается: порядковый номер задания, наименование и цель работы, теоретические положения, пронумерованные и подписанные рисунки, схемы, исходные данные, ход и результаты расчётов, ответы на вопросы, поставленные в задаче.

Вопросы для контроля подготовки к работе

1. Каковы физические основы индукционного нагрева металлической детали?
2. По какому закону распределяется ТВЧ по сечению нагреваемой стальной детали?
3. Напишите формулу глубины проникновения ТВЧ в нагреваемое изделие для холодного и горячего режимов и расшифруйте её.
4. По какой формуле определяется величина удельной мощности при нагреве?
5. Какова роль теплопроводности металла при нагреве от внешнего и внутреннего источника тепла?

Упражнение № 2

Определение оптимальной частоты и глубины нагрева ТВЧ стальной цилиндрической детали при поверхностной закалке с самоотпуском

Цель – приобретение начальных навыков определения оптимальных параметров поверхностного высокочастотного нагрева при термообработке деталей.

Исходные данные. Стальную цилиндрическую деталь радиусом R , нагретую ТВЧ на глубину δ до температуры t_K^0 , нужно закалить на глубину X_K (см. рис. 4.2а) с таким условием, чтобы после резкого однократного охлаждения поверхностного слоя толщиной X_K до температуры t_H^0 (закалка на мартенсит) часть тепла, оставшаяся в слое толщиной β , распределяясь с одинаковой скоростью как наружу, так и внутрь детали на глубину X_K , произвела разогрев (самоотпуск) закалённого слоя до заданной температуры самоотпуска t_c^0 .

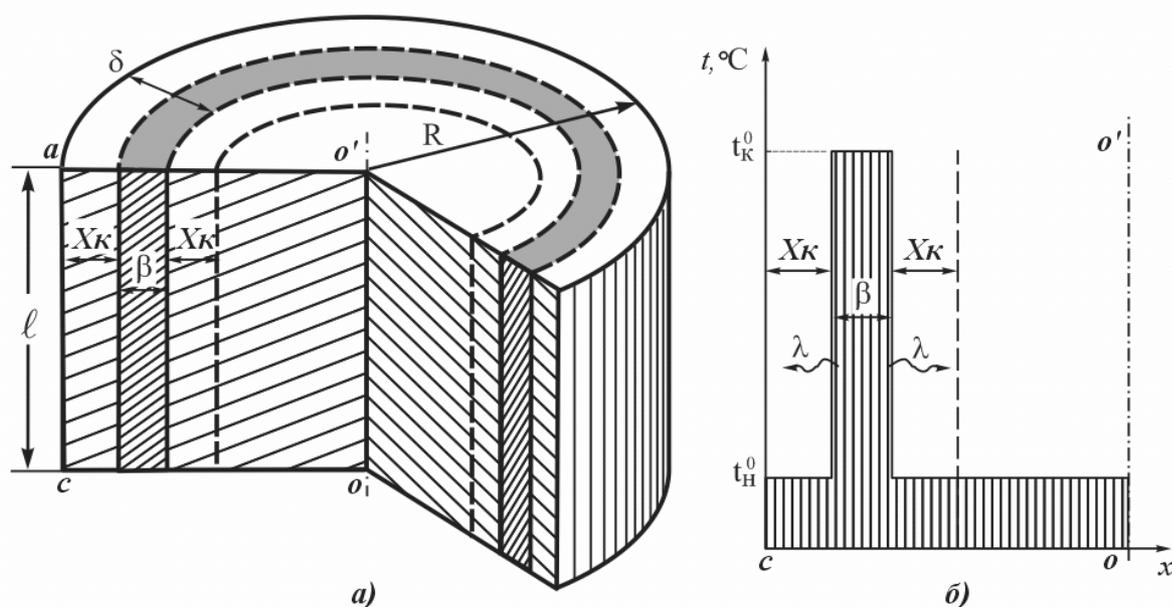


Рис. 4.2. Схемы расположения различных температурных зон при поверхностной закалке ТВЧ с самоотпуском: а – схема расположения зон; б – схема распределения температур в зонах (λ – направления отвода тепла)

О п р е д е л и т ь: на какую глубину δ следует нагреть деталь, чтобы после резкого охлаждения поверхностного слоя на глубину X_K произошел его самоотпуск до температуры t_c^0 .

Методические указания

При выполнении упражнения приняты следующие допущения:

– температура слоя толщиной δ равна t_K^0 ;

– температурные границы между слоями не плавные, а резкие как схематически показано на рис 4.2б;

– в момент перед началом самоотпуска температура закалённого слоя X_K и сердцевины детали одинакова и равна t_H^0 ;

– теплоотдачей в окружающую среду и утечкой тепла вдоль оси изделия пренебрегаем;

– считаем, что теплоёмкость слоев не зависит от температуры.

Из рис. 4.2 а,б следует, что после резкого регламентированного охлаждения поверхности детали на глубину X_K остаётся горячий слой толщиной, равной β , имеющий температуру закалочного нагрева (t_K^0). Тепло из слоя β начинает приблизительно с одинаковой скоростью распространяться как во внешние слои, так и внутрь детали, при этом слой β охлаждается, а смежные слои нагреваются также приблизительно одинаково. Когда на поверхности детали температура достигает максимального значения (t_c^0), такая же температура будет и на расстоянии X_K от слоя β вглубь к оси детали, т.е. в этот момент в слое толщиной $2X_K + \beta$ температура будет одинаковой. Это и будет максимальная температура самоотпуска (t_c^0).

Таким образом, внутренний горячий цилиндрический слой толщиной β разогрел еще два смежных с ним слоя толщиной X_K до температуры t_c^0 , а сам охладился до этой же температуры.

Так как по условию задачи обмена теплом с окружающей средой и внутренними слоями детали не происходит, то количество тепла, первоначально содержащееся в слое β , не изменилось, а осталось тем же и после достижения температуры самоотпуска в слое толщиной, равной $2X_K + \beta$.

Исходя из уравнения теплового баланса, можно написать

$$Q_\beta = Q_{(2X_K + \beta)}, \quad (4.7)$$

где Q_β – количество тепла, содержащегося в горячем цилиндрическом слое толщиной β при температуре t_K^0 ;

$Q_{(2X_K + \beta)}$ – количество тепла, содержащегося в слое толщиной $2X_K + \beta$ при температуре самоотпуска t_c^0 .

В свою очередь, учитывая, что ради упрощения начальная температура металла принята условно равной нулю, получим

$$Q_\beta = m_\beta \cdot c_P \cdot t_K^0 \quad (4.8)$$

и

$$Q_{(2X_K + \beta)} = m_{(2X_K + \beta)} \cdot c_P \cdot t_c^0, \quad (4.9)$$

где m_β и $m_{(2X_K + \beta)}$ – массы цилиндрических слоев толщиной β и $(2X_K + \beta)$, высотой ℓ , соответственно;

c_P – удельная теплоёмкость стали;

t_K^0 и t_c^0 – температуры нагрева под закалку и разогрева при самоотпуске, соответственно.

Исходя из равенства Q_β и $Q_{(2x_k+\beta)}$ для упрощения приняв $K = t_c^0/t_K^0$, а $n = R/x_k$, вычислить значение β :

$$\beta = x_k \left[\left(n + \frac{1-2K}{K-1} \right) - \left(\left(n + \frac{1-2K}{K-1} \right)^2 - 4K(n-1) \right)^{0,5} \right]. \quad (4.10)$$

Глубина нагрева $\delta_{гор}$ (см. рис. 4.2а) определится как

$$\delta_{гор} = x_k + \beta, \quad (4.11)$$

Используя формулу Гюйгенса для горячей глубины проникновения ТВЧ в горячую сталь при глубинном способе нагрева, из уравнения

$$f_{opt} = \frac{50^2}{\delta_{гор}} \quad (4.12)$$

найти значение оптимальной частоты ТВЧ.

Выбор своего варианта задания произвести из таблицы приложения 5.

Отчет о выполненной работе

В отчёт о работе включаются: № задания (например **A22**, здесь **A** обозначает индекс вертикальной графы таблицы приложения 5, в которой необходимо искать все цифровые данные варианта задачи; первая цифра **2** – номер строки радиусов детали (в данном случае $R=20$ мм); вторая цифра **2** – глубина закалённого слоя (в данном случае $x_k=20$ мм); наименование и цель работы; постановка задачи; теоретические положения, используемые в расчётах; пронумерованные и подписанные рисунки; схемы и графики; исходные цифровые данные; ход и результаты расчёта; ответы на вопросы, поставленные в задаче.

Вопросы для контроля подготовки к работе

1. Перечислите условия, необходимые для выполнения операции закалки с самоотпуском при сквозном и поверхностном нагреве.
2. Приведите примеры, когда применение поверхностной закалки с самоотпуском целесообразнее сквозной закалки с отдельным отпуском.
3. Почему при поверхностной закалке с самоотпуском необходимо применять большие скорости нагрева и резкое регламентированное охлаждение?
4. Как скажется на температуре самоотпуска и глубине закалённого слоя изменение интенсивности охлаждения при постоянном времени охлаждения? Изменение времени охлаждения при постоянной максимальной интенсивности охлаждения?
5. Как скажется изменение времени охлаждения при постоянной максимальной интенсивности на температуре и глубине закалённого слоя ($t_K^0 = \text{const}$)?
6. Как повлияет изменение закалочной температуры на температуру и глубину закалённого слоя, если интенсивность и длительность охлаждения в спреере остаются постоянными?

Упражнение № 3

Ориентированный расчет технологических параметров и оборудования для поверхностной закалки с нагревом ТВЧ

Цель – приобретение первых навыков комплексного расчёта оборудования и технологических параметров поверхностной высокочастотной закалки.

Исходные данные. Цилиндрическая деталь 2 (рис. 4.3) диаметром равным d , помещена в индуктор 1 высотой H , состоящий из трёх витков.

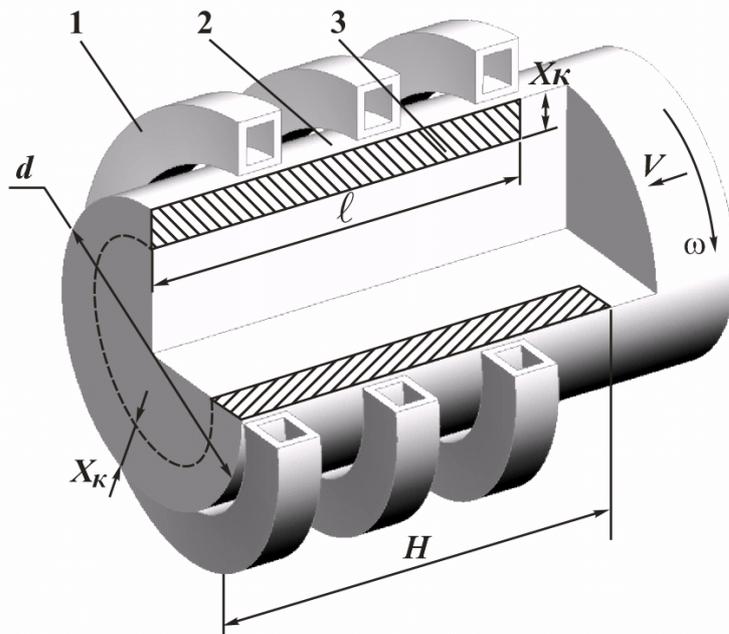


Рис. 4.3. Схематическое представление основных элементов и параметров системы индуктор–деталь:

- 1 – индуктор;
- 2 – деталь;
- 3 – нагретый слой

В процессе нагрева деталь, находясь внутри индуктора, в течение заданного времени должна быть нагрета одновременно до заданной температуры на длине, равной l , на глубину X_k . Требуется определить основные параметры процесса нагрева и выбрать необходимое оборудование.

Методические указания

При расчёте делается допущение, что в процессе нагрева детали энергия выделяется только в слое заданной глубины, равной X_k , и греется только этот слой, а более глубокие слои металла остаются холодными и энергию не поглощают. Это условие идеального нагрева. Расчёт необходимо вести в следующем порядке.

1. Определить массу нагреваемой части детали наружным диаметром d , глубиной X_k , длиной l по формуле

$$m = \pi \cdot X_k (d - X_k) \cdot l \cdot \gamma, \quad (4.13)$$

где γ – плотность стали (принять равной $7,8 \text{ г/см}^3$).

2. Определить количество энергии A , необходимой для нагрева взятого объёма металла до заданной температуры, используя формулу

$$A = m \cdot c_p \cdot \Delta t^\circ, \text{ кВА} . \quad (4.14)$$

3. Определить мощность P , потребляемую деталью, по формуле

$$P = \frac{A}{\tau \cdot \eta_{t0}}, \text{ кВт}, \quad (4.15)$$

где τ – время нагрева; η_{t0} – термический КПД.

4. Найти полную мощность P_{Π} , необходимую для осуществления нагрева изделия

$$P_{\Pi} = \frac{P}{\eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{и}}}, \text{ кВт}, \quad (4.16)$$

где $\eta_{\text{тр}}$ и $\eta_{\text{и}}$ – КПД трансформатора и индуктора, соответственно.

5. Определить удельную мощность p_0 нагрева

$$p_0 = \frac{P}{S}, \text{ кВт/см}^2, \quad (4.17)$$

где S – площадь одновременно нагреваемой боковой поверхности детали, находящейся под индуктором ($S = \pi \cdot d \cdot \ell$), см^2 .

6. Определить интервал допустимых частот тока

$$f_{\text{max}} = \frac{2,6 \cdot 10^5}{x_{\text{к}}^2} > f_{\text{opt}} > f_{\text{min}} = \frac{1,5 \cdot 10^4}{x_{\text{к}}^2}, \text{ Гц}, \quad (4.18)$$

где $x_{\text{к}}$ – глубина закалённого слоя детали, мм.

7. Определить интервал оптимальных частот тока

$$f_{\text{opt}} = \frac{6 \cdot 10^4}{x_{\text{к}}^2} \dots \frac{5 \cdot 10^4}{x_{\text{к}}^2}, \text{ Гц}, \quad (4.19)$$

где $x_{\text{к}}$ – глубина закалённого слоя детали, мм.

8. По вычисленным величинам P_{Π} и f_{opt} выбрать тип генератора ТВЧ и дать его характеристику (тип, мощность, частота, комплектность).

9. Определить скорость перемещения детали в индукторе по формуле

$$V_{\text{д}} = \frac{\ell}{\tau}, \text{ мм/с} \quad (4.20)$$

10. Определить среднюю скорость нагрева детали

$$V_{\text{с}} = \frac{\Delta t^0}{\tau}, \text{ } ^\circ\text{C/с}, \quad (4.21)$$

где $\Delta t^0 = t_{\text{к}}^0 - t_{\text{н}}^0$, $^\circ\text{C}$.

11. Определить производительность установки при непрерывно–последовательном способе поверхностной закалки детали

$$\Pi = F \cdot \gamma \cdot V_{\text{д}} \cdot 3600, \text{ кг/час}, \quad (4.22)$$

где F – площадь поперечного сечения детали;

γ – плотность стали;

$V_{\text{д}}$ – скорость перемещения детали.

Индекс индивидуального задания взять у преподавателя, цифровые данные для расчёта выписать из таблицы приложения 1.

Отчет о выполнении работы

Требования к отчету аналогичны требованиям, перечисленным в предыдущих упражнениях.

Вопросы для контроля готовности к работе

1. Назовите основные типы генераторов ТВЧ и дайте их краткую характеристику (мощность, частота тока, исполнение).
2. Назовите основные элементы, а также геометрические и энергетические параметры системы индуктор-деталь.
3. Опишите ход термической кривой при индукционном нагреве стали с 0,4 % С до температуры 950 °С при скорости нагрева 10 °С/с и 500 °С/с.
4. Какие допущения сделаны в рассматриваемом расчёте нагрева?
5. Что такое время и скорость нагрева стали в области фазовых превращений?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вологдин, В.П. Поверхностная закалка индукционным способом / В.П. Вологдин. – М.: Metallurgizdat, 1939. – 244 с.
2. Кидин, И.Н. Термическая обработка при индукционном нагреве / И.Н. Кидин. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 316 с.
3. Головин, Г.Ф., Высокочастотная термическая обработка. Вопросы металлургии и технологии / Г.Ф. Головин, М.М. Замятнин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленигр. отд-ние, 1990. – 239 с.
4. Смирнов, М.А. Основы термической обработки стали / М.А. Смирнов, В.М. Счастливцев, Л.Г. Журавлёв. – М.: Наука и технологии, 2002. – 519 с.
5. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для студентов ВТУЗов / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgiya, 1986. – 544 с.
6. Слухоцкий, А.Е. Индукторы / А.Е. Слухоцкий; под ред. А.Н. Шамова. – Вып. 5. – Л.: Машиностроение, 1989. – 69 с.
7. Головин, Г.Ф., Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева / Г.Ф. Головин, Н.В. Зимин – Л.: Машиностроение, 1979. – 11 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

№ п/п	Параметры	Символ	Размер- ность	Индексы вариантов									
				А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И	К	Л
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Диаметр детали	d	мм	25	45	55	65	75	85	95	105	115	125
				30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
				35	50	60	70	80	90	100	110	120	130
2	Глубина закалённого слоя	X_K	мм	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	7,0	6,0	5,0
3	Начальная температура	t_H^0	°С	18	18	18	20	20	20	18	18	20	20
4	Конечная температура	t_K^0	°С	980	970	960	950	940	950	960	970	980	970
5	Длина одновременно нагреваемой зоны	ℓ	мм	50	50	45	40	35	30	25	25	25	25
6	Общее время нагрева	τ	с	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
7	Средняя удельная теплоёмкость	c_p	Дж/г·К	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69	0,68	0,68	0,67	0,67
8	КПД трансформатора	$\eta_{тр}$	отн.ед	0,80	0,80	0,80	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
9	КПД индуктора	$\eta_{и}$	отн.ед	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
1 0	КПД термический	η_{t^0}	отн.ед	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75	0,75	0,75	0,75	0,70	0,70

Примечание: при расчётах принять – плотность стали $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$;
 – температура точки Кюри $\theta = 770 \text{ °С}$.

Приложение 2

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ЧАСТОТЫ ДЛЯ НАГРЕВА ПОД ЗАКАЛКУ НА ЗАДАННУЮ ГЛУБИНУ [7]

Глубина закалённого слоя, мм	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0
Частота тока, кГц:							
максимальная	250	100	60	30	15	8,0	2,5
оптимальная	60	25	15	7,0	4,0	1,5	0,5
минимальная (низш.)	15	7,0	4,0	1,5	1,0	0,5	0,15
Тип генератора ТВЧ	Ламповый	Ламповый или тиристорный		Тиристорный или машинный			

Приложение 3

НАИМЕНЬШИЕ ДОПУСТИМЫЕ ЧАСТОТЫ ДЛЯ НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ [7]

Диаметр изделия, мм	10	15	20	30	40	60	100	
Наименьшая допустимая частота, кГц	при КПД индуктора, $\eta_{и} = 0,8$	250	150	60	30	15	7,0	2,5
	при КПД индуктора, $\eta_{и} = 0,7$	30	20	7,0	3,0	2,0	0,8	0,3
Тип генератора	Ламповый		Тиристорный или машинный			Машинный		
Частота тока, кГц	70 и более		8,0	8,0	2,5	1,0	0,5	

Приложение 4

ТИПЫ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ТВЧ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ

№ п/п	Характеристики генератора			№ п/п	Характеристики генератора		
	Тип (марка) генератора	Мощность, кВт	Частота, кГц		Тип (марка) генератора	Мощность, кВт	Частота, кГц
Ламповые генераторы							
1	ВЧИ-2,5/5,28-3П	2,5	5280	27	ВПЧ-100-2400	100	2,4
3	ВЧИ-4/1,76-3П	4,0	1760	28	ПВС-100/2500	100	2,5
4	ВЧИ-6,3/0,88-3П	6,3	880	29	ПВВ-100/8000	100	8,0
5	ВЧИ-6,3/1,76-3П	6,3	1760	30	ВПЧ-100-8000	100	8,0
6	ВЧИ-4-10/0,44	10	440	31	ВЭП-100/8000	100	8,0
7	ВЧИ-10/0,88-3П	10	880	32	ОПЧ-250-2,4-380	250	2,4
8	ВЧИ-16/0,44-3П	16	440	33	ВГО-250-2500	250	2,5
9	ВЧИ-16/0,88-3П	16	880	34	ОПЧ-250-10,0-380	250	10,0
10	ВЧИ-25/0,07-3П	25	66	35	ОПЧ-320-1,0-3000	320	1,0
11	ВЧИ-40/0,07-3П	40	66	36	ВГО-500-25-00	500	2,5
12	ВЧИ-40/0,44-3П	40	440	37	ОПЧ-500-4,0-3000	500	4,0
13	ВЧГ1-60/0,066	60	66	38	ВГО-1500-1000	1500	1,0
14	ЛЗ-67-В	60	66	39	ВГВФ-1580-2500	1500	2,5
15	ВЧГ6-60/0,44-3П	60	440	Тиристорные преобразователи			
16	ЛЗ-107-В	100	66	40	ВТГ-5-0,066	5	66
17	ВЧИ-100/0,07-3П	100	66	41	ВТГ-10-0,066	10	66
18	ВЧИ-100/0,44-3П	100	440	42	ВТГ-25-0,044	25	44
19	ВЧИ-160/0,07-3П	160	66	43	ВТГ-50-0,022	50	22
20	ВЧИ-160/0,44-3П	160	440	44	ТПЧР-63-10	63	10
21	ЛЗ-207-В	200	66	45	ТПЧР-100-8	100	8,0
Машинные генераторы				46	ТПЧР-160-2,4	160	2,4
22	ВПЧ-50-2400	50	2,4	47	ТПЧР-160-4,0	160	4,0
23	ПВ-50/2500	50	2,5	48	ТПЧР-250-2,4	250	2,4
24	ВПЧ-50-8000	50	8,0	49	ТПЧР-250-4,0	250	4,0
25	ВЭП-60/2400	60	2,4	50	ТПЧР-250-8,0	250	8,0
26	ВЭП-60/8000	60	8,0	51	ТПЧР-320-2,4	320	2,4
				52	ТПЧР-500-1,0	500	1,0

Приложение 5

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫБОРА ВАРИАНТА ЗАДАНИЯ К УПРАЖНЕНИЮ № 2

№ п/п	Примеры	Индексы вариантов									
		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И	К	Л
1	Радиус детали R, см	15	20	25	30	35	40	40	45	50	50
		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
2	Глубина зака- лённого слоя X _к , см	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7
		2	3	4	5	5	6	6	6	7	8
3	Начальная температура, t _н ⁰ , °С	0	20	20	20	20	10	20	20	20	10
4	Конечная (закалочная) температура, t _к ⁰ , °С	950	940	930	920	910	900	890	880	870	860
5	Температура самоотпуска, t _с ⁰ , °С	220	220	220	230	240	240	200	200	200	220

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	4
1. Общие сведения.....	4
2. Установки для нагрева токами высокой частоты.....	13
3. Расчёт индукторов для поверхностной закалки стальных деталей по графикам А.Е. Слухоцкого	
3.1 Расчёт цилиндрического индуктора.....	20
3.2 Расчёт индукторов для закалки плоских поверхностей.....	31
4. Упражнения	
Упражнение № 1. Определение основных характеристических величин при поверхностном скоростном нагреве ТВЧ углеродистой стали.....	38
Упражнение № 2. Определение оптимальной частоты и глубины нагрева ТВЧ стальной цилиндрической детали при поверхностной закалке с самоотпуском.....	41
Упражнение № 3. Ориентировочный расчёт технологических параметров и оборудования для поверхностной закалки с нагревом ТВЧ.....	44
Библиографический список.....	47
Приложения	
Приложение 1. Варианты индивидуальных заданий.....	48
Приложение 2. Рекомендуемые частоты для нагрева под закалку на заданную глубину	
Приложение 3. Наименьшие допустимые частоты для нагрева стальных цилиндров.....	49
Приложение 4. Типы и основные характеристики генераторов ТВЧ для поверхностной закалки.....	50
Приложение 5. Исходные данные для выбора задания к упражнению № 2.....	51

ИНДУКЦИОННАЯ ЗАКАЛКА СТАЛЕЙ

Учебное пособие

Техн. редактор А.В. Миних

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 20.12.2006. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд.л. 3,29. Тираж 100 экз. Заказ 478. Цена 22 р.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.