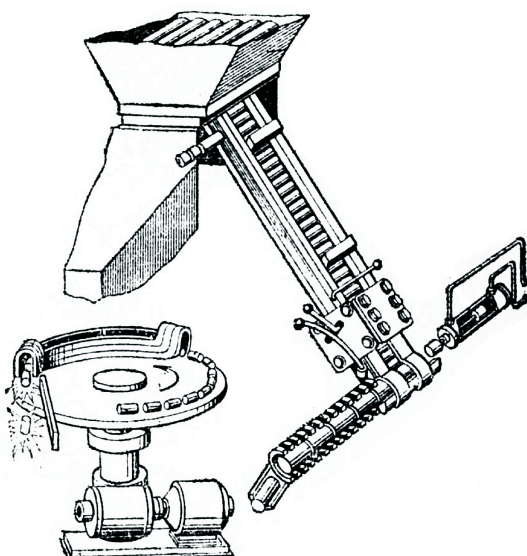


# ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА СТАЛИ



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт машиностроения  
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением  
и родственные процессы»

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВОК  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА СТАЛИ**

Учебное пособие

Составитель С.Л. Ключко

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2012

УДК 669:621.36  
ББК 34.3+31.292–5  
П791

Рецензенты:

к.т.н., доцент Тольяттинского филиала Самарского государственного  
аэрокосмического университета *В.К. Чуркин*;  
к.т.н., доцент Тольяттинского государственного университета *С.С. Гужин*.

**П791** Проектирование установок для электронагрева стали :  
учеб. пособие / сост. С.Л. Ключко. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. –  
123 с. : обл.

В учебном пособии представлены расчёты по проектированию установок для электронагрева стали перед обработкой металлов давлением.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением» и направлению подготовки бакалавров 150700.62 «Машиностроение», при изучении дисциплины «Нагрев и нагревательные устройства».

УДК 669:621.36  
ББК 34.3+31.292–5

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

## ВВЕДЕНИЕ

В работе представлены методы проектирования установок для электронагрева стали перед обработкой металлов давлением. Основная особенность изложения состоит в том, что методы описаны так, как они были разработаны авторами в соответствии с требованиями своего времени. Историческое описание методов предполагало использование системы единиц измерения, которая тогда была принята. Поэтому при использовании рассмотренных методов конечные результаты нужно перевести в систему СИ.

**Нагрев металла** — одна из важнейших операций в кузнечно-штамповочном производстве (КШП).

Нагрев металлов — это процесс, либо предшествующий обработке металлов давлением (ОМД), например, ковке, штамповке, либо являющийся частью основного процесса термической обработки металла. Условия протекания процесса нагрева оказывают существенное влияние на качество и себестоимость готовой продукции, производительность кузнечно-прессового оборудования и службу деформирующего инструмента, размер зёрен металла изделия и его механические свойства, выход годного.

Основное назначение нагрева перед ковкой и штамповкой заключается в изменении механических свойств металла: уменьшении (в десятки раз) его сопротивления деформации и повышении (на десятки процентов) пластичности — и тем самым — в увеличении обжатия и сокращении расхода энергии на обработку. Металл нагревают также в процессе его термообработки, чтобы произвести необходимые изменения в его кристаллической структуре.

**Роль нагревательных устройств в кузнечно-штамповочном производстве**

В настоящее время в машиностроении (автомобильной, тракторной, сельскохозяйственной и инструментальной отраслях промышленности) организация КШП базируется на трёх основных формах производства: поточном, при котором производство поковок организовано на отдельных участках (цехах); производстве с частичным комплексом выполнения технологических операций на специализированных линиях; производстве с полным комплексом выполнения технологических операций в цехах (заводах), оснащённых системами механизации, автоматизации и активного контроля. Этим и объясняется использование в кузнечно-штамповочном производстве печей различных типов и нагревательных устройств.

Рост промышленного производства поковок горячей штамповки, освоение новых материалов для штампов, увеличение массы

и размеров поковок — всё это обуславливает необходимость совершенствования средств нагрева и контроля температуры заготовок для обеспечения регламентированных температурно-скоростных режимов обработки.

Процессы нагрева, осуществляемые в пламенных печах и с помощью электронагревательных устройств, широко используются во всех отраслях промышленности, обрабатывающих металл. Поэтому промышленные печи становятся одним из основных видов технологического оборудования.

В связи с различными массой слитков и заготовок, а также темпом и серийностью производств штампованных поковок для объёмной штамповки применяют различные типы нагревательных устройств и способы нагрева металла.

Электрические нагреватели — более совершенный тип установок для нагрева металла.

### **Преимущества электронагрева перед нагревом заготовок**

1. *Экономия металла.* Большая скорость нагрева металла и отсутствие необходимости подачи воздуха в камеру нагрева (как в случае применения печей для поддержания горения топлива) приводит к значительному уменьшению окалины. При контактном электронагреве угар металла сокращается вдвое. Индукционный способ нагрева дает еще больший эффект в отношении уменьшения окалины, однако без применения защитной атмосферы устранить полностью окалину в процессе нагрева не удастся.

2. *Повышение стойкости штампов.* При уменьшении окалины на металле стойкость штампов повышается, так как окалина оказывает абразивное действие.

3. *Повышение производительности труда.* Большая скорость нагрева позволяет увеличить температуру начала штамповки, так как перегрев штампуемого металла при малых выдержках в нагретом состоянии происходит при более высоких температурах. Штамповка при более высоких температурах целесообразна из-за меньших затрат работы на деформацию, что приводит к сокращению числа ударов и повышению производительности при штамповке на молотах. При электронагреве легко достигается согласованность работы нагревательных устройств и штамповочных машин и упрощается автоматизация производственного процесса.

4. *Улучшение условий труда.* Отсутствие грязи и копоти на рабочем месте улучшает условия труда в горячих цехах, что приближает условия работы в них к условиям в холодно-штамповочных цехах.

5. *Повышение качества продукции.* Равномерность нагрева и точный контроль температурного режима при электронагреве позволяют обеспечить однородные структуру и свойства металла, сократить тепловые виды брака и увеличить точность размеров поковок за счет уменьшения колебания величины усадки поковок при их остывании.

6. *Отсутствие необходимости в тщательной очистке поковок; экономия времени на очистку заготовок от окалины перед штамповкой; простота обслуживания нагревателей; удобство применения защитных атмосфер в нагревательных индукторах и т. п.*

Недостатки электронагрева металла связаны с относительно высокой ценой установок и электроэнергии, трудностями подогрева (вторичного нагрева) еще неостывших заготовок и сложностью нагрева фасонных заготовок.

При проектировании электронагревательных установок для объёмной штамповки стали используются различные методы расчёта их основных параметров.

# **1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА СТАЛИ ПЕРЕД ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКОЙ**

## **1.1. Требования к процессу нагрева стали перед обработкой металлов давлением (ОМД)**

Процесс нагрева должен обеспечивать:

- достижение требуемой температуры слитка или заготовки;
- достаточно равномерное распределение температуры по сечению (равномерность нагрева);
- допустимую скорость нагрева металла (продолжительность нагрева).

При неправильном ведении нагрева металла могут возникнуть нежелательные явления:

- окисление (угар);
- обезуглероживание;
- перегрев;
- пережог;
- нарушение целостности металла (образование трещин).

## **1.2. Перспективы развития теории и способов нагрева заготовок и слитков перед ОМД**

На современном этапе развития технологии нагрева и нагревательных устройств основные задачи совершенствования процесса могут быть сформулированы следующим образом:

- повышение производительности печного оборудования путём интенсификации тепловых режимов и применения средств управления работой печных участков;
- повышение качества выполнения тепловых режимов и сокращение ручного труда при обслуживании печей за счёт совершенствования их конструкций и автоматизации;
- снижение удельных расходов топлива на нагрев металла в печах посредством повышения эффективности их работы и освоения энергосберегающих технологий;
- снижение угара металла путём совершенствования существующих и создания новых процессов безокислительного нагрева металла.

### 1.3. Классификация видов электронагрева стали и нагревательных установок, применяемых в ОМД, в частности, при горячей объёмной штамповке

В КШП для нагрева слитков и крупных заготовок чаще всего применяют пламенные печи, а для нагрева средних и мелких заготовок, наряду с пламенными печами, используют и электрические нагревательные устройства. Классификация нагревательных установок, применяемых в КШП, приведена на рис. 1.1.

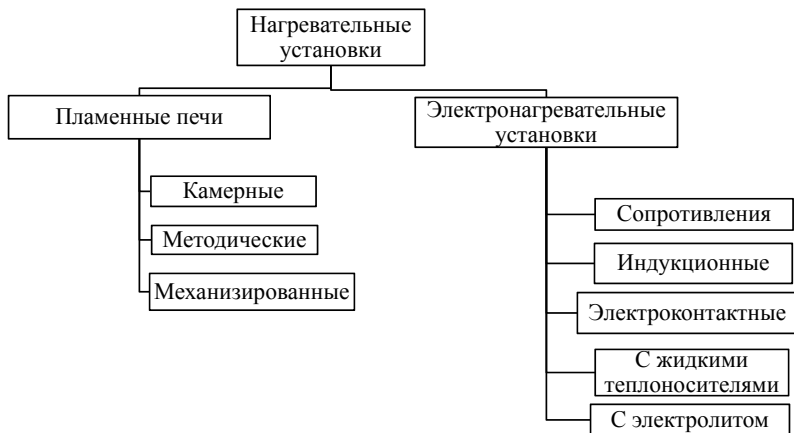


Рис. 1.1. Классификация нагревательных установок, применяемых в КШП

Типы кузнечных нагревательных устройств, применяемых при горячей объёмной штамповке, с указанием их конкретного назначения приведены в табл. 1.1.

Наиболее экономичным является электроконтактный нагрев. Недостаток его – невозможность и нерациональность нагрева коротких, толстых заготовок, трудность и нестабильность получения равномерного нагрева под контактами, а также потребление всей мощности установки от одной фазы питающей сети без распределения на три фазы.

Индукционный нагрев требует более высоких, чем электроконтактный нагрев, капитальных затрат и эксплуатационных расходов, но он более гибок, универсален и свободен от указанных выше недостатков контактного нагрева, легко автоматизируется, позволяет создать высокопроизводительные устройства, а также нагревать заготовки переменного сечения.



Таблица 1.1

*Типы нагревательных устройств,  
применяемых в штамповочных цехах*

Нагревательные устройства	Назначение	Условия нагрева стали
Печи камерные: с закрывающимися окнами;  щелевые;  очковые	Для нагрева заготовок мерных  То же – мерных и прутковых  То же	Без предварительного нагрева; печи могут быть с защитной атмосферой
Печи полуметодические и методические с толкателями	Для нагрева мерных заготовок из легированной стали	Методический нагрев; печи могут быть с защитной атмосферой
Печи карусельные: с вращающимся подом (тарельчатые); с вращающимся корпусом (очковые)	Для нагрева заготовок мерных  То же – мерных и прутковых	То же
Конвейерные печи: с внутренним расположением конвейера; с наружным расположением конвейера	Для нагрева заготовок мерных  То же – прутковых	Методический нагрев печи; печи могут быть с защитной атмосферой
Специализированные печи	Нагрев мелких заготовок	Нагрев по заданному режиму
Солевые ванны	Нагрев мелких заготовок	Быстрый нагрев
Печи для скоростного нагрева с керамическими горелками: камерные; проходные	Нагрев заготовок всех типов	То же
Индукционный электронагрев токами: промышленной частоты; повышенной частоты	Нагрев заготовок диаметром более 150–200 мм; нагрев заготовок всех типов и размеров диаметром до 150–200 мм	Очень быстрый нагрев

Нагревательные устройства	Назначение	Условия нагрева стали
Контактный электронагрев	Нагрев заготовок диаметром до 60–70 мм с постоянным сечением по длине (преимущественно большой длины, $\frac{L_0}{D_0^2} > 1$ , где $L_0$ и $D_0$ в см)	Быстрый нагрев
Нагрев в электролите	Нагрев заготовок небольших размеров и сечений	То же
Нагрев в соляных ваннах	То же	То же

Электрические печи сопротивления целесообразно применять для нагрева под объёмную штамповку стальных заготовок небольшого сечения или сложной формы при незначительном объёме производства, а также в случаях, когда предъявляются особо высокие требования к качеству нагрева: большая степень равномерности температуры в рабочей камере, высокая точность регулирования температуры, отсутствие воздействия печных газов на поверхность заготовки и т. п.

Для нагрева стальных заготовок до температуры 1200–1250° С служат электрические печи с карборундовыми нагревателями, а до 1500–1550° С – с нагревателями из дисилицида молибдена.

Нагрев стальных заготовок под объёмную штамповку в электрических печах сопротивления не имеет существенных технологических преимуществ перед нагревом в пламенных печах, поэтому этот способ нагрева в настоящее время почти не находит применения при объёмной штамповке стали.

Электронагрев в электрических печах с жидкими теплоносителями и в электролите применяется ещё более редко для нагрева заготовок небольших размеров. Поэтому последние три способа электронагрева стали в данной работе не рассматриваются.

#### **1.4. Методы расчёта установок для электроконтактного и индукционного нагрева**

Существуют различные методы расчёта основных параметров электронагревательных установок, применяемых для нагрева стали перед ОМД. В данной работе будут проанализированы методы, предлагаемые в рекомендуемой литературе [1; 2; 3].

## 2. АНАЛИЗ ИНДУКЦИОННОГО СПОСОБА НАГРЕВА

### 2.1. Область применения

Применение индукционного нагрева для пластической и термической обработки высоколегированных сортов стали целесообразно при массовом производстве.

Индукционный нагрев стальных заготовок часто используют и для термообработки, например – закалки. Закалка проводится с целью повышения твёрдости поверхностных слоёв с сохранением «мягкой» сердцевины, что достигается при нагреве поверхностных слоёв и быстром охлаждении в воздушной, масляной или водяной среде.

### 2.2. Сущность способа

Под индукционным понимают нагрев при бесконтактной передаче электроэнергии в заготовку электромагнитным полем, возникающим вокруг проводника, по которому течёт переменный ток.

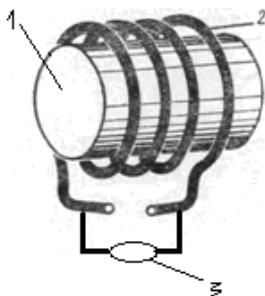


Рис. 2.1. Схема индукционного нагрева

Индукционный нагрев характеризуется тем, что при прохождении электрического тока от источника питания (3) через медную катушку – индуктор (2) электрическая энергия превращается в энергию переменного магнитного поля, которое воздействует на нагреваемую металлическую заготовку (1) и наводит в ней вихревые токи (рис. 2.1). В тех участках заготовки, где циркулируют вихревые токи, тепло выделяется по методу сопротивления согласно закону Джоуля–Ленца, а остальная часть металла получает тепло в результате теплопроводности.

### 2.3. Теоретические основы

Теорию индукционного нагрева и первые промышленные индукционные установки создал В.П. Вологдин.

Переменный ток в сечении проводника распределяется неравномерно, поэтому в проводе индуктора и заготовке максимальная плотность тока будет на поверхности. В глубь проводника плотность тока уменьшается по экспоненте. Условно принято считать, что ток распространяется в пределах определённой толщины, которую называют глубиной проникновения тока  $\delta$ , где выделяется 90% тепла. Значение  $\delta$  зависит от частоты тока, магнитной проницаемости и удельной электропроводимости материала.

Все металлы и сплавы по магнитным свойствам подразделяют на две группы: ферромагнитные и парамагнитные. Ферромагнитные материалы (углеродистые стали, железо, никель и кобальт) обладают высокой магнитной проницаемостью. Парамагнитные материалы (жаропрочные и нержавеющие стали, латунь, мельхиор и др.) имеют магнитную проницаемость, близкую к магнитной проницаемости вакуума.

При достижении нагреваемым материалом температуры, соответствующей точке магнитного превращения (критической точке или точке Кюри), значение магнитной проницаемости ферромагнитных материалов уменьшается в 100–200 раз и снижается до величины магнитной проницаемости вакуума, что сопровождается увеличением глубины проникновения тока  $\delta$ . Критической точке того или иного материала отвечает вполне определённая температура тела. Для стали она равна 768° С. Поэтому различают две глубины проникновения тока: до точки Кюри и после неё («горячую» глубину проникновения тока).

Для стали при температурах 1100–1200° С  $\delta = \frac{0,6}{\sqrt{f}}$ . Подводимая к индуктору электрическая энергия частично передаётся в нагреваемые заготовки, а меньшая часть расходуется на нагрев провода индуктора. Отношение количества энергии, передаваемой в заготовку, ко всему количеству энергии, подводимой к индуктору, называют электрическим коэффициентом полезного действия (КПД) индуктора  $\eta_e$ . Его значение зависит главным образом от отношения диаметра заготовки  $d_m$  к глубине проникновения тока  $\delta$ , то есть определяется частотой тока. Электрический КПД растёт с увеличением частоты и достигает предельного значения при  $\frac{d_m}{\delta} \geq 0,6$ .

Отношение количества энергии, затраченной на нагрев заготовок, к количеству энергии, переданной индуктором, называют

термическим или тепловым КПД  $\eta_T$ . Он зависит не только от температуры и продолжительности нагрева, но и от размеров теплоотдающей поверхности. С увеличением  $d_m$  величина  $\eta_T$  снижается. Полный КПД индуктора:  $\eta = \eta_0 \eta_T$ .

Характер изменения всех трёх коэффициентов приведён на рис. 2.2. Полный КПД индуктора зависит от частоты тока.

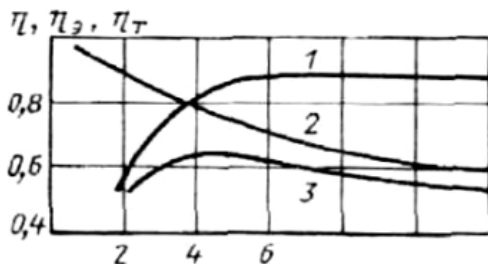


Рис. 2.2. Зависимость электрического (1), термического (2) и полного (3) КПД индуктора от соотношения диаметра заготовки и глубины проникновения тока в нагретую сталь

Цилиндрические заготовки одного и того же диаметра возможно нагреть током двух или трёх смежных частот. Заготовки диаметром более 50–60 мм до точки Кюри целесообразно нагревать током промышленной частоты, а выше этой точки – током повышенной частоты. Нагрев токами двух частот позволяет получать достаточно высокие значения электрического КПД.

## 2.4. Режимы нагрева

Известно два режима нагрева индукционных установок: ускоренный при постоянной температуре на поверхности (методический) и обычный.

Для реализации ускоренного режима в начале нагрева к заготовке подводят повышенную мощность и, когда металл будет прогрет до заданной температуры на всю глубину проникновения тока, мощность снижают до значения, достаточного для сохранения температуры поверхности постоянной. Плотность теплового потока и, следовательно, мощность на поверхности заготовки пропорциональны квадрату числа ампер-витков, отнесённых к единице длины индуктора. Поэтому при методическом способе нагрева число витков индуктора изменяют по длине. В «холодном» конце индуктора, куда подают заготовки, шаг спирали индуктора минимальный, а в «горячем» – максимальный. Сила тока в индукторе

и темп проталкивания заготовки в этом режиме остаются неизменными. Мощность, подводимая к неподвижным заготовкам в обычном режиме нагрева, регулируется изменением силы тока в индукторе путём изменения напряжения с помощью трансформатора.

В практике индукционного нагрева заготовок для горячей объёмной штамповки встречается понятие сквозного нагрева, под которым подразумевается высокопроизводительный равномерный нагрев металла внутренними источниками тепловой энергии.

Существенное влияние на производительность и КПД индукционных нагревателей оказывает отношение диаметров нагреваемых заготовок к глубине проникновения тока в металл.

При выборе преобразователей частоты для индукционного нагрева заготовок необходимо учитывать следующее: если отношение диаметра нагреваемой заготовки к глубине проникновения тока больше 10, то передача энергии происходит с высоким КПД. Однако при этом объемная удельная мощность ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ), выделяемая в металле заготовки, более чем в два раза ниже максимальной возможной, получаемой при отношении диаметра заготовки к глубине проникновения, приблизительно равной 4. Поэтому при сквозном нагреве с целью повышения производительности процесса желательно обеспечивать указанное выше соотношение, при котором в нагреваемой заготовке выделяется максимальное значение удельной объемной мощности. Это достигается рациональным выбором частоты источника питания индукционного нагревателя.

Для сквозного нагрева стальных заготовок различного диаметра рекомендуется применять следующие частоты:

Частота тока индуктора, Гц:	500	1000	2500	4000	$66 \cdot 10^3$ и более
Диаметр нагреваемой заготовки, мм:	90–180	60–120	40–80	30–60	20 и менее

При окончательном выборе высокочастотного преобразователя для сквозного индукционного нагрева заготовок определенной номенклатуры предпочтение следует отдавать минимально допустимым частотам.

В процессе нагрева температура металла (рис. 2.3) на поверхности ( $t_0$ ) и в центре заготовки ( $t_{\text{ц}}$ ) изменяются во времени ( $\tau$ ) по различным функциональным зависимостям  $[(t_0(\tau) \text{ и } t_{\text{ц}}(\tau))]$ ; разность  $\Delta t$  определяет степень неравномерности распределения температуры по сечению в момент окончания нагрева заготовки.

При этом перепад температур  $\Delta t$  в 100–150° С является практически допустимым для большинства сталей. За время передачи нагретой заготовки к кузнечной машине (2–3 с) эта разность температур существенно уменьшается.

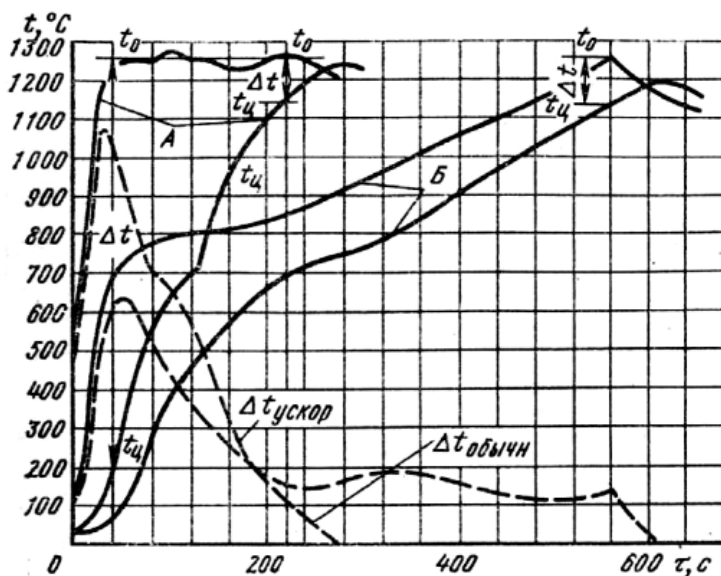


Рис. 2.3. Зависимость температуры от времени нагрева заготовок: А — при ускоренном нагреве; Б — при обычном нагреве;  $\Delta t_{\text{ускор}}$ ,  $\Delta t_{\text{обычн}}$  — температурные перепады между поверхностью и центром заготовки соответственно при ускоренном и обычном нагреве

Так как при индукционном нагреве превращение электрической энергии в тепловую в основном происходит в поверхностном слое заготовки, то остальная ее часть нагревается за счет теплопроводности. Поэтому равномерное распределение температуры по сечению для данной частоты тока можно получить только при определенной продолжительности нагрева. На общую продолжительность нагрева заготовки существенно влияет характер изменения во времени температуры поверхности нагреваемого металла. В практике сквозного электронагрева под ковку и штамповку применяются ускоренные или обычные режимы нагрева заготовок.

При ускоренном режиме нагрева температура поверхности быстро достигает конечного значения и в дальнейшем поддерживается на этом уровне. В начале нагрева температура в центре заготовки значительно ниже температуры ее поверхности. Между

поверхностью и центром создается большой перепад температур, за счет которого теплота от поверхности быстро проникает к центру (рис. 2.4).

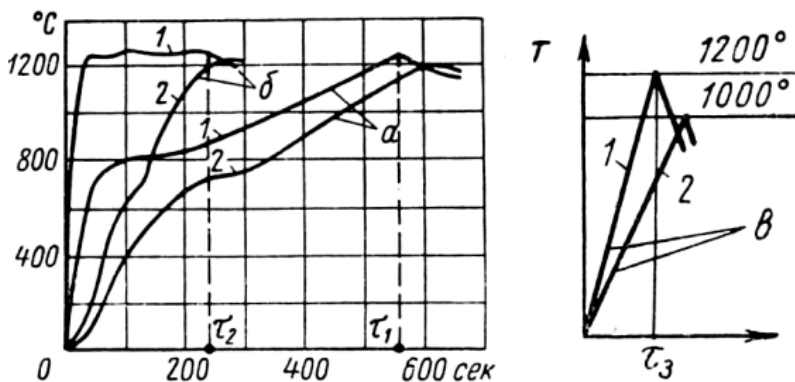


Рис. 2.4. Схема роста температур на поверхности и в центре заготовки: а) нагрев до 1200° С в методическом индукторе с равномерным шагом витков; б) нагрев до 1200° С в методическом индукторе для ускоренного индукционного нагрева с неравномерным шагом витков; в) нагрев до 1000° С с перегревом поверхности; 1 — температура поверхности заготовки; 2 — температура центра заготовки; Т — температура нагрева в °С;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  — время нагрева заготовки

В процессе обычного нагрева температура поверхности заготовки возрастает медленно, но с такой средней скоростью, при которой в момент достижения заданной температуры нагрева между поверхностью и центром устанавливается допустимый температурный перепад 100–150° С. Общая продолжительность обычного нагрева в 2,5–3 раза больше, чем ускоренного. Дальнейшее увеличение продолжительности нагрева связано с ростом потерь теплоты и нецелесообразно из экономических соображений.

Ввиду сложности точного аналитического расчета, связывающего нестационарный процесс теплообмена с существенно нелинейными характеристиками нагреваемых заготовок, на практике время нагрева заготовки из определённого материала и заданного диаметра при использовании тока той или иной частоты обычно определяют по таблицам или графикам, которые составлены по опытным данным для широкой номенклатуры заготовок и частот.

В табл. 2.1 приведены значения времени нагрева заготовок из углеродистой конструкционной стали различного диаметра токами стандартных частот при обычном и ускоренном режимах нагрева.



Таблица 2.1

*Время нагрева (с) до 1250° С стальных цилиндрических заготовок током стандартных частот*

Диаметр заготовки, мм	Частота, Гц											
	500		1000		2500		4000		8000		10000	
	О	ПТП	О	ПТП	О	ПТП	О	ПТП	О	ПТП	О	ПТП
20	—	—	—	—	—	—	—	—	10	4	11	4,5
30	—	—	—	—	—	—	—	—	28	12	31	12,5
40	22	9	30	12	43	18	50	20	58	24	61	25
50	—	—	—	—	—	—	—	—	100	40	101	41
60	72	32	96	39	123	50	134	56	148	60	151	61
70	—	—	—	—	—	—	—	—	205	83	212	86
80	162	66	202	82	243	98	259	105	278	112	283	114
100	295	119	350	141	403	163	425	172	449	181	455	183
120	467	188	538	217	605	244	632	255	660	266	667	269
140	681	275	767	310	848	342	880	355	—	—	—	—
160	936	378	1038	419	1131	457	1170	472	—	—	—	—
180	1232	498	1349	545	1456	588	1500	606	—	—	—	—
200	1568	633	1700	686	1822	735	1870	755	—	—	—	—

Обычный режим нагрева, как правило, осуществляется при удельной мощности, близкой к постоянной, в индукторах, витки которых равномерно распределены по всей длине. Главное преимущество обычного режима нагрева в простоте индуктора и в возможности использования его для нагрева заготовок, близких по диаметру, но отличающихся по длине.

Ускоренный нагрев применяется, как правило, для заготовок одинаковой длины и требует переменной удельной мощности, передаваемой заготовке в течение всего цикла нагрева. Для этого применяются индукторы усложненной конструкции с неравномерной плотностью витков по длине. Главным преимуществом устройств для ускоренного режима нагрева является меньшая длина индуктора при одной и той же производительности процесса в сравнении с длиной индуктора для обычного режима нагрева.

Ускоренный индукционный нагрев дает возможность:

1) сократить время нагрева заготовок в 1,5–2 раза и, соответственно, уменьшить длину индукторов;

2) уменьшить габариты и производственную площадь, занимаемую нагревателями, доводя удельный съём нагретого металла до 0,7–0,8 т/ч с 1 м<sup>2</sup> площади пода (при обычном индукционном нагреве от 0,2–0,5 т/ч·м<sup>2</sup>);

3) увеличить на 5–7% КПД индуктора за счет уменьшения тепловых потерь, что позволяет экономить 30–40 кВт×ч энергии на каждой тонне нагретых заготовок;

4) довести производительность индукторов до 3 т/ч с одного ручья и заменить многоручьевые нагреватели одноручьевыми, что облегчает автоматизацию процессов нагрева и штамповки;

5) сократить активную длину индукторов, что уменьшает потери стали на окалину до 0,1–0,2%, то есть в 1,5–2 раза по сравнению с обычным индукционным нагревом.

## 2.5. Оборудование для индукционного нагрева

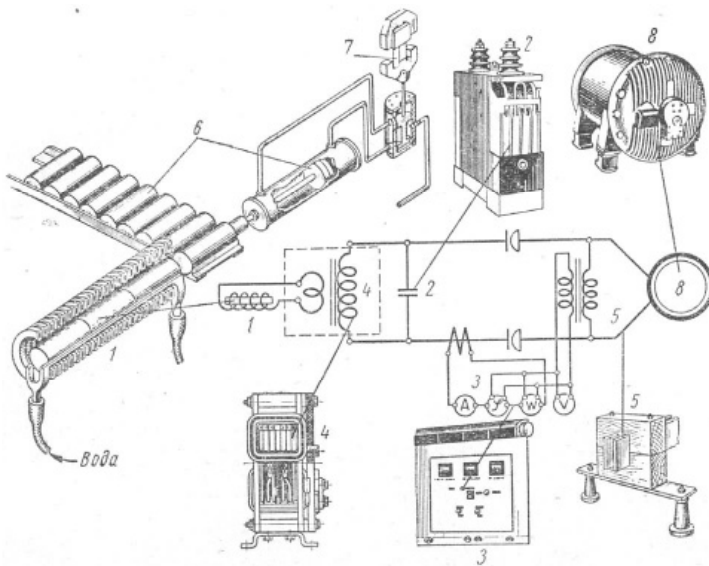


Рис. 2.5. Схема индукционного нагревателя: 1 – индуктор с нагревательными заготовками; 2 – батарея конденсаторов; 3 – комплект измерительной аппаратуры; 4 – высокочастотный трансформатор; 5 – токопровод; 6 – механизм подачи заготовок; 7 – элемент автоматического управления механизмом подачи заготовок; 8 – высокочастотный генератор

Индукционное нагревательное устройство (рис. 2.5) состоит из индуктора, в котором производится нагрев заготовки, конденсаторной батареи, комплекта измерительных приборов, высокочастотных трансформаторов, токопроводов, системы автоматического управления, а также механизма подачи заготовок к индуктору

и извлечения их после нагрева. Для питания индукционных нагревателей применяются специальные генераторы токов повышенной частоты. Рассмотрим более подробно устройство перечисленных элементов.

### 2.5.1. Индуктор

Индуктор является основным элементом индукционного нагревательного устройства. От геометрических размеров и конструкции индуктора в значительной мере зависят КПД и эксплуатационные качества установки. В практике нагрева под ковку и штамповку применяются индукторы различной формы, определяемой конструкцией, размерами и размещением заготовок (рис. 2.6).

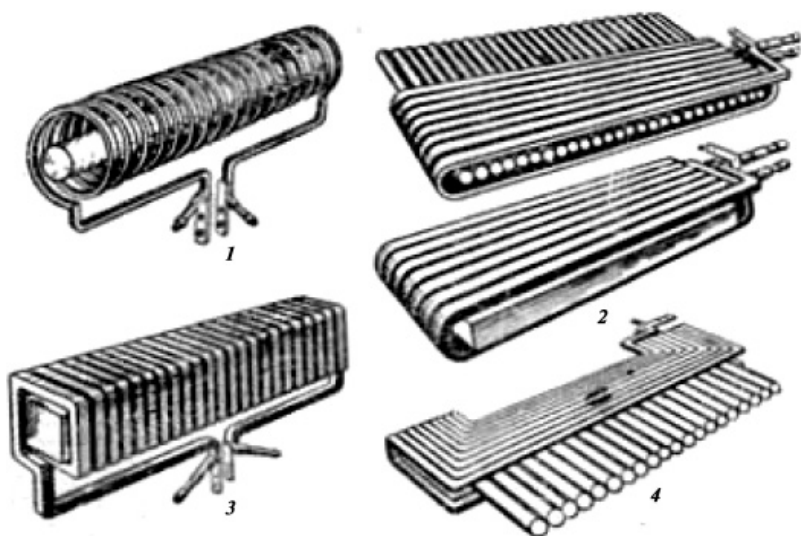


Рис. 2.6. Формы индукторов и расположение в них нагреваемых заготовок

Для нагрева цилиндрических заготовок используются цилиндрические индукторы, выполненные в виде соленоида (1). При нагреве пластин или концов ряда мерных цилиндрических заготовок используются овалыные (2) или щелевые (4) индукторы. Для нагрева заготовок квадратного поперечного сечения применяются квадратные индукторы (3).

Из всех перечисленных индукторов наибольшее распространение получили цилиндрические индукторы, выполненные в виде однослойной спирали.

Цилиндрический индуктор (рис. 2.7) состоит из следующих основных элементов: индуктирующего провода (1), уложенного спиралью, с изоляцией (2), несущей изолирующей трубы (3), стяжных болтов (4), фасадных плит (передней и задней) (5), направляющих полос (6) с шипами (7), кожуха (8), выводов (9) и (10), подключаемых к контактному устройству, и системы охлаждения.

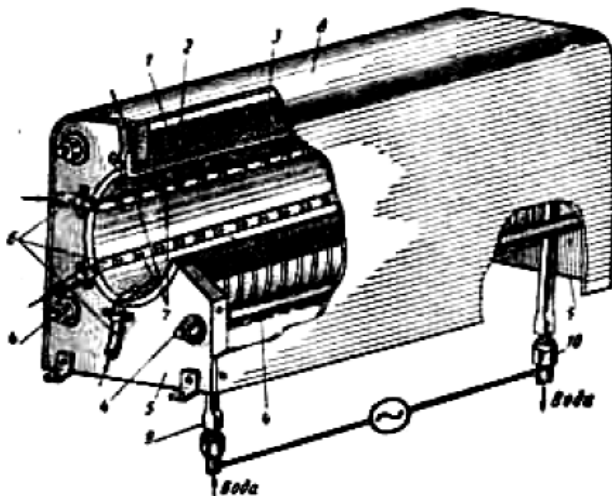


Рис. 2.7. Схема индуктора для нагрева цилиндрических заготовок под ковку и штамповку

В качестве индуктирующего провода применяется медная трубка квадратного или прямоугольного сечения, охлаждаемая водой. Для обеспечения охлаждения индуктирующего провода при давлениях воды, обычных для заводских водопроводов (1,5–2,0 атм), трубку выбирают достаточно большого сечения и разделяют ее на несколько параллельных секций. Толщина стенки трубки должна быть не менее удвоенной глубины проникновения тока в медь. При отсутствии медных трубок с требуемой толщиной стенки можно использовать полосовую медь, припаявая к ней тонкостенную медную трубу. Трубка в этом случае должна припаяваться со стороны, противоположной размещению нагреваемой заготовки. Размеры медных трубок прямоугольного и квадратного сечения, используемых для изготовления индукторов, приведены в табл. 2.2.

Для изоляции индуктирующего провода применяется стеклянная пряжа, micaфольевая лента или миканитовые шайбы с радиальным разрезом.

В случае использования миканитовых шайб последние укладываются между витками индуктора.

Размеры медных трубок, мм

Высота	Ширина	Толщина стенок	Высота	Ширина	Толщина стенок	Высота	Ширина	Толщина стенок	Высота	Ширина	Толщина стенок
5	5	1	8	8	1,5	10	10	2	10	25	2
5	10	1	8	12	1,5	10	15	2	10	30	2
8	15	1–1,5	10	20	1,5	10	20	2			

При отсутствии медных трубок квадратного или прямоугольного сечения возможно применение трубок круглого сечения, однако в этом случае джоулевы потери в индукторе возрастают на 10–15%. Значительно целесообразнее произвести профилирование круглых трубок в квадратные или прямоугольные, используя для этого специальное приспособление (рис. 2.8).

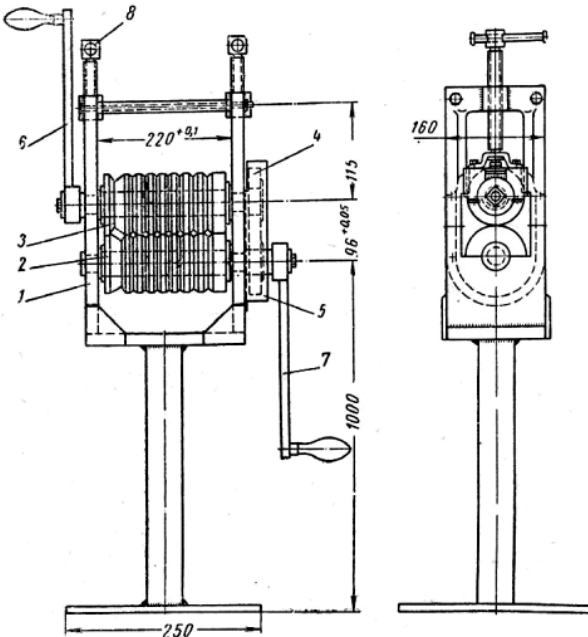


Рис. 2.8. Ручное приспособление для профилирования круглых отожжённых медных трубок в квадратные и прямоугольные:  
 1 – сварная подставка; 2, 3 – круглые валки; 4, 5 – шестерни;  
 6, 7 – рукоятки; 8 – зажимной винт

Несущая труба (3), кроме придания необходимой жесткости конструкции индуктора, выполняет роль теплового и электрического изолятора (рис. 2.8).

Труба, как правило, состоит из гильз. Внешняя, миканитовая, толщиной 2 мм служит для электрической изоляции; внутренняя, асбестовая, толщиной 3 мм — для тепловой. В асбестовой гильзе располагается футеровка из шамотных плиток толщиной 10–25 мм. Фасадные плиты (5) чаще всего изготавливаются из текстолита или асбоцемента. Для обеспечения жесткости конструкции индуктора фасадные плиты либо стягиваются четырьмя стяжными болтами (4), как это показано на рис. 2.8, либо крепятся к деревянным брускам, обжимающим индуктирующий провод.

Металлические направляющие (6) служат для предотвращения быстрого износа керамики от механических повреждений, неизбежных при загрузке и перемещении заготовок. Направляющие изготавливаются в виде трубок из жаропрочной немагнитной стали, охлаждаемых водой. Для увеличения износоустойчивости к направляющим в некоторых случаях привариваются шипы из жаропрочного сплава (например, сормайта). В некоторых случаях индуктор закрывается кожухом (8) из тонкого текстолита, однако для обеспечения лучшего охлаждения и осмотра индукторы чаще делают открытыми, без кожуха.

Система охлаждения индуктора показана на рис. 2.9, где представлен чертеж цилиндрического многovitкового индуктора с несущими деревянными брусками. Система охлаждения состоит из напорной и сливной колодок и напорных и сливных шлангов, подключаемых к секциям индуктирующего провода, направляющим и электромагнитному экрану. Система охлаждения требует постоянной и тщательной проверки. Прекращение подачи воды к охлаждаемому элементу вызовет его перегрев и выход из строя. Особенно опасно прекращение поступления воды в секции индуктирующего провода, который при отсутствии воды, как правило, перегорает.

Опробование нового индуктора допустимо лишь после тщательной проверки и включения системы охлаждения. После прекращения нагрева заготовок в индукторе система охлаждения не должна выключаться в течение 50–60 минут.

Для предохранения загрузочного устройства нагревателя от полей рассеяния индуктора на последнем монтируется электромагнитный экран, выполненный в виде короткозамкнутой медной трубки. Магнитное поле тока, создаваемое короткозамкнутым витком экрана, ослабляет поле индуктора и тем самым предохраняет близлежащие предметы от нагрева.

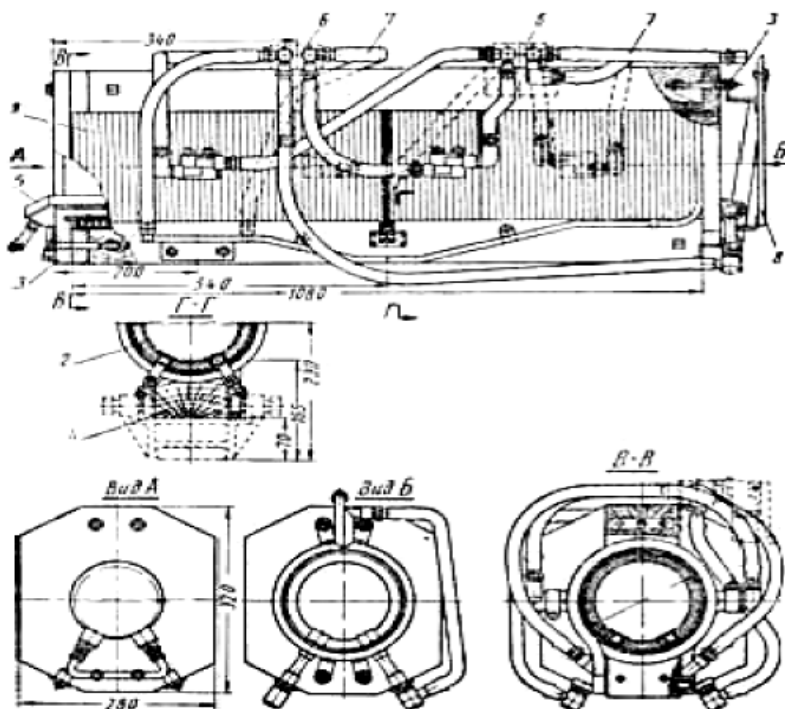


Рис. 2.9. Многовитковый цилиндрический индуктор с несущими брусками:

- 1 – обмотка индуктора; 2 – изолирующая труба; 3 – фасадные плиты;
- 4 – несущие деревянные бруски; 5 – направляющие;
- 6 – напорная и сливная колодки; 7 – напорные и сливные шланги;
- 8 – электромагнитный экран

Для подсоединения выводов индуктора к токопроводам используется либо гибкий водоохлаждаемый кабель, либо специальные токоподводящие шины и контактные устройства.

### 2.5.2. Конденсаторная батарея

Конденсаторная батарея служит для повышения коэффициента мощности ( $\cos \phi$ ) нагревательной установки и является одним из главных элементов индукционного нагревательного устройства. Если индуктор выполняет роль своеобразного аккумулятора электромагнитной энергии, то батарея конденсаторов по существу является накопителем электростатической энергии. Применение

конденсаторной батареи в индукционном нагревателе обеспечивает повышение номинальной активной мощности генератора, что в значительной степени повышает коэффициент полезного действия всей нагревательной установки.

Батарея конденсаторов индукционных нагревательных устройств обычно комплектуется из бумажно-масляных контурных конденсаторов с водяным охлаждением. Конденсаторы на частоты тока 1000, 2500 и 8000 Гц серийно выпускаются нашей промышленностью. Характеристики отечественных бумажно-масляных контурных конденсаторов с водяным охлаждением приведены в табл. 2.3. На рис. 2.10 и 2.11 показан их общий вид.

Таблица 2.3

*Характеристика отечественных бумажно-масляных конденсаторов с водоохлаждением*

Тип конденсаторов	Ёмкость, мкФ	Реактивная мощность, кВА	Частота тока, Гц	Рабочее напряжение, В	Масса, кг	Габариты, мм
ПМВ-1-1	11,2	70	1000	1000	23	360×140×490
ПМВ-3-1	1,28	70	1000	3000	23	360×140×490
ПМВ-2,4-2	0,98	70	2000	2400	23	360×140×490
ПМВ-1,5-2	3,0	84	2000	1500	23	360×140×490
ПМВ-0,66-2,5	8,8	70	2500	600	23	360×140×490
ПМВ-0,4/0,8-8	16,0	120	8000	400/800	24,5	360×140×490



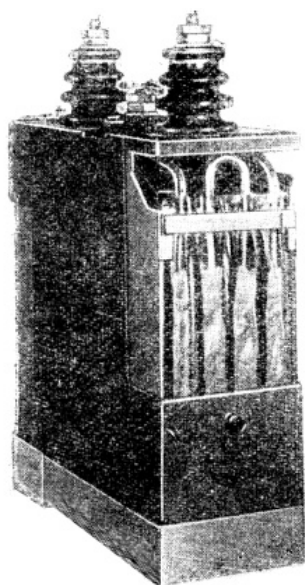


Рис. 2.10. Бумажно-масляный контурный конденсатор с водным охлаждением

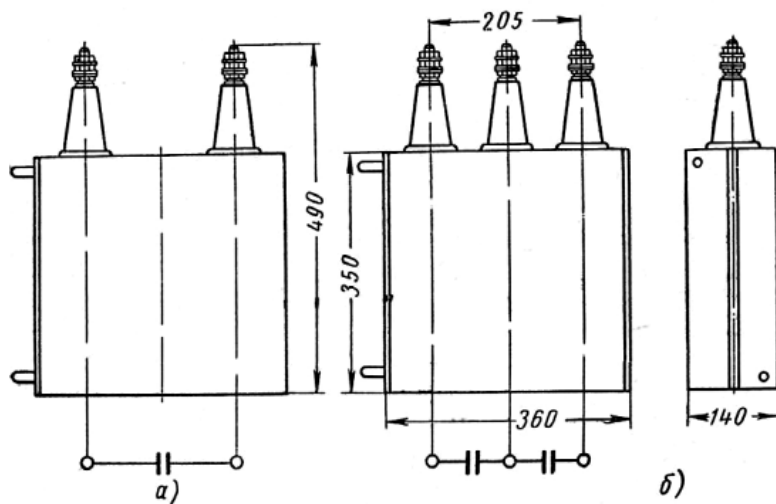


Рис. 2.11. Габариты и схема соединения закладок в бумажно-масляных водоохлаждаемых конденсаторах с двумя (а) и тремя (б) вводами

### 2.5.3. Комплект измерительных приборов

В комплект измерительных приборов индукционного нагревателя входит высокочастотная аппаратура для контроля тока, напряжения и мощности, подводимых к индуктору, а также аппаратура для измерения частоты тока генератора и величины тока возбудителя. Основные данные высокочастотной измерительной аппаратуры, применяемой в индукционных нагревателях, приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

*Основные данные высокочастотной измерительной аппаратуры, применяемой в индукционных нагревателях*

Назначение и тип прибора	Схема включения	Пределы измерения	Форма и размеры корпуса, мм	Частота тока, Гц
Амперметр ВЧА щитовой	Через трансформатор тока с коэффициентом трансформации $\frac{100 - 200 - 400 - 800}{5}$	100–800 А	Прямоугольная, наружный размер 185×185, гнездо 155×155	1000 2500 8000
Ваттметр ЭТВ щитовой	Через трансформатор тока с коэффициентом трансформации $\frac{100 - 200 - 400 - 800}{5}$	80–800 кВт	То же	1000 2500 8000
Фазометр ЭТВ щитовой	То же		То же	1000 2500 8000
Вольтметр Ц211	Непосредственно	30–250 В	То же	1000 2500 8000
Вольтметр Ц211	Через трансформатор напряжения с коэффициента трансформации $\frac{500 - 1000 - 2000}{100}$	500–2000 В	То же	1000 2500 8000
<b>Примечание.</b> При заказе указывают, при какой частоте тока и с какими трансформаторами тока и напряжения будет работать прибор				

Кроме аппаратуры, предназначенной для контроля электрических режимов, в практике индукционного нагрева применяется аппаратура для измерения температуры нагреваемой заготовки. В качестве приборов для измерения температуры заготовки чаще всего используют термопары или фотопирометры.

Следует заметить, что применение термопар является рациональным лишь при разработке и проверке технологии индукционного нагрева и при проведении научно-исследовательских работ.

При пользовании термопарой ее спай приваривается к нагреваемой заготовке точечной электросваркой. Выводы термопары подключаются к катодному или шлейфовому осциллографам, снабженным приспособлением для фотографирования с экрана электронно-лучевой трубки. Точность контроля температуры с помощью термопар достигает  $\pm 1\%$ .

В производственных условиях температуру нагреваемой заготовки более удобно измерять с помощью фотоэлектрического пирометра, действие которого основано на свойстве фотоэлемента изменять возникающий в нем ток пропорционально падающему от нагретой заготовки лучистому потоку.

Для усиления сравнительно малых фототоков используются специальные электрические схемы с электронным усилителем. Отсчет температуры производится по кривой, отградуированной по выходу усилителя.

#### **2.5.4. Высокочастотные трансформаторы и токопроводы**

Высокочастотные трансформаторы, применяемые в индукционных нагревателях, предназначены для изменения напряжения, подводимого к индуктору. В практике индукционного нагрева используются два типа трансформаторов: автотрансформаторы и понижающие трансформаторы.

Автотрансформатор является устройством, обеспечивающим плавное или ступенчатое изменение напряжения и тем самым — регулирование мощности, потребляемой индуктором. Автотрансформаторы применяются тогда, когда по условиям работы требуется менять темп подачи заготовок к ковочному механизму. Размеры автотрансформатора определяются напряжением и мощностью, на которые он рассчитан. Общий вид автотрансформатора мощностью 650 кВА, применяемого в индукционных нагревателях, работающих при частотах 2500 Гц, приведён на рис. 2.12.

Как видно из чертежа, автотрансформатор состоит из стального магнитопровода, собранного из отдельных пластин, и обмотки (1) с отпайками.

Магнитопровод разделён на пакеты, охлаждаемые водой, проходящей по специальным трубкам. Водой охлаждаются и обмотка автотрансформатора, обычно изготавливаемая из медной трубки. Изменение напряжения на выходе автотрансформатора производится

путём перестановки контактных колодок. Конструкция автотрансформатора, приведённого на рис. 2.12, рассчитана на выход в 750, 715, 675, 640 и 600 В при входе (первичном напряжении) 750 В.

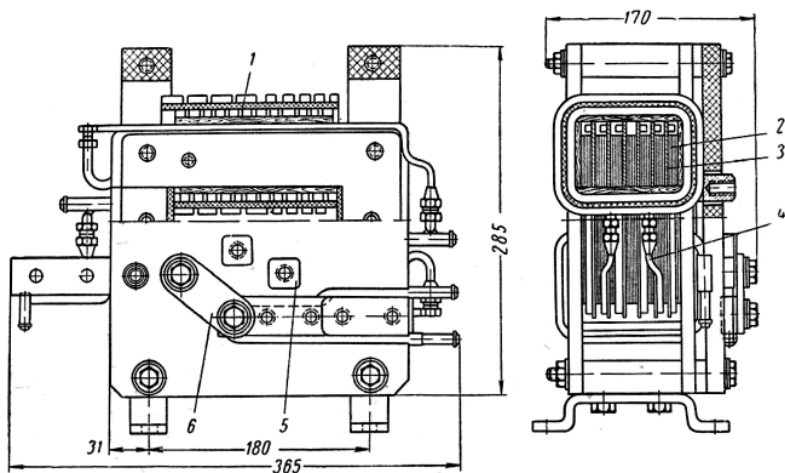


Рис. 2.12. Автотрансформатор на 650 кВА, 750/650 В, 2500 Гц:  
 1 — обмотка с отпайками; 2 — магнитопровод; 3 — медные листы;  
 4 — прямоугольные медные трубки; 5 — вывод отпайки обмотки  
 автотрансформатора; 6 — контактная колодка

Понижающие трансформаторы применяются в практике индукционного нагрева в тех случаях, когда напряжение на индукторе во всех случаях должно быть ниже напряжения на питающих шинах. Такая необходимость может возникнуть, когда расчетное число витков не укладывается в индукторе заданной длины. Уменьшение числа витков в данном случае достигается снижением напряжения на входе индуктора. В отличие от автотрансформатора понижающий трансформатор не обеспечивает плавного или ступенчатого изменения напряжения на выходе и рассчитан на неизменный коэффициент трансформации. Обмотки и магнитопровод высокочастотных понижающих трансформаторов охлаждаются водой.

Токопроводы, предназначенные для передачи электрической энергии повышенной частоты от генератора к индуктору, выполняются из многожильного кабеля или металлических (медных или алюминиевых) шин (рис. 2.13). При применении многожильных кабелей их сечение в силу поверхностного эффекта используется не полностью (рис. 2.13, *a*). Это обстоятельство вынуждает снижать токи повышенной частоты, пропускаемые по кабелю. Длительно допустимые нагрузки током кабелей, проложенных

на открытом воздухе при окружающей температуре  $25^{\circ}\text{C}$ , приведены в табл. 2.5.

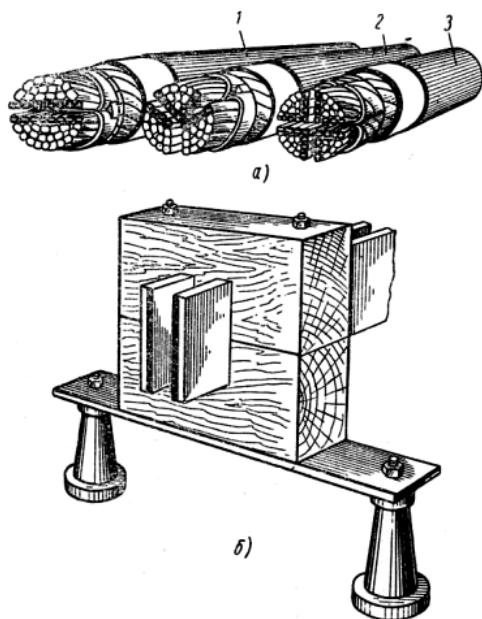


Рис. 2.13. Токопроводы, используемые для передачи токов повышенной частоты: *a* – многожильные кабели и распределение в них тока повышенной частоты; 1 – двухжильный кабель; 2 – трёхжильный кабель; 3 – четырёхжильный кабель; *б* – шинопровод из двух медных или алюминиевых полос (части сечения, по которым проходит ток повышенной частоты, затемнены)

При использовании полосовых шинопроводов толщина полос должна быть не менее  $1,5$ – $1,6$  глубины проникновения тока рабочей частоты. Полосы укладываются параллельно на расстоянии  $10$ – $30$  мм (в зависимости от напряжения) и скрепляются деревянными клещами, как показано на рис. 2.13, *б*. В качестве изоляции между шинами разной полярности используется текстолит, миканит, асбест или воздушный промежуток. Длительно допустимые нагрузки током частотой  $2500$  и  $8000$  Гц шин, выполненных в виде двух параллельных полос, приведены в табл. 2.6.

Токопроводы прокладываются либо вдоль стен цеха, на высоте не менее  $2,5$  м, либо в специальных крытых каналах, проложенных в полу цеха. Покрытие каналов должно иметь блокировку, отключающую ток при обнажении токоведущих частей токопровода.

Таблица 2.5

*Длительно допустимые нагрузки током кабелей, проложенных на открытом воздухе, при окружающей температуре 25° С*

Номинальное сечение жилы, мм	Длительно допустимая сила тока, А								
	Частота тока 1000 Гц			Частота тока 2500 Гц			Частота тока 8000 Гц		
	двужильного	трёхжильного	четырёхжильного	двужильного	трёхжильного	четырёхжильного	двужильного	трёхжильного	четырёхжильного
25	105	92	—	95	80	—	80	55	—
35	120	105	—	105	90	—	85	70	—
50	140	125	200	115	105	175	95	80	130
70	155	145	240	130	125	195	105	95	155
95	175	170	260	150	145	215	120	110	170
120	200	195	310	165	160	240	130	120	180
150	230	210	325	190	180	265	145	135	200

**Примечание.** 1. Для четырёхжильного кабеля с нулевой жилой нагрузка указана на две жилы, соединённые накрест. 2. Применение для передачи токов повышенной частоты кабелей больших сечений нецелесообразно ввиду плохого использования их токонесущих частей

Таблица 2.6

*Длительно допустимые нагрузки током частотой 2500 и 8000 Гц шин, выполненных в виде двух параллельных полос*

Размер шин, мм	Допустимая нагрузка током (при частоте тока 2500 Гц), А	Допустимая нагрузка током (при частоте тока 8000 Гц), А	Размер шин, мм	Допустимая нагрузка током (при частоте тока 2500 Гц), А	Допустимая нагрузка током (при частоте тока 8000 Гц), А	Размер шин, мм	Допустимая нагрузка током (при частоте тока 2500 Гц), А	Допустимая нагрузка током (при частоте тока 8000 Гц), А
40×4	330	230	60×10	540	405	106×6	815	610
50×5	415	285	80×6	660	490	100×8	825	615
60×6	500	375	80×8	670	500	100×10	840	625
60×8	530	395	80×10	680	510	120×8	960	715
						120×10	990	740

### 2.5.5. Механизмы подачи заготовок в индуктор и извлечения их после нагрева

Подача заготовок к индуктору и извлечение их после нагрева производится с помощью специальных, автоматически управляемых механизмов. К числу таких механизмов относятся различного вида толкатели, загрузочные устройства и приспособления для выдачи заготовок из нагревателей.

Толкатели используются для подачи заготовок к индуктору и проталкивания их по индуктору в процессе нагрева или после его окончания. В практике индукционного нагрева применяются толкатели четырех типов: пневматические, пневмогидравлические, гидравлические и механические.

Пневматический толкатель (рис. 2.14) состоит из цилиндра (1), в который подается сжатый воздух, и поршня (3) со штоком (2). На конце штока закрепляется наконечник (7), упирающийся в проталкиваемую заготовку. В корпус толкателя вмонтированы концевые выключатели (4) и (6). В конце хода поршень, воздействуя на эти концевые выключатели, подает сигнал в схему автоматического управления нагревателя. Толкатель закрепляется на кронштейне (5) и центрируется по высоте болтом (9), сочлененным с хомутом (10).

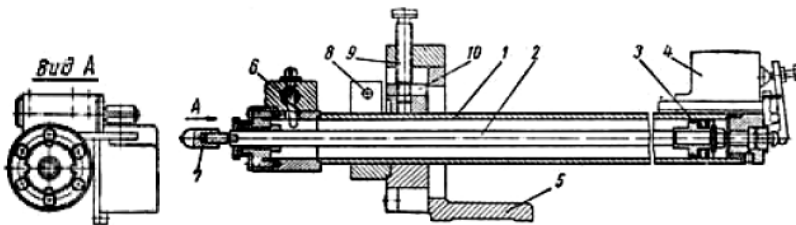


Рис. 2.14. Пневматический толкатель:

- 1 – цилиндр; 2 – шток; 3 – поршень; 4 и 6 – концевые выключатели;
- 5 – кронштейн; 7 – наконечник; 8 – болт хомута;
- 9 – болт вертикального перемещения толкателя; 10 – хомут

Недостатком пневматического толкателя является неравномерный ход проталкиваемой заготовки, что в некоторых случаях может привести к выбросу заготовки из загрузочного устройства и индуктора.

Пневмогидравлический толкатель лишен этого недостатка и обеспечивает равномерность подачи заготовки. В этом толкателе с одной стороны цилиндра подается масло, а с другой – сжатый воздух. Образующаяся при этом масляная подушка обеспечивает плавный ход поршня при изменении усилия, необходимого

для проталкивания заготовок. Для нагнетания масла в пневмогидравлическом толкателе используется сжатый воздух.

Гидравлический толкатель отличается от пневмогидравлического тем, что для проталкивания поршня используется гидравлический привод с мотором и масляным насосом. В практике индукционного нагрева гидравлические толкатели используются сравнительно редко вследствие сложности гидравлического привода.

Механические толкатели применяются различных типов: с эксцентриком, кривошипно-шатунным механизмом, а также винтовым или цепным приводом. Механические толкатели с эксцентриком или кривошипно-шатунным механизмом применяются при нагреве мелких заготовок длиной до 150 мм.

Цепные и винтовые толкатели используются при нагреве заготовок значительной длины (до 2 м). Вид механического толкателя с кривошипным приводом приведен на рис. 2.15. Толкатель состоит из штока (1), осуществляющего возвратно-поступательное движение с помощью кривошипного вала (2). Вал вращается при помощи электродвигателя (3) через редуктор (4). Меняя шестерни (5) и величину эксцентриситета кривошипа, можно изменять величину и частоту хода толкателя.

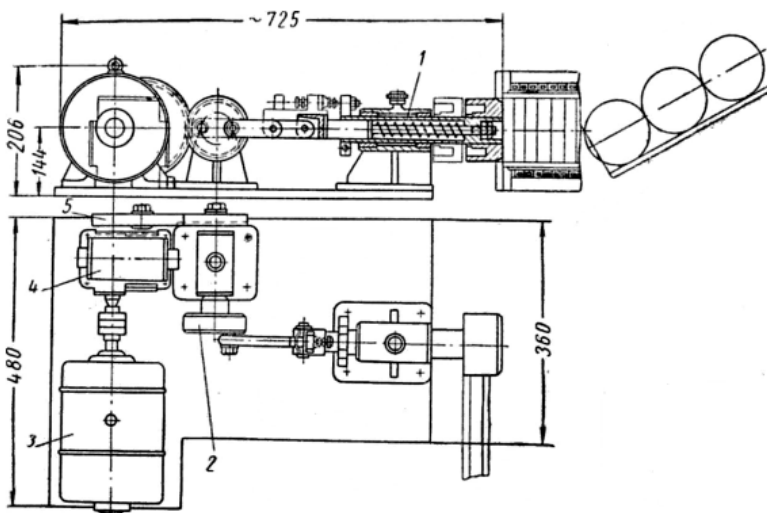


Рис. 2.15. Механический толкатель с кривошипным приводом

Для подачи заготовок к толкателю применяются специальные грузочные устройства (магазины). По конструкции грузочные устройства можно разделить на два типа: бункерные и лотковые.



В лотковых загрузочных устройствах заготовки укладываются в один ряд и подаются к толкателю постепенно, скатываясь или съезжая с наклонных направляющих. В бункерных устройствах заготовки располагаются в несколько рядов в специальном бункере.

Схема бункерного загрузочного устройства с автоматическим управлением показана на рис. 2.16. Заготовки (1) загружаются через верх бункера (2) и при помощи задвижек (4) и (3), снабженных механическим или электромагнитным приводом (5), выгружаются по одной через заданные промежутки времени. В момент, когда задвижка (3) открывается (рис. 2.16, а), заготовка проваливается на задвижку (4). В следующий момент (рис. 2.16, б) задвижка (3) возвращается в исходное положение. Выгрузка заготовки происходит при открывании задвижки (4); при этом заготовка выпадает из камеры (рис. 2.16, в) и по направляющему желобу подается к индуктору. Бункерные устройства вмещают обычно больше заготовок, чем лотковые, но сложнее последних по конструкции.

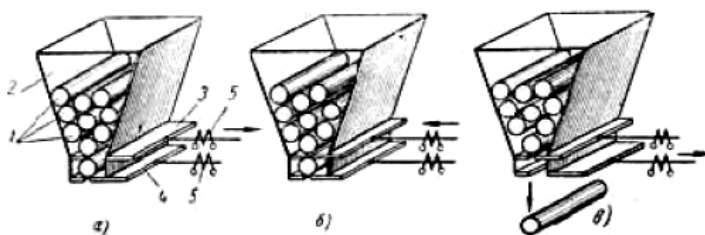


Рис. 2.16. Схема загрузочного устройства бункерного типа

Ответственной операцией при индукционном нагреве является извлечение нагретых заготовок из индуктора. Для этой цели применяются приспособления, конструкция которых определяется формой заготовки, ее размерами и технологией последующей обработки. Так, например, для извлечения нагретых заготовок, у которых отношение длины к диаметру не превышает трех, у выходных концов индукторов устанавливаются наклонные лотки. По этим лоткам нагретые заготовки скользят к ковочным машинам.

При выталкивании данных заготовок для предотвращения зависания в индукторе, часто приводящего к повреждению футеровки, используются специальные устройства в виде рольгангов, передвигающихся кареток, захватывающих устройств и так далее.

## 2.6. Автоматическое управление работой индукционных нагревателей

Главная задача автоматического управления работой индукционного нагревателя заключается в поддержании постоянства конечной температуры нагрева заготовок. Выдерживание заданной температуры заготовки может быть осуществлено либо сохранением постоянства времени нагрева при неизменном напряжении на шинах, питающих индуктор, либо правильной дозировкой энергии, подаваемой на индуктор для нагрева одной заготовки, или, наконец, применением устройств, контролирующих температуру заготовки в процессе нагрева.

В первом случае в качестве автоматического устройства, отключающего индуктор через определенные промежутки времени, используется реле времени, во втором – реле энергии и в третьем – различные фотопирометры.

Первый способ, сравнительно простой и точный, является наиболее распространенным в практике индукционного нагрева.

Второй способ обладает меньшей точностью вследствие того, что одинаковое количество электрической энергии, поданной на индуктор, не всегда обеспечивает нагрев заготовки до одной и той же температуры. Это обстоятельство объясняется тем, что при изменении напряжения, подаваемого на индуктор, а следовательно, и времени нагрева изменяется величина потерь тепла путем конвекции и лучеиспускания.

Третий способ, основанный на применении фотопирометров, является сравнительно сложным и может рекомендоваться при условии сохранения чистоты поверхности нагреваемых заготовок и принятия специальных мер по удалению дыма и копоти из пространства между фотопирометром и нагреваемой заготовкой.

Необходимо заметить, что в случае нагрева заготовок в нагревателях непрерывного действия постоянство температуры нагрева может также выдерживаться путем подбора величины скорости перемещения заготовки через индуктор.

Очевидно, что во всех случаях поддержания заданной конечной температуры нагрева заготовки прежде всего необходимо обеспечить автоматическое управление работой грузозачного устройства и механизма извлечения заготовки из индуктора.

Для управления работой пневматических, пневмогидравлических и гидравлических грузозачных устройств, а также механизмов извлечения заготовок из индуктора применяются электропневматические краны.

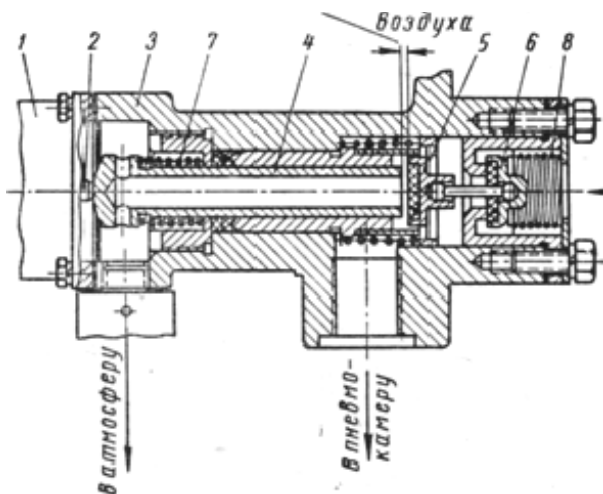


Рис. 2.17. Электропневматический кран

Электропневматический кран (рис. 2.17) состоит из электромагнита (1) с толкателем-сердечником (2) и пневматического клапана в корпусе (3). При прохождении тока через электромагнит подвижный толкатель-сердечник перемещает шток-золотник (4), который нажимает на выпускной клапан (5), сдвигая его вместе с впускным клапаном (6) в правую сторону.

Клапан (6) открывает доступ воздуха в среднюю полость корпуса и далее – в цилиндр толкателя загрузочного устройства. При отключении тока от электромагнита шток-золотник (4) под действием пружины (7) возвращается в исходное (левое) положение, образуя зазор с клапаном (5), а клапан (6) под действием пружины (8) закрывает отверстие для доступа воздуха из ресивера. В этом положении воздух, поступающий из цилиндра толкателя загрузочного устройства при обратном движении поршня, выходит в атмосферу.

Для управления работой толкателей загрузочных устройств и механизмов извлечения заготовок из индуктора могут использоваться электромагнитные приводы, которые состоят из катушки, сердечника и штока.

Для того чтобы исключить возможность вывода из строя индуктора вследствие прекращения подачи воды в систему охлаждения или падения давления в системе сжатого воздуха, в системе автоматики применяется реле защиты. В цепи катушки реле защиты имеются блок-контакты реле давления воды и воздуха, контакты максимального реле, отключающего нагреватель в случае перегрузки

его током, и блок-контакты реле безопасности, исключающего возможность открывания щитков, прикрывающих доступ к элементам индуктора, находящимся под напряжением.

Схема автоматики индукционного нагревателя, состоящая из перечисленных выше элементов, работает следующим образом. Нажимом кнопки включается реле защиты. Электрическая схема включения реле защиты собрана таким образом, что одновременно с ним включается контактор и реле времени (или энергии). С момента включения индуктор находится под напряжением и начинается нагрев. По истечении заданного интервала реле времени срабатывает и включает цепь электромагнитного привода разгрузочного устройства (например, каретки), которая подходит к индуктору, нажимая при этом на выключатель электропневматического крана толкателя загрузочного устройства. Под воздействием сжатого воздуха или жидкости, поступившей в толкатель, последний проталкивает нагретую заготовку в индуктор. В конце хода толкатель нажимает выключатели реле времени, привода каретки разгрузочного устройства и своего электропневматического крана обратного хода.

В результате каретка отходит к ковочному механизму с нагретой заготовкой, в индукторе начинается нагрев очередной заготовки, а толкатель становится в первоначальное положение. Затем цикл повторяется снова.

Настройка схемы автоматики индукционных нагревательных устройств производится с помощью фотопирометров и термопар, обеспечивающих контроль температуры заготовок.

## **2.7. Источники питания установок индукционного нагрева**

В качестве источников тока повышенной частоты для питания индукционных установок используют электромашинные генераторы и статические преобразователи частоты.

Электромашинные преобразователи состоят из индукторного генератора повышенной частоты, ротор которого приводится во вращение трёхфазным двигателем. Генераторы выпускают на частоту 800, 1000, 2500, 8000, 10000 Гц и мощностью до 2500 кВт. Они позволяют осуществить групповое питание нескольких установок. Их обычно устанавливают в специальных помещениях. Это самая дорогостоящая часть индукционной установки.

Ламповые генераторы преобразуют ток промышленной частоты в высокочастотный (от 60 кГц до нескольких мегагерц). Преобразование тока в генераторе проводят дважды: сначала ток

промышленной частоты выпрямляют, а затем постоянный ток преобразуют в переменный высокой частоты. Простейшие преобразователи состоят из выпрямителя с анодным трансформатором, генераторной лампы (триода) и колебательного контура. Мощности таких генераторов измеряются десятками киловатт. Их обычно используют для закалки стальных изделий.

К статическим преобразователям частоты относят тиристорные и ионные преобразователи, позволяющие получать ток с частотой до 10 кГц.

В тиристорных преобразователях частоты совмещаются два процесса: выпрямление и инвертирование (преобразование постоянного тока в ток повышенной частоты). Чаще всего выпрямление и инвертирование осуществляют разные группы тиристоров.

Основная часть ионного преобразователя – электровакуумный прибор с холодным или нагретым катодом, наполненный разряженным газом. Принцип действия преобразователя примерно такой же, как у тиристорного.

В отличие от электромашинных преобразователей статические преобразователи позволяют изменять частоту в широком диапазоне весьма простыми средствами. Это даёт возможность автоматизировать и оптимизировать процесс нагрева.

Статические преобразователи имеют больший КПД, чем электромашинные. При использовании последних расход электроэнергии для нагрева стали до 1250° С составляет 450–500 кВт×ч/т. При использовании статических преобразователей он снижается примерно на 10%. Масса оборудования электромашинного преобразователя в 1,5–3 раза больше массы статического.

## **2.8. Электрические схемы установок индукционного нагрева**

Принципиальная электрическая схема установки индукционного нагрева показана на рис. 2.18. Она состоит из следующих основных элементов: генератора (1), индуктора (2) с помещенной в него заготовкой (7), батареи конденсаторов (3), контактора (4), комплекта электроизмерительных приборов (вольтметра, ваттметра, фазометра высокой частоты и амперметра) (5), токопроводов (6).

Из рис. 2.18 видно, что схема индукционного нагревателя представляет собой колебательный контур с индуктивным емкостным и активным сопротивлениями. Индуктивное сопротивление в данном случае представлено индуктором, емкостное – батареей конденсаторов, а активное – системой индуктор–заготовка и соединительными проводами.

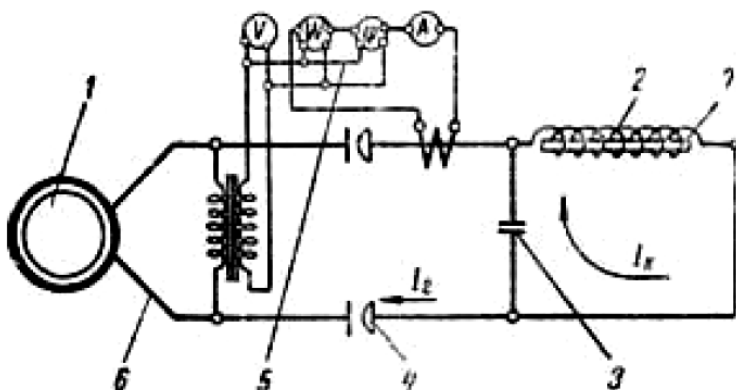


Рис. 2.18. Принципиальная электрическая схема индукционного нагревателя

В практике индукционного нагрева встречаются три основных типа электрических схем индукционных нагревателей: с понижающим трансформатором, с автотрансформатором и с индуктором, имеющим отпайки.

Схема с понижающим высокочастотным трансформатором применяется в случаях, когда индуктор не может быть конструктивно выполнен на номинальное напряжение генератора, то есть число витков спирали, рассчитанное по номинальному напряжению, не может быть уложено на заданной длине индуктора. Понижающий трансформатор включается в цепь контура непосредственно перед индуктором. Коэффициент трансформации выбирается из заданного значения числа витков индуктора.

Схема с автотрансформатором (рис. 2.19) и с индуктором, имеющим отпайки (рис. 2.20), применяется при централизованном питании индукционных нагревательных устройств, когда необходимо изменять темп работы нагревателя. В схеме с автотрансформатором последний включается перед колебательным контуром и обеспечивает ступенчатое изменение напряжения на индукторе до пределов, соответствующих необходимому темпу работы нагревательного устройства. Для изменения производительности нагревательного устройства как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения расчет нового индуктора целесообразно вести на среднее из напряжений, которое может быть получено на выходе автотрансформатора.

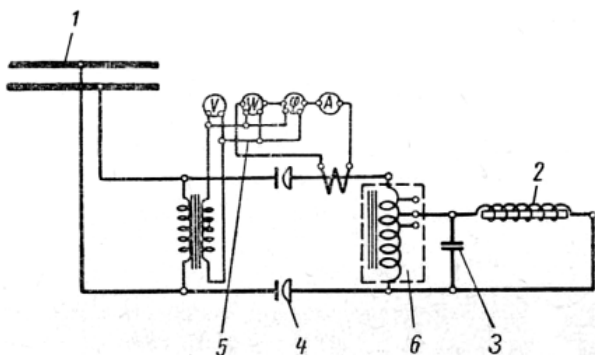


Рис. 2.19. Схема индукционного нагревателя с автотрансформатором:  
 1 – шины общей системы питания; 2 – индуктор; 3 – конденсаторная батарея; 4 – контактор; 5 – комплект измерительных приборов;  
 6 – автотрансформатор

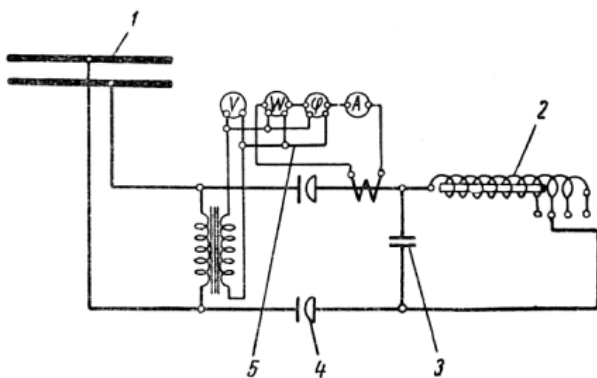


Рис. 2.20. Схема индукционного нагревателя с индуктором, имеющим отпайки: 1 – шины общей системы питания; 2 – индуктор; 3 – конденсаторная батарея; 4 – контактор; 5 – комплект измерительных приборов

В схеме с индуктором, имеющим отпайки, изменение темпа работы достигается уменьшением или увеличением числа витков спирали индуктора, подключаемых под напряжение. Схема с индуктором, имеющим отпайки, уступает схеме с автотрансформатором. Она не обеспечивает сохранения первоначальной активной длины индуктора и постоянства настройки контура нагревательного устройства.

## 2.9. Классификация индукционных нагревателей по режиму нагрева

Индукционные нагревательные устройства появились в промышленности в начале XX века, хотя явление индукции токов в металле было известно значительно раньше. Это обстоятельство может быть объяснено отсутствием тогда мощных высокочастотных источников электрической энергии.

Начиная с 30-х годов в ряде лабораторий СССР проводились исследования по нагреву токами высокой частоты (ТВЧ), в результате которых в промышленности появились установки для индукционного нагрева под поверхностную закалку. С 1940 года индукционные нагревательные устройства используются для сквозного нагрева металла под ковку. В настоящее время индукционный нагрев металлов получает все более широкое применение.

В зависимости от режима нагрева индукционные нагреватели обычно делятся на четыре типа: методического действия, периодического действия, комбинированные и непрерывного нагрева.

У нагревателей методического действия в индукторе нагревается одновременно несколько заготовок, последовательно перемещаемых по направляющим через определенные интервалы времени. При смене заготовок индуктор не отключается.

В нагревателях периодического действия одновременно нагревается одна заготовка. Во время смены заготовок индуктор отключается.

Комбинированные индукционные нагреватели могут использоваться как в качестве методических, так и в качестве периодических нагревательных устройств.

В нагревателях непрерывного нагрева заготовки (обычно длинные) безостановочно перемещаются с постоянной скоростью через индуктор.

Схема нагревателя периодического действия показана на рис. 2.21, *а*. В индуктор (1) толкателем (2) загружается только одна заготовка (3), которая при достижении заданной температуры нагрева выталкивается с помощью следующей нагреваемой заготовки, загружаемой в индуктор. В дальнейшем процесс периодически повторяется.

На рис. 2.21, *б* изображена схема, поясняющая работу индукционного нагревателя методического действия. В таком нагревателе мерные заготовки (2) с постоянной скоростью или через интервалы времени перемещаются внутри индуктора (1) с помощью гидравлического или пневматического механизма (3).



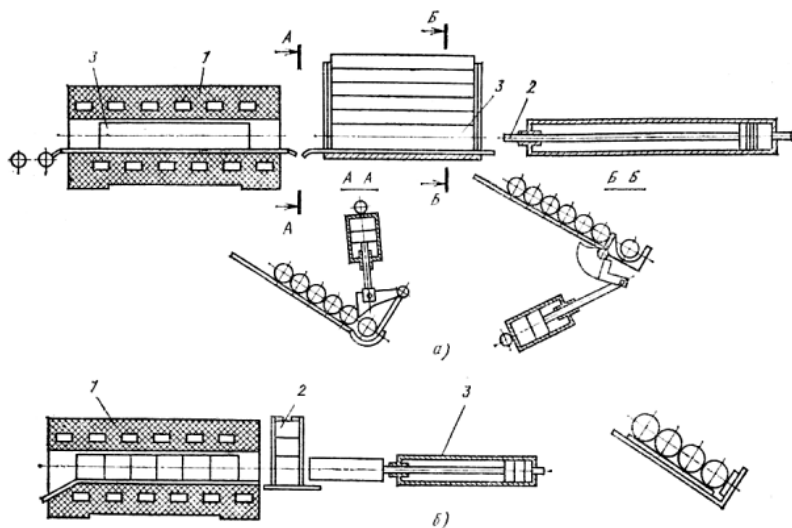


Рис. 2.21. Схема индукционного нагревателя:  
*а* – периодического действия; *б* – методического действия

В индукторе одновременно находится несколько заготовок. Длина индуктора, число заготовок в нем и скорость их перемещения выбираются таким образом, чтобы заготовки на выходе из индуктора имели ковочную температуру и определенный перепад температур между поверхностью заготовки и её центром. Рекомендуется в индукторе размещать не менее трех заготовок, что обеспечит практически неизменность электрического режима работы нагревателя в момент загрузки холодной заготовки. Продолжительность ( $\tau$ ) нагрева одной заготовки в методическом нагревателе  $\tau = nt$ , где  $n$  – число одновременно находящихся в индукторе заготовок;  $t$  – время проталкивания одной заготовки через индуктор.

Методические нагреватели по сравнению с нагревателями периодического действия имеют более высокий КПД (на 10–15%) и производительность.

Индукторы для сквозного нагрева заготовок обладают низким коэффициентом мощности ( $\cos \phi$ ). Для его увеличения параллельно с каждым индуктором к источнику тока подключают батарею конденсаторов, реактивная мощность которой в 10–15 раз больше активной мощности индуктора. Для методических нагревателей изменение емкости батареи конденсаторов в процессе нагрева обычно не требуется. В периодических нагревателях и в нагревателях

с секционированными индукторами возникает необходимость изменения емкости конденсаторной батареи в разные периоды нагрева заготовок, что осуществляется с помощью регулятора коэффициента мощности.

Энергоснабжение нескольких индукционных нагревателей током повышенной частоты можно обеспечивать одним из следующих способов: каждый нагреватель снабдить своим преобразователем частоты (индивидуальный способ питания); все нагреватели подключить к общим шинам; к этим же шинам подключить один преобразователь большой мощности или несколько маломощных преобразователей (централизованное питание). Каждый из этих способов питания имеет преимущества и недостатки. Выбор способа питания нагревателей в конкретном случае должен быть обоснован технико-экономическим расчётом с учетом местных условий.

Нагрев мерных цилиндрических заготовок длиной до 300 мм выгодно выполнять в индукционных методических установках с цилиндрическими индукторами. В такие нагреватели заготовки могут поступать с наклонных лотков (2) (рис. 2.22, *а*) и загружаться в индуктор толкателями различных типов – пневматическими, гидравлическими, механическими (реечными и кривошипными). В отдельных случаях заготовки на лотке удерживает специальный механизм, периодически подающий нижнюю заготовку на линию толкатель-индуктор. Для перемещения заготовок используют также шаговые механизмы, магнитные ролики с постоянными магнитами (для ферромагнитных материалов), протяжные роликовые механизмы.

Короткие заготовки, имеющие косые торцы, заусенцы, значительное искривление оси, можно греть в отдельных случаях на всю длину в карусельных нагревателях с щелевыми индукторами (рис. 2.22, *б*).

Индукционный нагрев цилиндрических заготовок длиной 300–2000 мм осуществляют в цилиндрических, овальных и (чаще) в секционированных индукторах. Секционированные индукторы применяют для нагрева заготовок длиной до 8 м, при этом заготовки перемещаются системой поддерживающих и прижимных роликов.

Индукционный нагрев концов заготовок и местный нагрев целесообразно выполнять в специальных индукторах – кольцевых, щелевых и овальных; заготовки в такие индукторы подаются карусельными столами или механизмами барабанного типа.

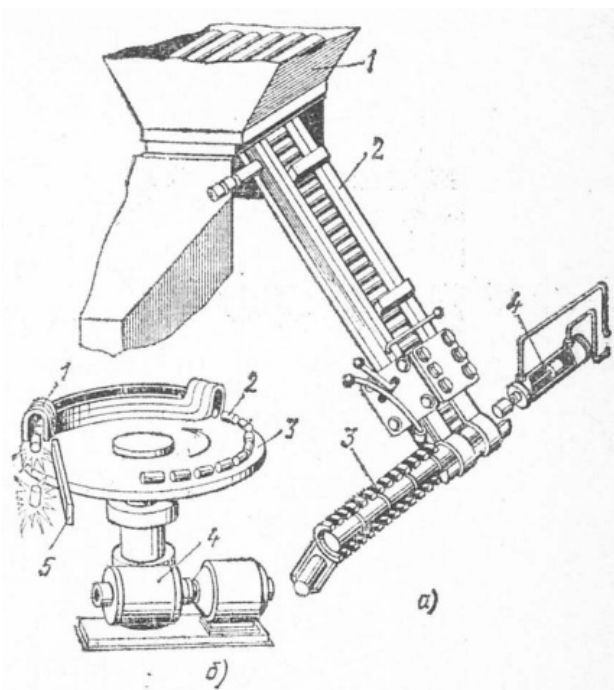


Рис. 2.22. Методические индукционные установки для нагрева мерных цилиндрических заготовок: *а* – установка с толкателем; 1 – бункер для заготовок; 2 – наклонный лоток; 3 – индуктор; 4 – механизм загрузки; *б* – карусельная установка с шелевым индуктором; 1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – вращающий стол; 4 – механизм привода вращения стола; 5 – выбрасыватель заготовок

Индукционные нагревательные устройства выполняют по двум принципиально различным схемам:

1) нагреватель и цикл его работы не объединены механической или электрической связью с работой ковочного оборудования; рабочий получает нагретую заготовку из нагревателя и передаёт её в ковочный агрегат;

2) нагреватель встроен в ковочный агрегат и работает в едином с ним автоматическом цикле; работа такого нагревательно-ковочного агрегата обычно полностью автоматизируется.

Нагреватели, выполненные по первой схеме, бывают периодического, непрерывного и методического действия. Нагреватели, выполненные по второй схеме, обычно конструируют специализированными применительно к ковочным механизмам, в которые их встраивают.

## **2.10. Достоинства и недостатки индукционного способа нагрева**

Характерная особенность индукционного нагрева заключается в том, что всё необходимое для нагрева заготовки тепло возникает в самой заготовке (прямой способ нагрева). Это обстоятельство выгодно отличает способ индукционного нагрева от других (косвенных) способов электронагрева стали и особенно от нагрева в пламенных печах, позволяя увеличить скорость нагрева и тем самым резко сократить потери за счет лучеиспускания.

Другими положительными факторами, выгодно отличающими метод индукционного нагрева, являются:

- 1) почти полное отсутствие окалины, обеспечивающее экономиию металла и внедрение в практику прогрессивных технологических процессов обработки металла давлением;
- 2) стабильность режима нагрева, позволяющая автоматизировать процессы нагрева заготовок и последующую их обработку;
- 3) отсутствие обезуглероживания поверхностей нагреваемых заготовок и сохранение механических свойств металла;
- 4) уменьшение необходимой производственной площади и значительное облегчение труда рабочих-штамповщиков;
- 5) высокая скорость нагрева, позволяющая в значительной степени повышать производительность нагревательных устройств и связывать их работу непрерывным циклом с ковочными, прокатными и другими механизмами.

К недостатку индукционного нагрева следует отнести необходимость преобразования электрического тока, что приводит к значительным потерям энергии (до 30%).

### 3. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПОСОБА НАГРЕВА

#### 3.1. Область применения

Электроконтактный способ нагрева заготовок постоянного, а иногда и переменного сечения может быть использован для всех операций обработки металлов давлением, а также многих видов термообработки. Этот метод применим для нагрева заготовок в виде прутков, проволоки, труб значительной длины, но малого сечения.

Контактным способом рекомендуется нагревать длинномерные заготовки ( $l > 1,5d^2$ , где  $l$  – длина заготовки;  $d$  – диаметр заготовки), имеющие постоянное поперечное сечение по длине. Этим методом можно нагревать прутки диаметром до 100 мм и профильные заготовки. На практике применяют следующие технологические схемы нагрева (рис. 3.1).

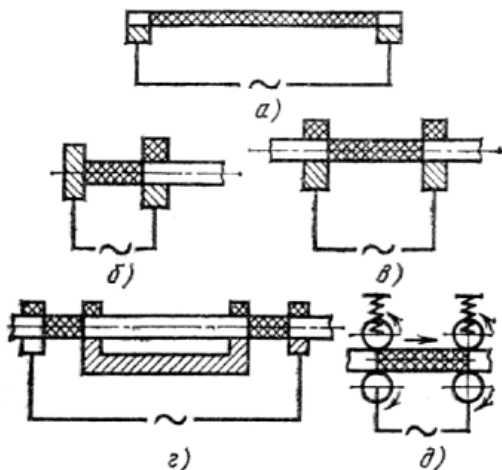


Рис. 3.1. Технологические схемы электроконтактного нагрева:  
*а* – нагрев по всей длине заготовки; *б* – только одного конца заготовки;  
*в* – некоторого участка длинномерной заготовки; *г* – нескольких участков заготовки одновременно; *д* – непрерывный нагрев заготовки при ее движении между двумя парами роликов

Широкое применение электроконтактный нагрев находит в высадочных машинах, используемых в серийном кузнечно-штамповочном производстве. Существуют установки, в которых нагрев цилиндрических и прямоугольных прутков и полос совмещается

с операциями пластической деформации: гибкой, осадкой, плющением, оттяжкой, рубкой, навивкой спиральных пружин. Электроконтактный способ нагрева наиболее целесообразно проводить в массовом производстве.

### 3.2. Сущность электроконтактного нагрева

Если через заготовку пропустить электрический ток, то в ней по закону Джоуля—Ленца будет выделяться тепловая энергия (Дж), которую можно вычислить по формуле

$$Q = I^2 \cdot R \tau, \quad (3.1)$$

где  $I$  — действующее значение силы тока, протекающего через заготовку, А;  $R$  — активное сопротивление нагреваемой заготовки, Ом (определяется с учетом глубины проникновения тока в металл);  $\tau$  — время протекания тока, с.

При прохождении тока по заготовке движущиеся в ней электрические заряды сталкиваются с атомами вещества и отдают им часть своей электрической энергии. В результате таких столкновений атомы начинают колебаться с большей интенсивностью, что приводит к повышению температуры заготовки. На этом явлении и основан электроконтактный метод нагрева. Электроконтактный нагрев характеризуют большие токи, пропускаемые через нагреваемые заготовки (1–40 кА), и малые подводимые напряжения (2–20 В).

Схема силовой цепи электроконтактной установки показана на рис. 3.2. К нагреваемой заготовке (1) с помощью контактов (2) подключена вторичная обмотка (3) понижающего трансформатора, электрическая энергия к которому поступает через контактор (5) от силовой электрической сети напряжением 380 или 220 В, частотой 50 Гц, к которой подключена первичная обмотка (4) силового трансформатора.

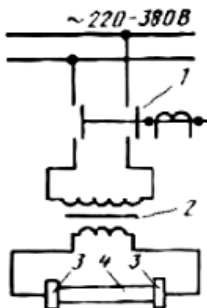


Рис. 3.2. Схема электроконтактной установки

### 3.3. Теоретические основы способа

#### 3.3.1. Прохождение переменного тока через нагреваемую заготовку

В случае пропускания по проводнику (заготовке) постоянного тока, когда величина сопротивления зависит лишь от температуры, определение  $Q = I^2 \cdot R \tau$  не представляет трудностей. Несложным также будет определение величины напряжения, которое необходимо подвести к заготовке, и времени нагрева при заданном напряжении.

Иначе обстоит дело, когда по проводнику пропускается переменный ток, что обычно имеет место при контактном нагреве. Необходимость использования переменного тока при контактном нагреве обуславливается трудностью получения больших мощностей постоянного тока при низких напряжениях (порядка 5–15 В). В этом случае величина сопротивления проводника (нагреваемой заготовки) будет зависеть не только от удельного сопротивления, изменяющегося с повышением температуры, но также и от ряда других факторов, главными из которых будут частота тока, магнитные свойства материала заготовки и её диаметр.

Из электротехники известна формула, приближенно устанавливающая соотношение между величинами сопротивления металлического проводника при прохождении по нему постоянного и переменного токов:

$$R_A = R_{nm} \cdot 0,45d \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}}, \quad (3.2)$$

где  $R_A$  — активное сопротивление проводника при прохождении по нему переменного тока, Ом;  $R_{nm}$  — сопротивление проводника при прохождении по нему постоянного тока, Ом;  $d$  — диаметр проводника, м;  $f$  — частота тока, Гц;  $\rho$  — удельное сопротивление, Ом×м;  $\mu$  — магнитная проницаемость.

При нагреве проводника значение  $R_{nm}$  может быть выражено как

$$R_{nm} = \frac{\rho_l l}{S}, \text{ Ом}, \quad (3.3)$$

где

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + a(t - 20)] \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (3.4)$$

В формулах (3.3), (3.4)  $\rho_t$  и  $\rho_{20}$  — удельные сопротивления проводника при температуре  $t$  и  $20^\circ \text{C}$ ;  $l$  и  $S$  — длина и площадь поперечного сечения проводника;  $a$  — температурный коэффициент.

В случае нагретого проводника (заготовки) с диаметром  $d$  формула (3.2) примет вид

$$R_A = \frac{0,45 \rho_t l}{S d} \sqrt{\frac{\mu f}{\rho_t}} = 0,57 \frac{l}{d} \sqrt{\mu \rho_t f^3}, \text{ Ом}, \quad (3.5)$$

где  $R_A$  – активное сопротивление проводника (заготовки), нагретого до температуры  $t^\circ \text{C}$ .

Анализ правой части формулы (3.5) показывает, что при нагреве проводника (заготовки) изменению подвергаются магнитная проницаемость и удельное электрическое сопротивление. Остальные величины ( $l$ ,  $d$ ,  $f$ ) в процессе нагрева не претерпевают изменений и не влияют на величину  $R_A$ .

Магнитная проницаемость при нагреве резко падает, что приводит к увеличению глубины проникновения тока, а следовательно, и к уменьшению активного сопротивления. При этом влияние  $\mu$  на величину активного сопротивления при нагреве сказывается тем сильнее, чем меньше отношение  $\frac{d}{2\delta}$ , где  $d$  – диаметр проводника;  $\delta$  – глубина проникновения в него тока, которая определяется по формуле Штейнмеца:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \cdot \rho}{\mu_2 \cdot f}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_2 \cdot f}}, \text{ м}, \quad (3.6)$$

где  $f$  – частота тока, Гц;  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом·м;  $\mu$  – магнитная проницаемость.

Иначе говоря, влияние  $\mu$  на величину активного сопротивления возрастает с увеличением диаметра нагреваемой заготовки.

Что касается удельного электрического сопротивления, то с повышением температуры проводника (заготовки) величина удельного сопротивления возрастает, что в свою очередь приводит к увеличению значения  $R_A$ .

Рассмотрим, как будет изменяться ток, проходящий через нагреваемую заготовку. По закону Ома для участка цепи с активным  $R_A$  и индуктивным  $X_L$  сопротивлением эффективная величина тока  $I$ , вызывающая тепловое действие, определится как

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_A^2 + X_L^2}}, \text{ А}, \quad (3.7)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к цепи, В.

Для нагретого проводника при  $R_a = R_A$  и  $X_L = X_L$ , формула (3.6) примет вид:



$$I_t = \frac{U}{\sqrt{R_{A_t}^2 + X_{L_t}^2}}, \quad (3.8)$$

где  $I_t$  – эффективная величина тока, проходящего через проводник (заготовку) с температурой  $t^\circ \text{C}$ , А.

Входящее в формулу (3.8) индуктивное сопротивление  $X_{L_t}$  зависит от величины проходящего по проводнику тока и при неизменной частоте и напряжении будет тем выше, чем больше диаметр проводника (нагреваемой заготовки).

Анализ формулы (3.8) показывает, что при нагреве проводника (заготовки) эффективная величина проходящего по нему тока не остается постоянной и меняется в зависимости от изменения величин  $R_{A_t}$  и  $X_{L_t}$ . Сложный характер изменения этих величин вынуждает пользоваться при расчете установок контактного нагрева приближенными формулами, включающими в себя коэффициенты и величины, выведенные на основании опытных данных.

На рис. 3.3 приведен график изменения величины тока при нагреве стальных заготовок различного диаметра. Из графика видно, что наибольшее изменение тока наблюдается при нагреве заготовки с меньшим диаметром (кривая 1). Величина тока в этом случае резко уменьшается за счет температурного увеличения сопротивления. Влияние поверхностного эффекта (соотношение  $\frac{d}{2\delta}$  мало) и индуктивности незначительно и не вызывает компенсирующего уменьшения сопротивления при повышении температуры.

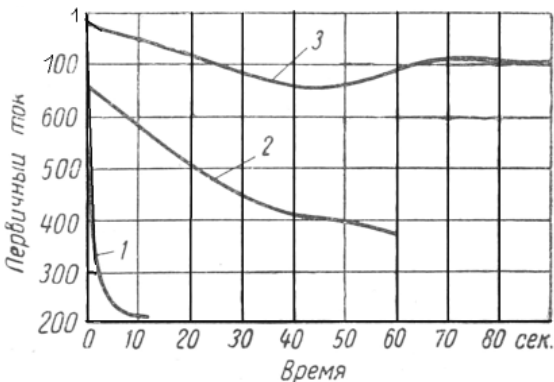


Рис. 3.3. График изменения тока при нагреве заготовок различного диаметра: 1 – диаметр заготовки 25 мм; скорость выделения тепла 5,9 кал/с на 100 мм длины; 2 – диаметр заготовки 45 мм, скорость выделения тепла 4,15 кал/с на 100 мм длины; 3 – диаметр заготовки 65 мм, скорость выделения тепла 5,3 кал/с на 100 мм длины

Иначе протекает процесс нагрева заготовки с большим диаметром (кривая 3). Вследствие значительного влияния поверхностного эффекта и индуктивности, вызывающих увеличение сопротивления, величина тока в начале нагрева ограничивается. С повышением температуры влияние перечисленных факторов на сопротивление ослабевает, но зато наблюдается рост сопротивления за счет температурного приращения. В результате общее сопротивление заготовки, а следовательно, и ток не претерпевают в процессе нагрева значительных изменений.

### 3.3.2. Прохождение электрического тока через систему «контакт—заготовка»

Контакты электронагревательной установки являются своего рода «воротами», через которые электрический ток поступает в заготовку. От материала и конструкции контактов, а также от режима их использования в значительной степени зависит эффективность работы установки контактного нагрева.

Если зажать с некоторым усилием в контактах стальную заготовку (рис. 3.2) и пропускать через нее ток, постепенно повышая его, то наступит момент, когда части заготовки нагреются под контактами до температуры, значительно превышающей среднюю температуру заготовки. Дальнейшее увеличение тока приведет к расплавлению и выбросу металла из-под контактов. Если увеличить давление контактов на заготовку, то можно повышать силу тока, проходящего через заготовку, до тех пор, пока снова не начнется перегрев металла под контактами. Предел величины допустимого давления будет определяться прочностью материала контактов или нагретой заготовки.

Из изложенного следует, что максимальное значение силы тока, пропускаемого через заготовку, в значительной степени определяется давлением, с которым контакты прижаты к заготовке. Для того чтобы убедиться в правильности высказанного положения, рассмотрим схему (рис. 3.4), на которой показано в увеличенном виде касание части контактной поверхности и нагреваемой заготовки. Как можно заметить, первоначальное касание при отсутствии давления ( $p = 0$ ) происходит всего лишь в нескольких точках, что практически всегда имеет место независимо от того, как тщательно обработана поверхность контакта и нагреваемой заготовки.

Для простоты рассуждения рассмотрим элемент контактной поверхности со стороной  $a$  и площадью  $\Delta s = a^2$ . Касание этого элемента к заготовке происходит в одной точке  $o$ . Если при указанной схеме касания через систему *контакт—заготовка* пропустить ток,

то распределение его плотности будет происходить, как показано на рис. 3.5, а. Из схемы видно, что максимальная плотность тока, а следовательно, и интенсивность выделения тепла будут иметь место в точке касания о. Температура в этой точке будет быстро возрастать, что приведет к расплавлению и выбросу металла из-под контакта.

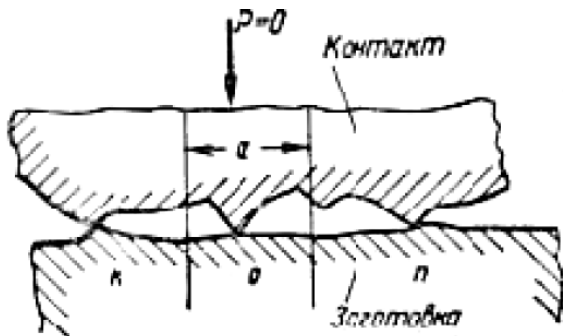


Рис. 3.4. Схема касания контактной поверхности к нагреваемой заготовке

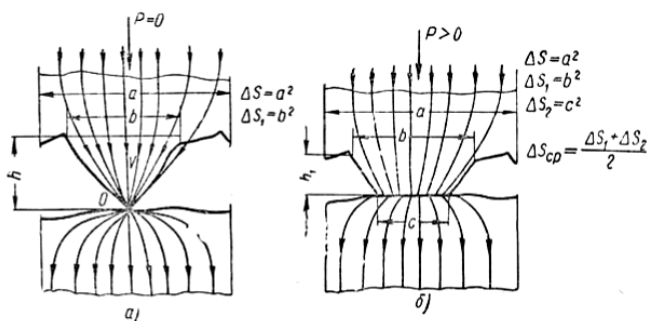


Рис. 3.5. Схема распределения плотности тока в контактной зоне: а – при точечном контакте ( $p = 0$ ); б – при площадном контакте ( $p > 0$ )

Если увеличить давление на контакт (рис. 3.5, б), то в результате деформации выступа  $V$ , напоминающего собой пирамиду, касание станет уже не точечным, как в первом случае (рис. 3.5, а), а поверхностным с величиной площади касания  $\Delta s^2 = c^2$ . В результате увеличения площади касания плотность тока, а следовательно, и интенсивность нагрева в контактной зоне будут значительно ниже, чем в первом случае.

Рассматривая выступ на контактной поверхности  $V$ , по которому проходит весь ток, поступающий в заготовку, можно с известным приближением записать, что при  $p > 0$

$$r = \rho_1 \frac{h_1}{s_{cp}}, \quad (3.9)$$

где  $r$  – сопротивление выступа  $V$ , Ом (переходное сопротивление в контактной зоне с площадью  $\Delta s$ );  $h_1$  – высота выступа  $V$ ;  $s_{cp}$  – средняя площадь поперечного сечения выступа  $V$ , равная  $\frac{\Delta s_1 + \Delta s_2}{2}$ ;  $\rho_1$  – удельное сопротивление материала контакта при температуре  $t^\circ$  С. Учитывая, что величина  $\Delta s_2$  может быть выражена соотношением

$$\Delta s_2 = \frac{P}{\sigma} \text{ см}^2, \quad (3.10)$$

где  $P$  – сила давления, кг;  $\sigma$  – разрушающее усилие в условиях давления (кг/см<sup>2</sup>).

Согласно схеме, приведенной на рис. 3.5,

$$r = \rho_t \frac{2h_1}{\Delta s_1 + \frac{P}{\sigma}}. \quad (3.11)$$

Анализ формулы (3.11), являющейся весьма приближительной и отражающей лишь качественную сторону процесса, происходящего в переходной зоне *контакт–заготовка*, показывает, что величина переходного сопротивления не является постоянной и зависит от чистоты обработки поверхности, определяемой высотой неровностей  $h_1$ , от давления  $p$ , с которым контакт прижат к заготовке, а также от прочности материала контакта или заготовки.

Очевидно, что для обеспечения наиболее низкого значения переходного сопротивления, а следовательно, и уменьшения выделения в контактной зоне тепла необходимо стремиться к следующим показателям:

- 1) увеличению давления на контакты;
- 2) чистоте соприкасающихся поверхностей контакта и заготовки;
- 3) использованию для изготовления контактов материала, обладающего низким удельным электрическим сопротивлением.

Практикой установлено, что лучшим материалом для изготовления контактов является красная медь. Разрушающее усилие меди в холодном состоянии составляет 45,4 кН, удельное сопротивление равно  $1,9 \times 10^{-8}$  Ом $\times$ м.

В зависимости от диаметра нагреваемых заготовок рекомендуемая сила давления на контакты из меди должны быть: для заготовок диаметром 20–30 мм – 9,8 кН; 30–50 мм – 29,4 кН; 50–10 мм – 49,4 кН.

Приведенные значения давлений обеспечивают разрушение слоя окислов на поверхности заготовки и достаточный прогрев части заготовки, располагающейся под контактами. При местном нагреве заготовок, когда нет необходимости иметь высокую температуру непосредственно под контактами, рекомендуется применять возможно большие контактные давления, не доводя при этом нагрузку на медь до величины разрушающего усилия.

### **3.3.3. Распределение температур по сечению и длине заготовки при контактном нагреве**

При прохождении переменного тока по заготовке плотность тока неодинакова по ее сечению и изменяется в зависимости от температуры. Толщина поверхностного слоя, по которому идет ток, равна глубине проникновения тока  $\delta$  и может быть определена по формуле Штейметца (3.6).

В начале нагрева, когда глубина проникновения  $\delta$  мала, весь ток сосредоточивается в тонком поверхностном слое, который в результате значительной плотности тока подвергается интенсивному нагреву; сердцевина заготовки остается при этом холодной.

С повышением температуры:

- 1) возрастает глубина проникновения тока, что приводит к более равномерному распределению его по сечению заготовки;
- 2) тепло от нагретого поверхностного слоя за счет теплопроводности начинает переходить в более глубокие слои заготовки;
- 3) резко увеличиваются потери тепла на излучение с поверхности заготовки, в результате чего температура сердцевины быстро возрастает, сравнивается с температурой поверхностного слоя и начинает ее обгонять. Очевидно, что чем больший ток проходит по заготовке, а следовательно, чем меньше продолжительность её нагрева, тем резче проявляется разница температур между поверхностью и сердцевиной заготовки.

На рис. 3.6 показаны графики, построенные на основании опытных данных и наглядно иллюстрирующие характер изменения температуры поверхности и сердцевины нагреваемой заготовки. По оси ординат отложены значения температуры, по оси абсцисс – время нагрева. Из графиков видно, что в начале нагрева температура поверхности заготовки выше температуры ее сердцевины, а в конце нагрева – наоборот. Разница в температурах поверхности и сердцевины заготовки тем больше, чем меньше время, затрачиваемое на нагрев. Так, например, при времени нагрева 190 с максимальная разность температур между поверхностью и сердцевиной заготовки составила  $130^{\circ}\text{C}$ , а при времени нагрева

80 с – 350° С. Из графиков также следует, что положение точки пересечения кривых 1 и 2 тоже зависит от времени нагрева. При сокращении времени нагрева температура, соответствующая точке пересечения, возрастает, и наоборот.

Из изложенного следует, что обеспечение допустимого перепада температур поверхности и сердцевины заготовки и уменьшение потерь на излучение достигаются правильным выбором времени нагрева. Уменьшение времени нагрева ниже оптимального может привести к местным перегревам и структурным изменениям металла; увеличение вызовет лишние потери тепла на излучение.

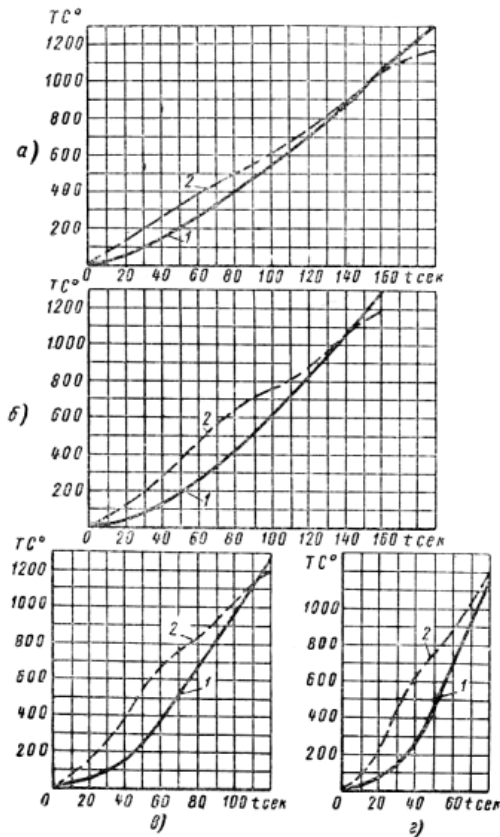


Рис. 3.6. Характер изменения температуры сердцевины (1) и поверхности (2) стальной заготовки диаметром 70 мм и длиной 100 мм в зависимости от времени нагрева: а – при времени нагрева 190 с; б – при времени нагрева 160 с; в – при времени нагрева 80 с; г – при времени нагрева 40 с

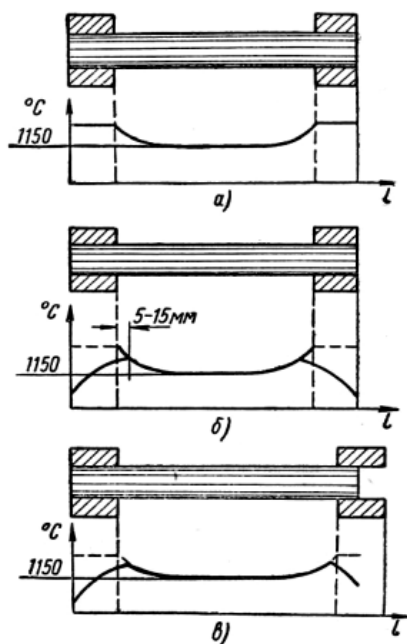


Рис. 3.7. Характер распределения температур по длине заготовки:  
*a* — при неохлаждаемых контактах, выполненных из материала с низким коэффициентом теплопроводности; *б* — при охлаждаемых контактах, выполненных из материала с высоким коэффициентом теплопроводности; *в* — при размещении конца заготовки под частью поверхности контакта

Оптимальным временем нагрева заготовки принято считать такое время её нахождения под напряжением, при котором обеспечивается совпадение точки пересечения кривых нагрева поверхности и сердцевины заготовки (см. рис. 3.6) с заданной температурой нагрева.

Необходимо заметить, что при контактном нагреве неравномерность распределения температуры имеет место не только по сечению заготовки, но и по ее длине. Последнее обстоятельство объясняется повышенным сопротивлением и плотностью тока в контактной зоне. Интенсивное выделение тепла под контактами приводит к повышению температуры концов заготовки и вызывает необходимость специального охлаждения контактодержателей. На рис. 3.7 показаны кривые распределения температур по длине заготовки. Случай (*a*) отражает картину распределения температур при неохлаждаемых контактах, имеющих малый коэффициент

теплопроводности. Случай (б) предусматривает охлаждение контактных устройств, имеющих высокий коэффициент теплопроводности. Случай (в) отражает картину распределения температур, когда один конец заготовки зажат частью охлаждаемого контакта.

Анализ графика, приведенного на рис. 3.7, а, показывает, что при малой величине коэффициента теплопроводности материала контактов и при отсутствии их охлаждения неизбежен перегрев концов заготовок, находящихся под контактами. Во избежание перегрева контактодержатели изготавливаются из материала с высоким коэффициентом теплопроводности и охлаждаются водой. В результате охлаждения значительное количество тепла, выделяемое в контактной зоне, отводится, и кривая распределения температур по длине заготовки принимает вид, показанный на рис. 3.7, а. На графике рис. 3.7, б, в пунктиром показано распределение температур при нагреве заготовки с неохлаждаемыми контактами. В случае охлаждения контактных устройств температура концов заготовки, зажатых в контактах, ниже средней температуры свободной (незажатой) части заготовки. При этом на расстоянии 5–15 мм от контактов образуется зона высоких температур, в которой при повышенной скорости нагрева может произойти перегрев и даже расплавление металла.

В практике нагрева заготовок под ковку и штамповку часто требуется, чтобы температура одного из концов заготовки была близка к средней температуре всей заготовки. В этом случае заготовка зажимается в контакты, как показано на рис. 3.7, в. Конец заготовки, температура которого должна быть близка к температуре всей заготовки, закладывается не под всю поверхность контакта, а только под ее часть. При указанном расположении заготовки в контактах и при соответствующем контактном давлении распределение температур по длине заготовки будет таким, как показано на рис. 3.7, в. Из графика видно, что правый конец заготовки, расположенный под частью поверхности контактов, имеет температуру, близкую к температуре всей заготовки. Левый конец заготовки значительно холоднее правого. Практикой установлено, что чем меньше длина зажатого в контактах конца заготовки, тем выше его температура. Для достижения ковочной температуры длина укладываемого под контакты конца заготовки должна быть примерно равной половине ее диаметра.

В практике контактного нагрева могут встретиться случаи, когда нагреваемая заготовка имеет неодинаковую величину сечения по длине. Рассмотрим, как будет отличаться температура частей заготовки с различным сечением (рис. 3.8).



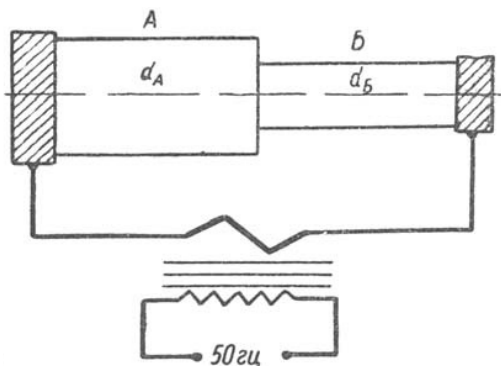


Рис. 3.8. Схема подведения напряжения к заготовке с различным сечением

Установлено, что даже небольшая разница в сечениях заготовки приводит к весьма значительному перегреву более тонкой ее части.

### 3.4. Параметры нагрева стали

Для нагрева в установке холодной заготовки массой  $M$  до температуры  $t_2$  необходимо подвести к ней определенное количество теплоты, Дж:

$$Q = \frac{Mct_2}{\eta_1}, \quad (3.12)$$

где  $c$  – средняя теплоёмкость, Дж/(кг $\times$ °C);  $\eta_1$  – термический КПД установки.

В соответствии с законом Джоуля–Ленца

$$Q = I^2 R \tau, \quad (3.13)$$

где  $I$  – сила тока в цепи, А;  $R$  – сопротивление материала заготовки, Ом;  $\tau$  – продолжительность нагрева, с.

Приравняв последние две формулы, получим, что

$$I = \sqrt{\frac{Mct_2}{R\tau\eta_1}}. \quad (3.14)$$

Выразим  $M$  и  $R$  через линейные размеры заготовки:

$$M = \frac{\rho_n V}{1000} = \frac{\rho_n sl}{1000}; \quad (3.15)$$

$$R = \frac{\rho l}{s}, \quad (3.16)$$

здесь  $l$  и  $s$  — длина и площадь поперечного сечения заготовки, см и см<sup>2</sup>;  $\rho_n$  — плотность нагреваемого материала, кг/см<sup>3</sup>;  $\rho$  — среднее удельное электросопротивление заготовки, Ом×см.

Подставим значения  $M$  и  $R$  в формулу для  $I$ , А:

$$I = \sqrt{\frac{\rho_n s^2 c t_2}{100 \rho \tau \eta_t}} = 0,032 s \sqrt{\frac{\rho_n c t_2}{\rho \tau \eta_t}}. \quad (3.17)$$

Следовательно, сила тока зависит от физических свойств нагреваемого материала ( $\rho_n$ ,  $\rho$ ,  $c$ ), температуры и продолжительности нагрева, поперечного сечения заготовки и термического КПД установки, но не зависит от длины заготовки.

Вследствие изменения свойств материала и термического КПД в течение нагрева по формуле можно определить только среднее значение силы тока. По мере прогрева заготовки вследствие понижения её теплотребления сила тока уменьшается.

В соответствии с законом Ома напряжение на концах заготовки, В:

$$U = IR = 0,032 s \rho \left( \frac{l}{s} \right) \sqrt{\frac{\rho_n c t_2}{\rho \tau \eta_t}} = 0,032 \sqrt{\frac{\rho_n c t_2}{\tau \eta_t}}. \quad (3.18)$$

Следовательно, среднее напряжение в период нагрева зависит от свойств материала проводника, его длины, продолжительности и температуры нагрева, а также термического КПД установки.

Полная средняя мощность (кВт) электроконтактной установки

$$N = \frac{[Mc(t_2 - t_1)]}{(\tau \eta)}, \quad (3.19)$$

где  $\eta$  — полный КПД установки определяется произведением КПД трансформатора  $\eta_{тр}$ , электрической цепи  $\eta_3$  и термического  $\eta_t$ , то есть  $\eta = \eta_{тр} \eta_3 \eta_t$ .

Можно принять, что  $\eta_{тр} = 0,97 \div 0,98$ . Электрический КПД зависит от отношения  $\frac{l}{d}$  и усилия зажима контактов. При  $\frac{l}{d} \geq 10$   $\eta_3 = 0,85 \div 0,9$ . Термический КПД, учитывающий потери излучением и конвекцией в окружающее пространство, а также контактной теплопроводностью, при благоприятных условиях может достигать  $0,97 \div 0,99$ .

Поэтому эти установки имеют низкий удельный расход электроэнергии, что способствует их широкому распространению.

Предельно допустимые продолжительности нагрева  $\tau$ , исключаящие перегрев или оплавление, в зависимости от диаметра заготовок  $d$ :

$d$ , мм	10	20	30	40	50	60	70
$\tau$ , с	6	15	40	60	80	100	120

### 3.5. Совмещение электронагрева и деформации

Высадка с электронагревом может выполняться со свободной деформацией металла в штампе или с принудительным формообразованием.

**Высадка с электронагревом при свободном деформировании металла.** Процесс нагрева и высадки происходит по схеме (рис. 3.9). Конец заготовки, подлежащий высадке, зажимается между радиальными (1) и торцовым (2) контактами, подключенными ко вторичной обмотке понижающего трансформатора на напряжение 1,5–5 В переменного тока частотой 50 Гц. Радиальные контакты зажимаются небольшим усилием  $p_1$ , допускающим скольжение заготовки. Для выполнения высадки на заготовку подается осевое давление  $p_2$ , равное 10 кг/мм<sup>2</sup>, и включается нагревающий ток.

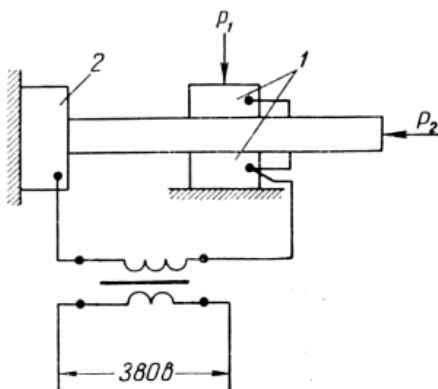


Рис. 3.9. Схема процесса с электронагревом свободной деформации металла

Участок заготовки между торцовым и радиальными контактами нагревается и получает осадку. При этом заготовка под

действием осевого усилия  $p_2$  скользит между радиальными контактами, и осадке подвергаются все новые участки заготовки.

Для предотвращения подстуживания торца заготовки торцовый контакт выполняют из материала с низкой тепловой и электрической проводимостью, например, из легированной хромо-молибденовой стали Х12М, которая помимо указанных свойств имеет высокую прочность и хорошо сопротивляется износу.

Рассматриваемым способом можно набрать значительный объем металла, существенно превышающий объем заготовки, заключенный между контактами. При осевом давлении  $10 \text{ кг/мм}^2$  нагрев и деформация идут в среднем со скоростью  $2\text{--}4 \text{ мм/с}$ . Когда заготовка осажена на заданную длину, операция прекращается. Однако таким образом получается лишь предварительная форма поковки, окончательная же форма придается ей штамповкой в ковочной машине, при этом дополнительный нагрев не требуется. Чтобы при осадке предотвратить искривление заготовки, расстояние между контактами не должно превышать  $3\text{--}3,5$  диаметра.

**Высадка с электронагревом и деформированием в матрице.** Схема одного из вариантов процесса высадки с электронагревом в матрице приведена на рис. 3.10. Как и в предыдущем случае, нагрев конца заготовки, подвергающейся деформации, производится между двумя радиальными (1) и торцовым (2) контактами. В процессе осадки деформируемый металл заполняет матрицу, (3) образуя поковку необходимых размеров и формы.

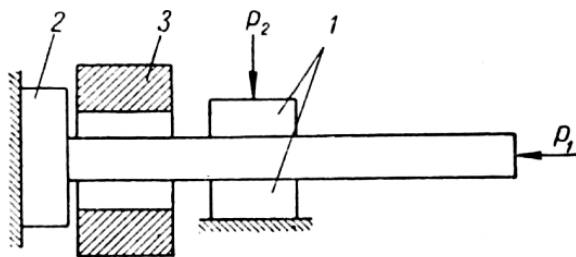


Рис. 3.10. Схема процесса высадки в матрице с электронагревом

**Точная высадка с электронагревом**, не требующая последующей механической обработки, достигается дозировкой нагрева и выполнением его без окалины, а также применением предварительной точной дозировки объема заготовки.

Заготовка до высадки проходит механическую обработку, в результате чего она получает строго определенный объем, затем нагревается в электровысадочном устройстве и штампуется.

### 3.6. Оборудование для электроконтактного нагрева

**Описание основных узлов.** Установка контактного электронагрева состоит из следующих основных узлов: каркаса, силового трансформатора, зажимных контактных головок, переключателя ступеней напряжения, аппаратуры управления и автоматизации, щита управления, системы разводки сжатого воздуха и воды.

**Каркас.** Каркас установки контактного нагрева служит для монтажа всех ее узлов. Передняя часть каркаса обычно выполняется из уголков, а нижняя, несущая силовой трансформатор, – из швеллера. Каркас облицовывается стальными открывающимися дверцами. К нижней раме каркаса закрепляются ролики, позволяющие передвигать установку при необходимости ее ремонта или смены места в случае изменения технологической схемы.

**Силовой трансформатор.** Силовой трансформатор установки контактного нагрева предназначен для понижения напряжения и увеличения силы тока, подаваемого к заготовке.

Силовые трансформаторы, применяемые в установках контактного электронагрева, отличаются высоким коэффициентом трансформации и весьма значительной величиной тока во вторичной обмотке. Для изменения напряжения, подаваемого к заготовке, первичная обмотка силовых трансформаторов делается секционированной. Переключение секции дает возможность изменять величину напряжения в первичной и вторичной обмотках.

В установках контактного электронагрева применяются два типа трансформаторов – стержневой и броневой. У стержневого трансформатора (рис. 3.11, *а*) обмотки охватывают железо (сердечник), у броневого (рис. 3.11, *б*), наоборот – железо охватывает обмотки.

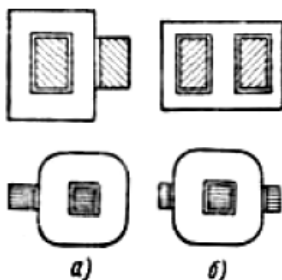


Рис. 3.11. Основные типы трансформаторов:  
*а* – стержневой; *б* – броневой

По сравнению со стержневым трансформатором броневой трансформатор обладает рядом преимуществ: при одинаковой

мощности для него требуется меньше железа и меди; его можно располагать непосредственно под контактными головками и тем самым сокращать до минимума пути вторичного тока.

Пример размещения броневых трансформатора в установке контактного нагрева проиллюстрирован на рис. 3.12.

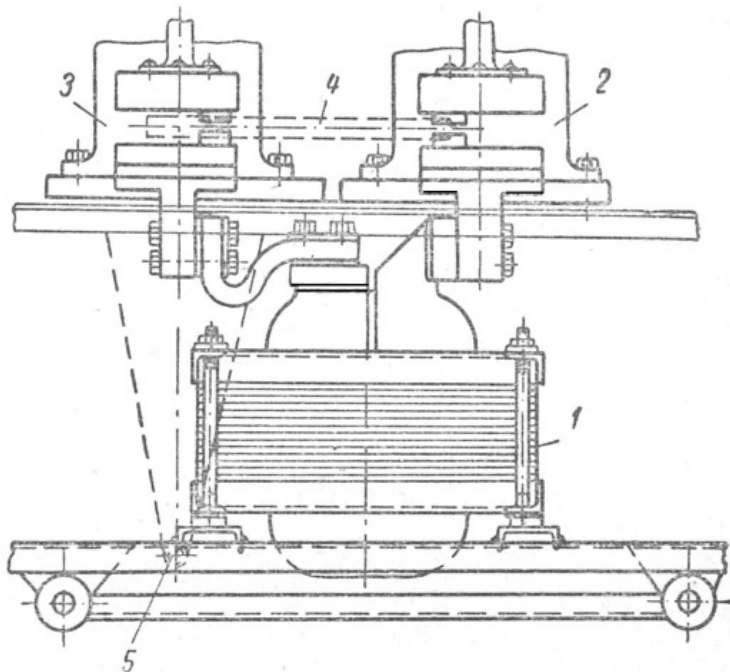


Рис. 3.12. Пример удачного размещения силового трансформатора броневых типа: 1 – трансформатор; 2 – неподвижная контактная головка; 3 – подвижная контактная головка; 4 – нагреваемая заготовка; 5 – шарнир

Переключение ступеней напряжения силового трансформатора осуществляется либо с помощью переключателя напряжения (джека), которым можно пользоваться только при отключенной заготовке, либо при помощи перемычек, включающих под напряжение различное число витков первичной обмотки силового трансформатора.

**Зажимные контактные головки.** Зажимные контактные головки служат для подвода тока к нагреваемой заготовке. Контактная головка состоит из контактодержателей с контактами, системы охлаждения, а также устройств, обеспечивающих создание необходимого давления контактов на заготовку.

Контактные головки обычно монтируются на алюминиевых плитах. Для компенсации удлинения заготовки в процессе нагрева одна из головок закрепляется на шарнире, как показано на рис. 3.13. Соединение подвижной головки со вторичной обмоткой силового трансформатора осуществляется посредством гибких медных шин, обычно набираемых из медной фольги. Возврат подвижной контактной головки в исходное положение после удаления нагретой заготовки осуществляется с помощью пружинных упоров, монтируемых на торцовых стенках каркаса. Неподвижная зажимная головка жестко соединяется с каркасом, изолируется от него изоляционными (обычно текстолитовыми) прокладками и крепится непосредственно к виткам вторичной обмотки трансформатора.

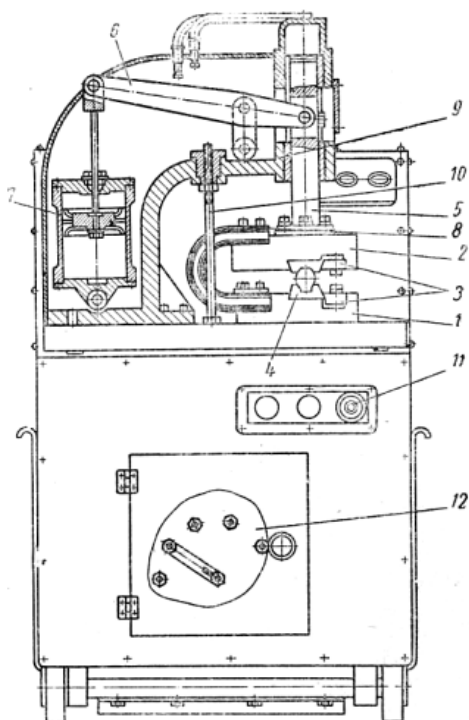


Рис. 3.13. Вид контактной головки в разрезе:

- 1 – неподвижный контактодержатель; 2 – подвижный контактодержатель; 3 – затяжные клинья; 4 – контакт;
- 5 – шток; 6 – рычаг; 7 – пневматический цилиндр; 8 – шины;
- 9 – кронштейн; 10 – стяжной болт; 11 – панель с кнопками управления; 12 – переключатель напряжения

Необходимое давление на контакты создается посредством пневматического устройства (обычно пневматического цилиндра двойного действия, монтируемого в контактной головке).

Компоновка основных элементов контактной головки представлена на рис. 3.13, где показан разрез контактной головки установки К-16. В разрезе видны контактодержатели (1) и (2) с закрепленными в них при помощи клиньев (3) электрическими контактами (4). Контактдержатель смонтирован на массивном штоке (5), который посредством рычага (6) соединен с пневматическим цилиндром (7) двойного действия. Нижний и верхний контактодержатели соединены между собой гибкими шинами (8), набранными из фольги.

**Виды токоподводящих контактов.** Различные виды токоподводящих контактов зажимных головок электроконтактных установок показаны на рис. 3.14.

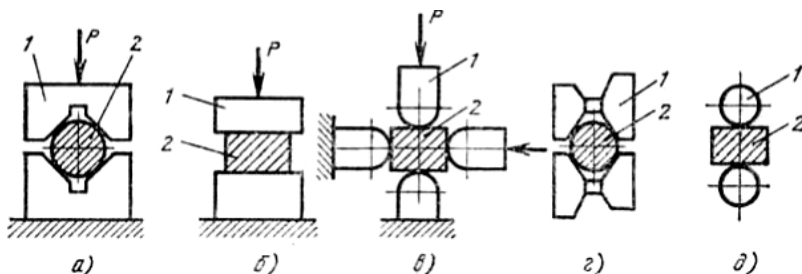


Рис. 3.14. Типы токоподводящих контактов зажимных головок электроконтактных установок

По конструктивному выполнению зажимные токоподводящие контакты (1) для нагреваемых заготовок (2) можно подразделить на следующие основные типы:

- призматические, применяемые в качестве радиальных контактов при нагреве цилиндрических заготовок (рис. 3.14, а);
- плоские, применяемые в качестве радиальных контактов при нагреве прямоугольных заготовок и радиально-торцовых при нагреве цилиндрических и прямоугольных заготовок, а также используемые в качестве торцовых контактов при зажиме заготовок с торцов (рис. 3.14, б);
- цилиндрические со сферической контактной поверхностью, применяемые в качестве радиальных и торцовых контактов, преимущественно в многоконтактных головках (рис. 3.14, в);



- роликовые, применяемые в качестве вращающихся радиальных контактов, при движении проволоки или прутка во время нагрева (рис. 3.14, з);
- цилиндрические (рис. 3.14, д), применяемые в качестве радиальных контактов при нагреве цилиндрических или прямоугольных заготовок небольшого диаметра или небольших поперечных размеров (до 15 мм).

**Рекомендации по улучшению работы и увеличению стойкости медных контактов.** В процессе работы поверхности контактов упрочняются из-за наклепа и оседания мелких частиц нагреваемого металла и окалины; это увеличивает работоспособность контактов и срок их эксплуатации.

Упрочненный слой при каждой очередной зачистке поверхностей контактов нужно сохранять.

Практика электроконтактного нагрева показывает, что деформация концов заготовки, полученной отрезкой на пресс-ножницах, в штампах или другими способами, не должна превышать (рис. 3.15) следующих значений:  $A = 0,3$  мм – для заготовок диаметром 18–45 мм и  $A = 0,4$  мм – для заготовок диаметром 45–75 мм; для всех заготовок  $B = 0,5$  мм,  $B = 1$  мм и отклонение по длине  $\Gamma = 0,4$  мм.

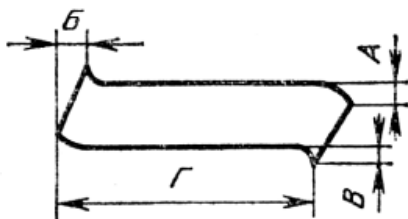


Рис. 3.15. Деформация концов заготовки при отрезке на пресс-ножницах

При уменьшении (износе) поверхностного слоя контакта на 5 мм такой контакт следует употреблять для нагрева заготовок с большими диаметрами, чем те, на которые был первоначально рассчитан и изготовлен данный контакт.

На поверхности заготовок, предназначенных для контактного электронагрева, категорически не допускаются окалина или ржавчина, разрушающие надежное электрическое соединение с контактным зажимом. Для повышения стойкости контактов их нужно делать штампованными или наклепывать, то есть подвергать рабочие поверхности обработке давлением в холодном состоянии.

### 3.7. Аппаратура управления и автоматизации

К аппаратуре управления и автоматизации можно отнести контакторы, конечные выключатели, пневмоэлектрические кнопки, пневматические клапаны с электромагнитным приводом, приборы автоматического контроля температуры и др.

Контактор служит для включения силового трансформатора под нагрузку. Контактторы, применяющиеся в установках контактного нагрева, должны надежно работать при напряжении до 500 В при токах 600–1000 А.

Концевой выключатель предназначен для отключения и включения участков электрической цепи при нажиме на имеющуюся в его конструкции кнопку. Концевые выключатели серийно выпускаются промышленностью и подробно описаны в соответствующих каталогах.

Электропневматическая кнопка предназначена для автоматического включения линейного контактора после зажима заготовки в контактах. Кроме этого, пневмоэлектрическая кнопка автоматически блокирует цепь включения контактора при понижении давления в системе разводки сжатого воздуха и исключает возможность подачи напряжения к контактным устройствам при недостаточном контактном давлении.

Принцип действия пневмоэлектрической кнопки изображен на рис. 3.16. При подаче сжатого воздуха в пневматический цилиндр (1) шток (2), перемещаясь вместе с поршнем вниз, начинает зажимать заготовку. В процессе движения поршня давление внутри пневматического цилиндра (1) будет ниже сетевого. И лишь после того, как подвижной контакт достигнет заготовки и зажмет ее с предельным усилием, давление в цилиндре (1) сравняется с сетевым. При подаче воздуха в пневматический цилиндр (1) часть его через соединительный шланг (3) поступит в пневматический цилиндр (4) кнопки и начнет давить через поршень и шток (5) на рычаг (6), связанный с подвижным контактом (7). Пружина, находящаяся над рычагом, отрегулирована таким образом, что подвижной контакт (7) замыкает неподвижный контакт (8) не ранее достижения давления в цилиндрах, при котором заготовка будет зажата с заданным усилием. При замыкании контактов (8) и (7) включается цепь электромагнита контактора и начинается нагрев. Электропневматический клапан служит для дистанционного управления пневматическими цилиндрами.

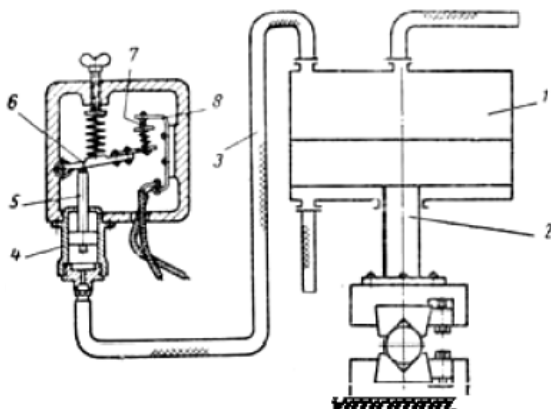


Рис. 3.16. Схема пневмоэлектрической кнопки

В качестве прибора автоматического контроля температуры при контактом нагреве чаще всего используются фотоэлектрические пирометры.

С помощью фотоэлектрического пирометра можно не только измерять температуру, но и отключать соответствующие цепи управления (например, цепь электромагнита контактора при достижении заготовкой заданной температуры).

Кроме того, в электроконтактных нагревательных установках температуру нагрева заготовки контролируют непосредственным измерением с помощью различных термоэлектрических и цветных пирометров; измерением удлинения заготовки в процессе нагрева; дозированием с помощью компьютера энергии, подводимой к нагреваемой заготовке для достижения заданной температуры нагрева; отключением тока после заданной длительности нагрева (рекомендуется применять в установках, обеспечивающих стабилизацию тока, протекающего через нагреваемые изделия); программным управлением стабилизированного тока в сочетании с корректирующей обратной связью непосредственно по температуре нагреваемой заготовки.

Для автоматического контроля температур при электронагреве широко распространены фотоэлектрические реле типа ФЭП-2 с фотоэлементом типа ЦВ-4. По достижении нагреваемой заготовкой заданной температуры реле срабатывает, выключается цепь контактора нагреваемой установки и нагрев прекращается.

Детали, составляющие схему фотореле, монтируют в два узла.

Фотоэлемент с оптической линзой и фокусным расстоянием 100 мм устанавливают в визирную головку. Остальные элементы

располагают в специальном металлическом ящике, подвешиваемом внутри электронагревательной установки. Визирная головка и релейно-ламповый ящик соединены между собой экранированным кабелем.

Для уменьшения попадания пыли на визирное стекло головку устанавливают наклонно и на неё надевают бленду, окрашенную изнутри в черный матовый цвет.

Расстояния визирной головки от нагреваемой поверхности в зависимости от площади нагрева и температуры приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

*Рекомендуемые расстояния головки фотоэлемента от нагреваемой поверхности в зависимости от площади нагрева и температуры*

Площадь нагрева, см <sup>2</sup>	Температура нагрева, °С	Рекомендуемое расстояние, мм
2 2–4	750–1100 750–900	300
4–15 15–30 30	900–1200 900–1100 900	450
8–20 20–80 80	1100–1400 900–1300 1200	500

### **3.8. Система разводки сжатого воздуха и воды**

Принципиальная схема разводки показана на рис. 3.17. Охлаждающая вода из водопровода подается в систему разводки через вентиль (1) и поступает в коллектор (2). Из коллектора вода через прорезиненные шланги и трубы попадает в зажимные контактные головки (3) и (4) и во вторичные витки силового трансформатора (5). Отработанная (нагретая) вода сливается в бачок (6), из которого отводится в канализацию. Количество воды, поступающей для охлаждения различных элементов нагревательной установки, регулируется кранами (7).

Сжатый воздух с давлением 5–6 атм поступает в систему разводки через вентиль (8) и редуктор (9). Из редуктора воздух попадает в электропневматический клапан (10), через который подается

в верхнюю или нижнюю полость цилиндров (11). С рабочими полостями цилиндров (11) соединены манометр (12) и электропневматическая кнопка (13). Вентиль (14) предназначен для продувки системы охлаждения, необходимость в которой может возникнуть при работе в зимних условиях.

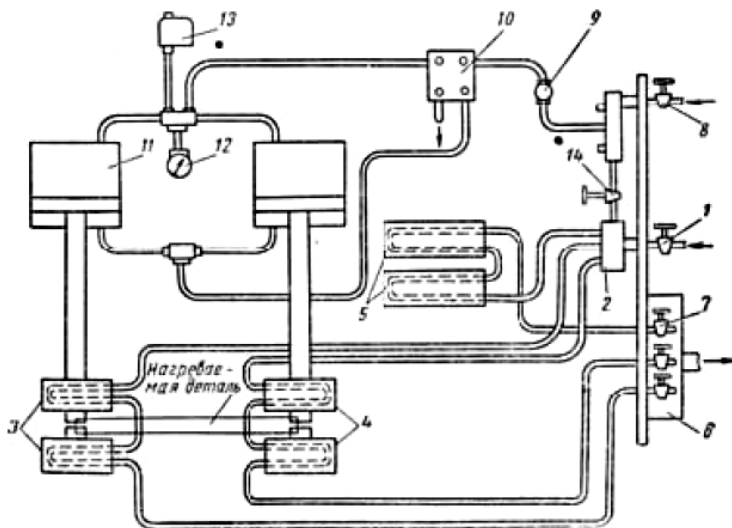


Рис. 3.17. Электронагревательная установка К-17

### 3.9. Достоинства и недостатки электроконтактного нагрева

**Преимущества электроконтактного нагрева.** По сравнению с печным нагревом контактные электронагреватели обеспечивают большую скорость нагрева, лучшие условия работы обслуживающего персонала, меньший угар металла (порядка нескольких десятых долей процента), а по сравнению с индукционным — более равномерное распределение температуры по сечению нагреваемой заготовки, возможность получить в центре сечения заготовки более высокую температуру, чем на поверхности, и обеспечить тем самым оптимальные условия деформации металла при объёмной штамповке, имеют высокий КПД, достигающий 93%.

**Недостатки электроконтактного нагрева.** Низкая стойкость контактов, неравномерность нагрева заготовки по длине из-за интенсивного теплоотвода водоохлаждаемых контактов (обычно температура заготовки в зоне, занимаемой контактом, на 100–300° С ниже, чем на участке, свободном от контактов).

#### 4. ВЫБОР СПОСОБА ЭЛЕКТРОНАГРЕВА СТАЛИ

Способы электронагрева (индукционный, контактный) дают безокислительный нагрев металла практически без окалины.

Индукционный нагрев целесообразно применять в серийном и массовом производстве для заготовок диаметром 15–150 мм и для заготовок переменного сечения, причем номенклатура нагреваемых заготовок для каждого индуктора должна быть ограниченной, иначе это приведет к резкому повышению расхода электроэнергии.

Особенно удобно применять индукционный нагрев в автоматических линиях и агрегатах при штамповке и высадке.

Можно полагать, что индукционный нагрев будет развиваться в следующем направлении. Индукционные нагреватели получат широкое применение для нагрева небольших заготовок простой формы, причем высокочастотные установки – для нагрева заготовок диаметром до 130–150 мм, а установки токов промышленной частоты – для нагрева заготовок диаметром больше 150 мм. Очевидно, будут внедряться и двухчастотные индукционные нагреватели: промышленной частоты для нагрева заготовок до точки Кюри и высокочастотные – до температурыковки.

Контактный нагрев удобно и выгодно применять для нагрева средней части длинных тонких (диаметром 18–45 мм) заготовок под штамповку, гибку и высадку.

Электродоуплотнительным методом чаще всего нагревают заготовки диаметром 20–50 мм. Однако с точки зрения наиболее экономичного расходования электроэнергии не безразлично, какова будет длина нагреваемой заготовки при том или ином её диаметре. При нагреве методом сопротивления заготовка представляет собой часть вторичной цепи понижающего трансформатора. Расход электроэнергии в этом случае связан с его КПД, который равен

$$\eta_{TP} = \frac{R}{R + R_{TP}},$$

где  $\eta_{TP}$  – КПД трансформатора;  $R$  – активное сопротивление заготовки;  $R_{TP}$  – сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной его обмотке.

Так как активное сопротивление заготовки примерно прямо пропорционально ее длине и обратно пропорционально площади сечения, то для повышения КПД трансформатора, то есть для уменьшения удельного расхода электроэнергии, целесообразно нагревать заготовки возможно меньшего диаметра и большей длины. Поэтому необходимо стремиться при данном диаметре заготовки брать ее как можно большей длины, штампуя, например, из одной заготовки несколько поковок.

## 5. МЕТОДЫ РАСЧЁТА ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

### 5.1. Метод М.А. Касенкова

#### 5.1.1. Содержание расчета

Расчет индукционных нагревательных устройств сводится к определению мощности и типа генератора, размеров и числа витков индуктора, сечения трубки индуктора, а также реактивной мощности и количества банок конденсаторов. Исходными данными для расчета являются материал и размеры заготовок, подлежащих нагреву; температура, до которой должна нагреваться заготовка; производительность ковочного механизма.

Рассмотрим более подробно порядок расчета многovitкового цилиндрического и квадратного индукторов, наиболее распространенных в практике кузнечного производства.

#### 5.1.2. Выбор типа генератора

Выбор типа генератора, предназначенного для питания индуктора, производится по данным табл. 5.1, с учетом требуемой частоты тока  $f$  и ориентировочного значения мощности  $P'_z$ , обеспечивающей нагрев заготовки в заданное время  $t$ .

Типом выбранного генератора обуславливается напряжение  $U$ , подаваемое на индуктор. Значение  $U$  служит одним из основных параметров при дальнейшем расчете индуктора.

Частота тока при выборе генератора определяется из условия обеспечения максимального значения КПД нагревательного устройства. Наибольшее значение КПД индуктора для цилиндрических заготовок достигается при соотношении диаметра заготовки  $D$  с глубиной проникновения тока  $\delta$ , равном  $3 \div 8$ .

При известном соотношении  $\frac{D}{\delta}$  оптимальная частота определяется из уравнения (5.1), решенного относительно  $f$ :

$$f = \frac{5030^2 \rho}{\mu_r \delta^2}. \quad (5.1)$$

В случае нагрева стальных изделий значения  $\mu_r$  и  $\rho$  выбираются с учетом максимальной заданной температуры заготовок. Это обуславливается тем, что при нагреве стали под ковку и штамповку и особенно при методическом нагреве коротких заготовок большая часть металла в индукторе имеет температуру выше точки магнитных превращений.

Таблица 5.1

*Параметры некоторых отечественных машинных генераторов  
тока повышенной частоты*

Характеристика	Параметры			
	Тип машинного генератора			
	ПВ- 500/2500	ПВ- 100/2500-1	ПВ- 100/8000-IV	ВГО- 500/2500
<b>Генератор</b>				
Частота, Гц	2650	2500	8000	2500
Мощность, кВт	50	100	100	500
Напряжение, В	750/375	750/375	750/375	1500/750
Ток, А	74/148	148/296	148/296	333/665
Ток однофазный	–	–	–	–
Коэффициент мощности нагрузки	(0,9) опережаю- щий	–	–	(0,95) опережаю- щий
Независимое возбуждение	–	–	–	–
Напряжение возбуждения, В	60	60	115	–
Ток возбуждения (номинальный), А	5–6	6–7	8–10	–
<b>Двигатель</b>				
Мощность, кВт	60	125	130	700
Напряжение, В	220/380	220/380	220/380	3000/6000
Ток, А	191/110	385/222	430/250	–
Ток трехфазный	–	–	–	–
Частота, Гц	50	50	50	50
Коэффициент мощности	0,91	0,92	0,88	–
КПД преобразователя	0,75	0,75	0,75	0,75
Масса преобразователя, кг	2100	3000	4000	7230

Значения удельного электрического сопротивления  $\rho$  и магнитной проницаемости  $\mu_r$  берутся из табл. 5.2 и графиков на рис. 5.1 и 5.2.



Таблица 5.2

Значение удельного электрического сопротивления  
и магнитной проницаемости

Температура, °С	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ (Ом $\cdot$ м $\cdot$ 10 <sup>-8</sup> )			
	Химически чистое железо		Углеродистая сталь с 0,45% С	
	при нагреве	при охлаждении	при нагреве	при охлаждении
25	10,457	10,920	15,333	15,480
100	15,084	15,846	20,225	20,388
200	20,978	24,310	27,563	28,628
300	29,800	32,722	36,087	37,864
400	41,236	44,116	47,100	48,875
500	54,740	57,621	59,117	61,662
600	70,225	72,027	73,313	75,160
700	87,152	90,032	89,937	91,711
800	106,600	111,730	114,230	115,440
900	117,040	119,650	118,140	119,420
1000	122,720	122,880	121,690	122,330
1050	124,060	124,430	123,460	—
1100	125,420	—	125,230	—
1150	126,760	—	127,600	—

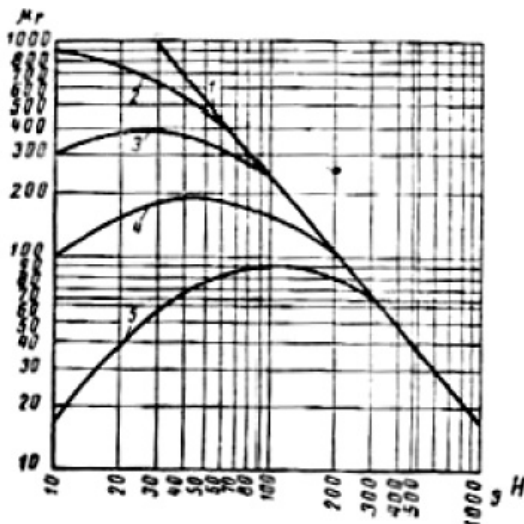


Рис. 5.1. Изменение магнитной проницаемости  $\mu_r$  от напряженности магнитного поля  $H$  при комнатной температуре:  
1 – техническое железо; 2 – сталь с 0,3% С; 3 – сталь с 0,4% С;  
4 – сталь с 0,6% С; 5 – эвтектоидная сталь с 0,83% С

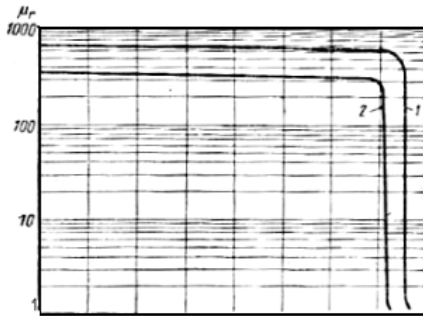


Рис. 5.2. Изменение магнитной проницаемости при нагреве от 0 до 900° С чистого железа (1) и эвтектоидной углеродистой стали (2)

Ориентировочное значение мощности генератора  $P_g$  определяется по формуле

$$P_g' = WG, \text{ кВт}, \quad (5.2)$$

где  $W$  – ориентировочное значение удельного расхода энергии, затрачиваемой для нагрева 1 кг металла (практикой установлено, что  $W \approx 0,4 \div 0,5$  кВт·ч/кг);  $M$  – масса металла, нагреваемого индуктором в течение часа; определяется по формуле

$$M = gn, \text{ кг}, \quad (5.3)$$

где  $M$  – масса одной заготовки, кг;  $n$  – количество заготовок, нагреваемых в индукторе в течение часа (определяется производительностью ковочного механизма).

Необходимо заметить, что при последующем расчете индуктора значение мощности генератора уточнится, что может привести к замене типа генератора, выбранного на основании соображений, приведенных ранее.

### 5.1.3. Внутренний диаметр спирали индуктора

Внутренний диаметр спирали индуктора  $D_{u\min}$  определяется по формуле

$$D_{u\min} = D_z + \Delta_g + 2\Delta_m + 2\Delta_s + h_n, \text{ мм} \quad (5.4)$$

где  $D_z$  – диаметр заготовки;  $\Delta_g$  – величина воздушного зазора между заготовкой и тепловой изоляцией;  $\Delta_m$  – толщина тепловой изоляции;  $\Delta_s$  – толщина электрической изоляции;  $h_n$  – высота направляющих для перемещения заготовки в индукторе.

Величина воздушного зазора и толщина тепловой изоляции в значительной степени влияют на электрический КПД нагревательного устройства. С увеличением воздушного зазора и толщины

тепловой изоляции электрический КПД резко падает. В то же время уменьшение толщины тепловой изоляции приводит к перегреву индуктора и уменьшению термического КПД.

Практикой эксплуатации индукционных нагревателей установлено, что наивыгоднейшее соотношение между электрическим и термическим КПД имеет место при толщине слоя тепловой изоляции 10–25 мм (коэффициент теплопроводности изоляционного материала должен быть при этом равным 0,5–1 ккал/м×ч×°С).

Слой толщиной 25 мм обычно применяется в индукторах, предназначенных для нагрева заготовок диаметром менее 50 мм. При нагреве таких заготовок допускается уменьшение слоя тепловой изоляции до 15 и даже до 10 мм.

Что касается воздушного зазора, то практикой установлено, что его величина  $\Delta_0$  должна быть не менее 2 мм. При меньшем воздушном зазоре возможны механические повреждения тепловой изоляции индуктора.

Толщина электрической изоляции принимается при расчете равной 2 мм (толщина миканитовой гильзы). Высота направляющих, используемых для защиты тепловой изоляции от механических повреждений, обычно не превышает 4–6 мм. С учетом приведенных выше соображений (формула (5.4)).

$$D_{u \min} = D_3 + (30 \div 60 \text{ мм}), \quad (5.5)$$

В случаях когда один и тот же индуктор предполагается использовать для нагрева заготовок различного сечения, внутренний диаметр спирали следует рассчитывать исходя из наибольшего сечения заготовки. Нагрев в таком индукторе заготовок меньшего диаметра неизбежно приведет к снижению КПД установки. Однако в практике считают выгодным использовать один индуктор для нагрева заготовок различного сечения при условии, если при пересчете на наиболее невыгодный случай нагрева КПД индуктора будет больше или равен 50%.

#### 5.1.4. Длина индуктора

Длина индуктора зависит от назначения нагревательного устройства и определяется размером заготовок, временем их нагрева и производительностью ковочного механизма.

При расчете индуктора периодического действия длина его определяется по формуле

$$l_u = l_3 + \Delta l, \quad (5.6)$$

где  $l_3$  – длина заготовки или ее нагреваемой части;  $\Delta l$  – величина, учитывающая влияние краевого эффекта.

Длина индуктора методического действия может быть определена по формуле

$$l_u = nl_z + \Delta l, \quad (5.7)$$

где  $n$  – число заготовок, одновременно нагреваемых в индукторе.

Для определения длины индуктора с непрерывным движением заготовки можно пользоваться формулой

$$l_u = Vt_n + \Delta l, \quad (5.8)$$

где  $V$  – скорость перемещения заготовки в индукторе;  $t_n$  – время, необходимое для нагрева заготовки до заданной температуры.

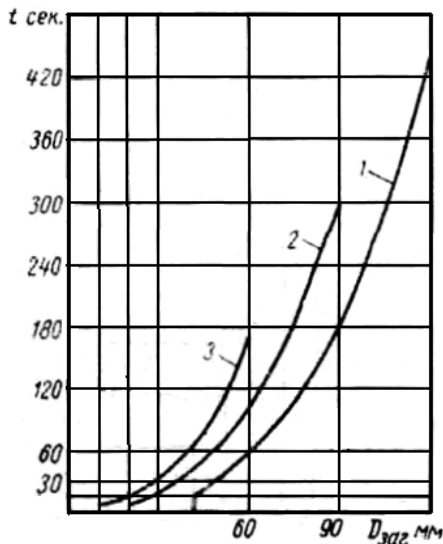


Рис. 5.3. График зависимости минимально допустимого времени сквозного нагрева заготовок от их диаметра (при температурном перепаде между поверхностью и сердцевиной в конце нагрева, равном  $100^\circ\text{C}$ ):  
1 – при частоте тока 1000 Гц; 2 – 2500 Гц; 3 – 8000 Гц

В формулах (5.6)–(5.8) величина  $\Delta l$ , учитывающая влияние краевого эффекта, обычно принимается равной 1–1,5 диаметра индуктора.

В формуле (5.7) число заготовок  $n$  определяется из соотношения

$$n = \frac{t_n}{t_k}, \quad (5.9)$$

где  $t_k$  – интервал времени, через который нагретые заготовки должны подаваться к ковочному механизму.

Для расчета по формулам (5.8) и (5.9) величину  $t_n$  следует определять из графика на рис. 5.3, построенного на основании опытных данных.

На графике по оси абсцисс отложен диаметр заготовки в миллиметрах, а по оси ординат – минимально допустимое время нагрева одной заготовки в секундах.

При определении продолжительности нагрева  $t_n$  может иметь место случай, когда  $t_n < t_k$ , то есть когда время, нужное для нагрева заготовки, меньше времени, необходимого для ее обработки на ковочном механизме. В этом случае допускается либо увеличение продолжительности нагрева, либо перерывы в нагреве с паузами, равными  $t_k - t_n$ .

Однако и первый, и второй способы приводят к уменьшению КПД нагревательного устройства, которое происходит либо за счет снижения термического КПД, либо за счет потерь холостого хода двигателя-генератора в период пауз. Лучшими способами являются применение понижающего трансформатора или автотрансформатора, а также увеличение производительности ковочного механизма.

Необходимо заметить, что если в результате расчета по формулам (5,7), (5.8) длина индуктора получится более 1 м, следует использовать несколько индукторов, работающих параллельно (многооручьева система). Длина каждого индуктора в данном случае может быть сокращена по сравнению с расчетной во столько раз, во сколько раз будет увеличено количество индукторов. Использование для нагрева заготовок индукторов с длиной более 1 м нецелесообразно ввиду сложности конструкции и неудобства в эксплуатации.

### 5.1.5. Число витков индуктора

Число витков индуктора определяется по известной из электротехники формуле

$$\omega = \frac{U}{z'} \sqrt{\frac{R'_s}{P_u}}, \quad (5.10)$$

где  $U$  – напряжение генератора;  $z'$  – полное сопротивление индуктора, отнесенное к одному витку;  $R'_s$  – эквивалентное активное сопротивление индуктора, отнесенное к одному витку;  $P_u$  – электрическая мощность, подводимая к индуктору.

Рассмотрим, как определяются величины  $z'$ ,  $R'_s$ ,  $P_u$ , входящие в формулу (5.10).

Полное сопротивление индуктора, отнесенное к одному витку  $z'$ , может быть выражено формулой

$$z' = \sqrt{(R'_3)^2 + (X'_3)^2}, \quad (5.11)$$

где  $R'_3$  и  $X'_3$  – эквивалентные активные и реактивные сопротивления, отнесенные к одному витку.

В свою очередь,  $R'_3$  и  $X'_3$  могут быть представлены в виде равенств:

$$R'_3 = R'_1 + R'_2, \text{ Ом} \quad (5.12)$$

$$X'_3 = X'_1 - X'_2, \text{ Ом} \quad (5.13)$$

В выражениях (5.12), (5.13)  $R'_1$  и  $X'_1$  – активное и реактивное сопротивление индуктора, отнесенные к одному витку, а  $R'_2$  и  $X'_2$  – активное и реактивное сопротивления, вносимые нагреваемой заготовкой и так же отнесенные к одному витку.

Величины  $R'_1$ ,  $X'_1$ ,  $R'_2$  и  $X'_2$  определяются по формулам:

$$R'_1 = \rho_1 \frac{\pi D_{u \min}}{l_u \delta_1}, \text{ Ом}; \quad (5.14)$$

$$X'_1 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{D_{u \min}^2}{l_u} k_1, \text{ Ом}; \quad (5.15)$$

$$R'_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{D_3^2}{nl_3} A\beta, \text{ Ом}; \quad (5.16)$$

$$X'_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{D_3^2}{nl_3} (1 - B)\beta k_2, \text{ Ом}, \quad (5.17)$$

где  $D_{u \min}$  и  $D_3$  – внутренний диаметр спирали индуктора и диаметр заготовки, см;  $l_u$  и  $l_3$  – длина индуктора и заготовки, см;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала спирали индуктора;  $\delta_1$  – глубина проникновения тока в материал спирали индуктора [определяется по формулам (5.17, а) или (5.17, б)];  $f$  – частота тока;  $n$  – количество одновременно нагреваемых в индукторе заготовок;  $k_1$ ,  $k_2$  и  $\beta$  – коэффициенты, вносящие поправки при вычислении составляющих сопротивления индуктора.

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \cdot \rho}{\mu_r f}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}, \text{ м}; \quad (5.17, \text{ а})$$

$$\delta_{Fe25^\circ C} \approx \frac{0,98}{\sqrt{f}}, \text{ см}. \quad (5.17, \text{ б})$$

При  $\frac{l_u}{D_{u\min}} \geq 5$  коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  и  $\beta$  принимаются равными 1.

При  $\frac{l_u}{D_{u\min}} < 5$  коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  и  $\beta$  могут приближенно опре-

деляться по эмпирическим формулам:

$$k_1 = 0,97 - 0,29 \frac{D_{u\min}}{l_u}; \quad (5.18)$$

$$k_2 = 0,97 - 0,29 \frac{D_2}{l_3}; \quad (5.19)$$

$$\beta = k_m^2 \frac{1 + A^2}{k_2^2 + A^2}. \quad (5.20)$$

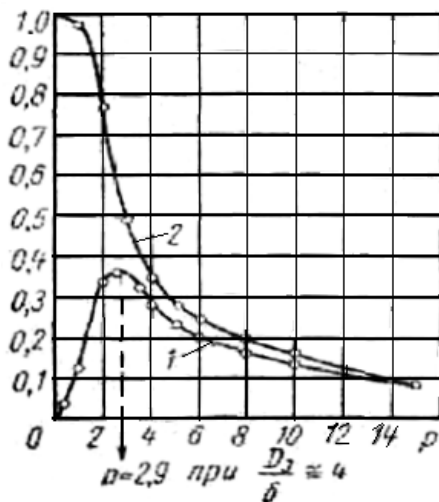


Рис. 5.4. Графики функций  $A$  и  $B$ :  
1 – график функции  $A$ ; 2 – график функции  $B$

Коэффициенты  $A$  и  $B$ , входящие в формулы (5.16), (5.17) и (5.20), являются функциями отношения диаметра заготовки к глубине проникновения в нее тока. Значения  $A$  и  $B$  определяются из графика, приведенного на рис. 5.4.

### 5.1.6. Определение мощности

Электрическая мощность  $P_u$ , подводимая к индуктору, определяется из соотношения

$$P_u = \frac{P'_3}{\eta_3 \eta_m}, \text{ кВт} \quad (5.21)$$

где  $P'_3$  – полезная мощность, необходимая для нагрева заготовок до ковочной температуры;  $\eta_3$  – электрический КПД индуктора;  $\eta_m$  – термический КПД индуктора.

Значения  $k_m = f\left(\frac{D_u \min}{l_u}; \frac{l_u}{l_3}\right)$  определяются из графика, приведенного на рис. 5.5.

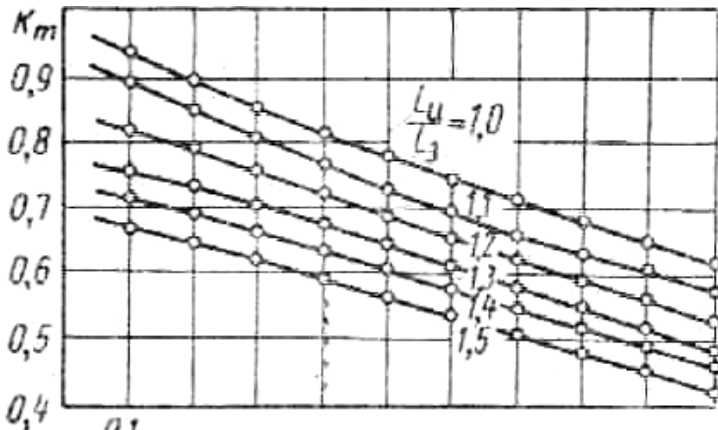


Рис. 5.5. График для нахождения поправочного коэффициента  $k_m$

Полезная мощность  $P'_3$  находится по формуле

$$P'_3 = \frac{c(T_k - T_n)Mn}{0,24t_n}, \text{ кВт}, \quad (5.22)$$

где  $c$  – теплоемкость нагреваемой заготовки, кДж/кг °С;  $T_k$  – заданная температура нагрева заготовки, °С;  $T_n$  – исходная температура заготовки, °С;  $M$  – масса одной нагреваемой заготовки или ее части, кг;  $t_n$  – время нагрева заготовки, с при частоте тока генератора  $f$ ;  $n$  – число заготовок, одновременно нагреваемых в индукторе.

Электрический КПД определяется отношением

$$\eta_3 = \frac{R'_2}{R'_3}. \quad (5.23)$$



Термический КПД находится из выражения

$$\eta_m = \frac{P'_3}{P'_3 + P_\phi}, \quad (5.24)$$

где  $P_\phi$  – электрическая мощность, требуемая для компенсации тепловых потерь через футеровку.

$P_\phi$  определяется по формуле

$$P_\phi = \frac{2\pi l_\phi \lambda}{860 \cdot \ln \frac{D_{\phi 1}}{D_{\phi 2}}} (T_2 - T_1), \text{ кВт}, \quad (5.25)$$

где  $l_\phi$  – длина футеровки, равная длине индуктора  $l_u$ , м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности футеровки;  $D_{\phi 1}$  и  $D_{\phi 2}$  – наружный и внутренний диаметры футеровки (при расчете обычно принимается  $D_{\phi 1} = D_{u \min}$ ,  $D_{\phi 2} = D_3$ );  $T_1$  и  $T_2$  – температура наружной и внутренней поверхностей футеровки (при расчете обычно принимается  $T_2 = T_k$  и  $T_1 = 60^\circ \text{C}$ , что соответствует температуре трубки индуктора).

### 5.1.7. Размеры трубки спирали индуктора

При определении размеров трубки спирали индуктора рассчитываются: ширина трубки –  $a$  (рис. 5.5), толщина её стенки –  $b$ , площадь отверстия –  $s$ , высота –  $h$ , плотность тока  $i$  в спирали индуктора при известном сечении трубки.

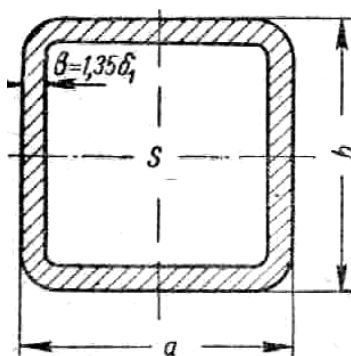


Рис. 5.6. Схема поперечного сечения трубки спирали индуктора

Ширина трубки индуктора определяется по формуле

$$a = \frac{l_u k_3}{\omega + 1}, \text{ мм}, \quad (5.26)$$

где  $\omega$  – число витков индуктора;  $k_s$  – коэффициент заполнения, учитывающий наличие изоляции между витками; при расчетах величина  $k_s$  принимается равной 0,8–0,9.

Толщина стенки трубки определяется из выражения

$$b = 1,3 \div 1,4\delta_1, \text{ мм}, \quad (5.27)$$

где  $\delta_1$  – глубина проникновения тока в материал спирали индуктора, мм.

Площадь отверстия трубки рассчитывается по формуле

$$S = \frac{P_u(1 - \eta_\varepsilon \eta_m)}{4,18V_e(T_1 - T_0)}, \text{ мм}^2, \quad (5.28)$$

где  $P_u$  – мощность, подводимая к индуктору, Вт;  $V_e$  – скорость движения воды в спирали индуктора, м/с (в случае использования для охлаждения индуктора воды из водопроводной сети  $V_e$  принимается равной 1–1,5 м/с);  $T_0$  и  $T_1$  – температура входящей и выходящей воды (обычно принимается  $T_0 = 15 \div 20^\circ \text{C}$ ;  $T_1 = 60^\circ \text{C}$ ).

Высота трубки индуктора определяется по формуле

$$h = \frac{S}{a - 2b} + 2b, \text{ мм}, \quad (5.29)$$

Если в результате расчета  $h$  получится, что высота трубки в 1,5–2 раза больше ее ширины, целесообразно переходить к использованию нескольких ветвей охлаждения, соответственно уменьшая при этом высоту трубки.

Определение плотности тока в спирали индуктора производится по формуле

$$i = \frac{I_u}{a\delta_1}, \text{ А/мм}^2, \quad (5.30)$$

где  $I_u$  – ток индуктора в амперах, равный  $\frac{U}{\omega^2 z'}$ .

При водяном охлаждении значение  $i$  не должно превышать 150 А/мм<sup>2</sup>.

### 5.1.8. Реактивная мощность конденсаторной батареи и число банок конденсатора

Таблица 5.3

*Характеристики отечественных бумажно-масляных контурных конденсаторов с водяным охлаждением*

Тип конденсатора	Емкость, мкФ	Реактивная мощность, кВА	Частота тока, Гц	Рабочее напряжение, В	Масса, кг	Габариты, мм
ПМВ-1-1	11,2	70	1000	1000	23	360×140×490
ПМВ-3-1	1,28	70	1000	3000	23	360×140×490
ПМВ-2,4-2	0,98	70	2000	2400	23	360×140×490
ПМВ-1,5-2	3,0	84	2000	1500	23	360×140×490
ПМВ-0,66-2,5	8,8	70	2500	600	23	360×140×490
ПМВ-0,4/0,8-8	16,0	120	8000	400/800	24,5	360×140×490

Реактивная мощность конденсаторной батареи  $P_c$  определяется по формуле

$$P_c = \frac{P_u}{\cos \varphi}, \text{ кВА}, \quad (5.31)$$

где

$$\cos \varphi = \frac{R'_s}{z'}. \quad (5.32)$$

Число банок конденсатора  $n_c$  находится из соотношения

$$n_c = \frac{P_c}{P_{c1}}, \quad (5.33)$$

где  $P_{c1}$  — реактивная мощность одной банки конденсатора, подбираемого по таблицам (например, по табл. 5.3).

### 5.1.9. Особенности расчета индуктора для нагрева заготовок квадратного сечения

Индуктор для нагрева заготовок квадратного сечения рассчитывается аналогично многовитковому цилиндрическому индуктору. При ведении расчета сечение квадратной заготовки и окна индуктора принимают в виде эквивалентных цилиндров (рис. 5.7), диаметр которых рассчитывается по формулам

$$D_{эз} = \frac{2a_3}{\sqrt{\pi}}; \quad (5.34)$$

$$D_{эинд\ min} = \frac{2a_u}{\sqrt{\pi}}, \quad (5.35)$$

где  $D_{эз}$  и  $D_{эинд\ min}$  — диаметры эквивалентных цилиндров заготовки и внутреннего окна индуктора;  $a_3$  и  $a_u$  — стороны квадрата сечения заготовки и окна индуктора.

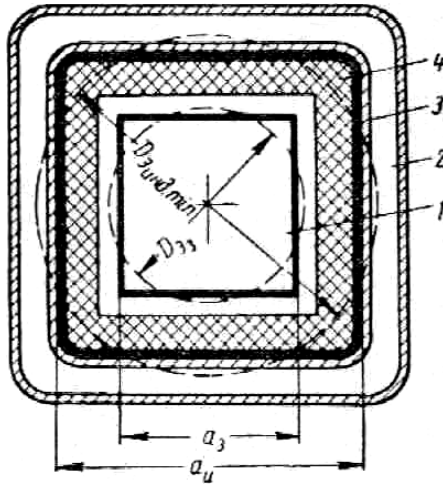


Рис. 5.7. Вид поперечного сечения индуктора, предназначенного для нагрева заготовок квадратного сечения:

- 1 — заготовка; 2 — провод спирали индуктора;
- 3 — электрическая изоляция; 4 — тепловая изоляция

При расчете величина  $a_u$  определяется по формуле

$$a_u = a_3 (30 \div 60), \text{ мм.} \quad (5.36)$$

#### 5.1.10. Проверка возможности использования рассчитанного индуктора для нагрева заготовок меньшего сечения

В практике индукционного нагрева приходится сталкиваться со случаями, когда один и тот же индуктор используется для нагрева заготовок различного сечения с разным задаваемым темпом подачи их к ковочному механизму. В этих случаях проводится проверочный расчет индуктора (с учетом размеров новой заготовки), в процессе которого определяются:

1) полный КПД индуктора  $\eta_{н1}$ ;

2) напряжение  $U_1$ , которое необходимо подвести к индуктору для обеспечения заданного времени нагрева новой заготовки;

3) реактивная мощность  $P_{c1}$  и число банок конденсаторов  $n_{c1}$ .

При определении полного КПД индуктора по формуле  $\eta_u = \eta_s \cdot \eta_m$  приходится заново рассчитывать величины  $\eta_s$  и  $\eta_r$ .

Электрический КПД  $\eta_s$  определяется из выражения (5.23) с подстановкой новых значений активного сопротивления индуктора, внесенного заготовкой  $R'_2$ , и эквивалентного активного сопротивления  $R'_2$  [ $R'_2$  рассчитывается по формуле (5.16) с подстановкой новых значений  $D_3$ ,  $n$  и  $l_3$ ;  $R'_3$  — находится по формуле (5.12) с подстановкой нового значения  $R'_2$ ].

Термический КПД  $\eta_m$  определяется из выражения (5.24) с подстановкой измененных значений массы заготовки  $M$  и времени нагрева  $t_{н1}$ .

При этом  $t_{н1}$  определяется из соотношения

$$t_{н1} = \frac{3600}{\Pi} n, \quad (5.37)$$

где  $\Pi$  — производительность ковочного механизма, шт./ч;  $n$  — целое число заготовок, одновременно нагреваемых в индукторе; для нагревателя методического действия  $n$  определяется по формуле

$$n = \frac{l_u - \Delta l_u}{l_3}. \quad (5.38)$$

Если в результате расчета полный КПД индуктора получится выше 50%, индуктор считается приемлемым для работы в новых условиях. При полном КПД менее 50% для нагрева новых заготовок целесообразно использовать другой индуктор с меньшим зазором между внутренней поверхностью спирали и заготовкой.

Убедившись, что полный КПД индуктора не ниже 50%, целесообразно произвести расчет напряжения  $U_1$ , которое необходимо подвести к индуктору для обеспечения заданного времени нагрева. Напряжение определится по формуле

$$U_1 = \omega z' \sqrt{\frac{P_u}{R'_3}} b. \quad (5.39)$$

Входящие в формулу (5.39) значения  $z'$ ,  $P_u$  и  $R'_3$  определяются из выражений (5.11), (5.21), (5.22) с подстановкой новых значений активного и реактивного сопротивлений  $R'_2$  и  $X'_2$ , вносимых заготовкой меньшего сечения, а также массы заготовки  $M$ .

В случае если полученное расчетом значение  $V_1$  окажется ниже напряжения, которое может быть получено с помощью включенного в цепь автотрансформатора, следует либо перейти к использованию другого индуктора, либо включить в схему основного индуктора сопротивление в виде реактора.

Если же в результате расчета окажется, что значение  $U_1$  превышает номинальное напряжение генератора и не может быть повышено с помощью автотрансформатора, то рассчитанный индуктор не обеспечит заданного темпа нагрева заготовок в новых условиях работы.

Расчет реактивной мощности  $P_{c1}$  и количества банок конденсаторов  $n_1$  для новых условий работы индуктора производится по формуле

$$n_{c1} = \frac{P_c U^2}{P_{c1} U_1^2}, \quad (5.40)$$

где  $U$  – номинальное напряжение генератора;  $U_1$  – напряжение генератора, необходимое для обеспечения заданного темпа нагрева заготовок меньшего сечения;  $P_{c1}$  – реактивная мощность, рассчитанная с учетом нагрева заготовки максимального сечения.

Входящая в выражение (5.40) величина  $P_{c1}$  рассчитывается по формуле (5.31) с подстановкой новых значений  $P_{и}$  и  $\cos \varphi$ , определяемых, в свою очередь, по формулам (5.21), (5.32).

Необходимо иметь в виду, что если проектируемый индукционный нагреватель рассчитывается на нагрев заготовок различного сечения, количество банок конденсаторов должно быть максимальным.

## 5.2. Метод К.З. Шепеляковского

### Выбор основных параметров нагрева и оборудования

Глубину слоя металла, в котором протекает ток, определяют из соотношения

$$\Delta = 5000 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (5.41)$$

где  $\Delta$  – глубина проникновения тока, см;  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника, Ом×см;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала проводника, гс/э;  $f$  – частота тока, Гц.

Для холодной низколегированной стали (15–20° С)  $\Delta = \frac{2}{\sqrt{f}}$  ;  
 для горячей – (1200° С) –  $\Delta = \frac{60}{\sqrt{f}}$  .

С повышением температуры глубина проникновения тока в нагреваемую заготовку возрастает (табл. 5.4).

Таблица 5.4

*Глубина проникновения тока в сталь  
при разных частотах и температурах*

Частота тока, Гц	Глубина проникновения тока, мм	
	сталь углеродистая	
	при 20° С	сталь при 1200° С
50	4,5	80
1000	1,0	17,0
2500	0,64	11,0
8000	0,35	6,2

К концу нагрева наблюдается некоторая разность температур поверхности заготовки и ее центра, растущая при увеличении скорости нагрева. Считают допустимым, чтобы перепад температур к концу нагрева составлял 100–150° С. Следует, однако, учесть, что при переносе заготовки в ковочную машину температура по ее сечению достаточно выравнивается. Время, необходимое для сквозного нагрева заготовки до 1250° С на частотах 1000, 2500 и 8000 Гц при заданной допускаемой неравномерности температуры по сечению, можно определить по опытным графикам (рис. 5.8).

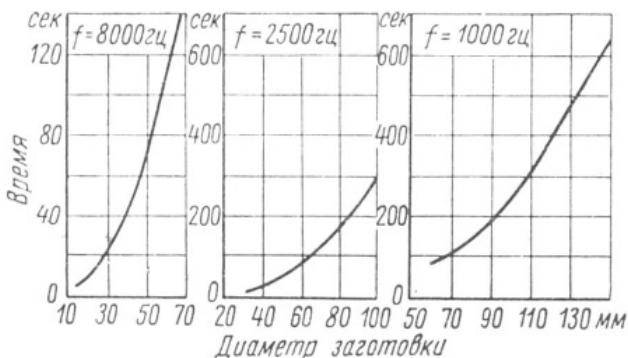


Рис. 5.8. Максимальное время нагрева стальной заготовки до 1250° С в зависимости от её диаметра и частоты тока (разность температур между поверхностью и центром заготовки 100–150° С)

При проектировании установок и выборе оборудования следует выбирать наименьшие время нагрева заготовок и допускаемую

частоту. В противном случае возрастают габариты установки (при методическом нагревателе) или снижается ее производительность (при нагревателе периодического действия), а также образуется больше окалины, увеличиваются потери тепла при нагреве.

При пользовании графиками на рис. 5.8 необходимо иметь в виду, что зависимости, приведенные на них, найдены экспериментально в работе с обычными методическими индукторами с равномерной намоткой витков при следующих условиях:

- 1) напряженность магнитного поля индуктора на всех стадиях нагрева заготовки постоянна;
- 2) удельная мощность, развиваемая в заготовке, относительно мала и находится в пределах  $0,05-0,10$  кВт/см<sup>2</sup>;
- 3) температура поверхности заготовки к концу цикла нагрева отличается от температуры центра относительно мало (на  $100-150^{\circ}\text{C}$ );
- 4) температура поверхности заготовки в конце цикла нагрева незначительно превосходит необходимую конечную температуру нагрева (не более чем на  $30-50^{\circ}\text{C}$ ).

Рост температуры заготовки на поверхности и в центре схематически изображен на рис. 5.9.

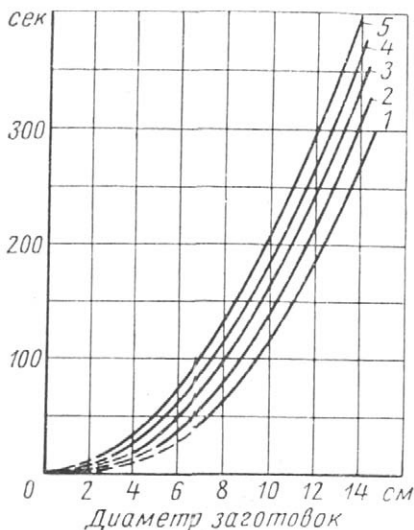


Рис. 5.9. Минимальное время ускоренного индукционного нагрева стальных заготовок до  $1250^{\circ}\text{C}$  в зависимости от их диаметра и частоты тока при конечном перепаде температуры по сечению заготовки  $100^{\circ}\text{C}$  (частота тока, Гц: 1 - 500; 2 - 1000; 3 - 2500; 4 - 8000; 5 - радиочастоты)



Применением неодинакового шага витков в разных зонах индуктора или соответствующим выбором электрического режима можно достигнуть роста температур на поверхности и в центре заготовки в соответствии с кривой б (рис. 5.9). Для такого «ускоренного» индукционного нагрева требуются методические индукторы специальной конструкции. Зона индуктора, в которой поверхность заготовки нагревается от начальной температуры до ковочной (1200–1250° С), выполняется с более плотной намоткой витков, чем та, в которой температура поверхности заготовки остается практически постоянной и происходит интенсивный нагрев ее сердцевины.

Обычно намотка индуктора составляется из 3–4 секций, имеющих разный шаг намотки.

Ускоренный индукционный нагрев целесообразен во всех случаях, когда производительность нагревательного устройства превышает 0,8 т/ч. Минимальное время, необходимое при ускоренном индукционном нагреве заготовок, может быть выбрано по кривым (рис. 5.9).

Применение специализированных индукторов для ускоренного нагрева рационально также в автоматических нагревательно-ковочных агрегатах, в которых обычно требуется минимальная длина индукторов. Обработка давлением в них производится за весьма короткое время, поэтому заготовки нагреваются обычно лишь до 1000° С.

Для максимального увеличения скорости нагрева заготовок диаметром 20–40 мм необходимо режим нагрева выбирать исходя из следующих положений.

1. Удельная мощность, развиваемая в нагреваемой заготовке, должна быть в пределах 0,5–1 кВт/см<sup>2</sup>.

2. При необходимой конечной температуре нагрева 1000° С нужно применять такой режим, при котором температура поверхности заготовки в конце цикла нагрева составляет 1200–1250° С. Температура центра заготовки при этом обычно меньше температуры поверхности на 400–600° С. За время переноса нагретой заготовки из индуктора в высадочную машину (обычно 2–3 с) произойдет выравнивание температуры по сечению заготовки до 1000° С.

Таким образом, при скоростных режимах нагрева характерно применение значительных удельных мощностей (в 5–6 раз больших, чем по режимам, соответствующим рис. 5.8) и, следовательно, высоких температурных градиентов между поверхностью и центром заготовки.

Выбор минимальных продолжительностей нагрева в соответствии с приведенными положениями позволяет рекомендовать следующее минимальное время нагрева до 1000° С:

Диаметр заготовки, мм	20	24	30	36	40
Минимальное время нагрева до 1000° С, с	2,5	3	5	9	12,5

Ориентировочное определение времени индукционного нагрева заготовок при частоте 50 Гц можно производить при помощи данных табл. 5.5.

Таблица 5.5

*Время (с), индукционного нагрева заготовок при частоте 50 Гц*

Диаметр заготовок, мм	Напряжённость магнитного поля, Э	
	6000	10000
100	—	240
150	420	150
200	280	90

При уменьшении диаметров заготовок существенно снижается КПД индуктора, работающего на частоте 50 Гц, что обуславливает уменьшение удельной мощности, развиваемой в заготовке, и, следовательно, увеличение времени нагрева.

Получение на частоте 50 Гц напряженности магнитного поля индуктора более чем 10000 Э затруднительно, поэтому можно считать, что для нагрева заготовок диаметром 100–200 мм необходимо 4–8 минут.

Частоту нагревающего тока можно выбирать, руководствуясь следующими данными:

Диаметр заготовок, мм	5–20	15–40	30–80
Частота тока, Гц	200000–300000	8000	2500
Диаметр заготовок, мм	50–120	70–160	>200
Частота тока, Гц	1000	500	50

Наиболее часто для индукционного нагрева используют машинные генераторы частотой 1000–2500 Гц.

Основные энергетические показатели индукционного нагрева приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

*Удельные энергетические показатели сквозного индукционного нагрева стали под ковку и штамповку*

Показатели	Частота, Гц	
	1000–8000	50
КПД генератора	0,8–0,88	–
КПД индуктора	0,7–0,75	0,55–0,7
Потребление электроэнергии на 1 т металла в кВт×ч	400–500	350–450
Вес металла, нагреваемого генератором мощностью 100 кВт/ч, кг	до 300	–
Вес металла, нагреваемого за 1 ч при установленной мощности питающей сети 100 кВт и частоте тока 50 Гц, кг	до 250	до 280

При частотах 1000–8000 Гц удельный расход электроэнергии сильно зависит от степени использования генератора во времени. При непрерывной загрузке генератора расход энергии близок к 400 кВт×ч на 1 т нагретых заготовок. Когда генератор значительную часть времени работает без нагрузки (вследствие перерывов в работе ковочного оборудования), расход энергии достигает 500–600 кВт×ч и даже более на 1 т заготовок.

Для выбора мощностей высокочастотного генератора и питающей сети с достаточной для практики точностью можно пользоваться соотношениями:

$$p_c = K_g q; P_c = K_c q, \quad (5.42)$$

где  $P_c$  – мощность высокочастотного генератора, кВт;  $P_c$  – мощность питающей электросети, кВт;  $q$  – масса заготовок, нагреваемых за 1 ч до ковочной температуры (1200° С), кг;  $K_g$  – коэффициент, характеризующий КПД передачи энергии от клемм генератора до заготовки;  $K_c$  – коэффициент, характеризующий КПД передачи энергии от сети 50 Гц до заготовки (табл. 5.7).

Для заготовок диаметром больше 60 мм начинают применять комбинированный нагрев надвух частотах; до точки Кюри (~770° С) на частоте 50 Гц и до ковочной температуры (1200–1250° С) на частоте 1000 или 2500 Гц. При этом установленная мощность высокочастотных генераторов примерно в 2 раза, а удельный расход электроэнергии примерно на 20% ниже.

Таблица 5.7

Значения коэффициентов для определения мощностей генераторов и питающей сети частотой тока 50 Гц

Тип установок	$K_c$		
	при частоте тока, Гц		
	1000–8000	50	
С непосредственным подключением индуктора к генератору (сети)	0,4	0,5	0,45
С подключением индуктора к генератору через понижающий трансформатор	0,5	0,62	0,5

Мощность отдельных элементов установки, необходимую для ее питания при нагреве на двух частотах, можно ориентировочно выбрать на основании следующих соотношений:

- индуктора при нагреве до точки Кюри ( $770^\circ \text{C}$ ):

$$P_c' = 0,2q, \text{ кВт}, \quad (5.43)$$

где  $q$  – масса нагреваемых заготовок за 1 ч, кг;

- генератора, питающего индуктор при нагреве от  $770^\circ \text{C}$  до  $1200\text{--}1250^\circ \text{C}$ :

$$P_c = 0,18q, \text{ кВт}; \quad (5.44)$$

- сети, питающей привод генератора повышенной частоты:

$$P_c = 0,2q, \text{ кВт}. \quad (5.45)$$

Общая мощность сети, питающей установку для нагрева на двух частотах:

$$P_c = 0,4q, \text{ кВт}. \quad (5.46)$$

### 5.3. Метод С.В. Сельского и З.Г. Унаняна

Вследствие поверхностного эффекта – известного явления неравномерного распределения переменного тока в проводниках – плотности тока в индуктирующем проводнике и тока, протекающего по заготовке, неодинаковы по их сечению. Наибольшие значения плотностей тока наблюдаются на поверхностях индуктирующего проводника и нагреваемой заготовки. Плотности тока постепенно уменьшаются по экспоненциальному закону по мере удаления от этих поверхностей последующей зависимости:

$$\delta_x = \delta_0 e^{-\frac{x}{\Delta}}, \quad (5.47)$$

где  $\delta_x$  – действующее значение плотности тока на расстоянии  $x$  от поверхности проводника, А/м<sup>2</sup>;  $\delta_0$  – действующее значение плотности тока на поверхности проводника, А/м<sup>2</sup>;  $e$  – основание натуральных логарифмов, равное 2,718;  $\Delta$  – расстояние (м) от поверхности проводника по направлению к его центру, на котором плотность тока убывает в  $e$  раз по сравнению с плотностью тока на поверхности, называемое в технике индукционного нагрева глубиной проникновения тока (табл. 5.8).

Таблица 5.8

*Глубина проникновения (мм) тока в сталь*

Температура, °С	Удельное электрическое сопротивление $\rho \times 10^8$ , Ом×м	Относительная магнитная проницаемость	Глубина проникновения тока в металл при различных частотах, Гц						
			50	1000	2500	8000	70000	150000	250000
20	10	60	2,8	0,64	0,40	0,22	0,07	0,05	0,04
1000	130	1	85,5	19,0	12,0	6,7	2,21	1,55	1,20

Глубина проникновения тока

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \rho}}, \quad (5.48)$$

где  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  – частота тока, Гц);  $\mu$  – магнитная проницаемость материала проводника, Гн/м;  $\mu = \mu_{\text{отн}} \mu_0$  ( $\mu_{\text{отн}}$  – относительная магнитная проницаемость,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м);  $\rho$  – удельная электрическая проводимость среды, Ом×м.

**Выбор времени нагрева.** На рис. 5.10 приведены графики продолжительности обычного нагрева до 1250°С стальных заготовок разных диаметров (перепад температур между поверхностью и центром в конце нагрева  $t = 100^\circ\text{C}$ ). Для квадратных заготовок со стороной  $a$  принимают эквивалентный диаметр  $2R = 1,14 a$ .

**Мощность индукционного нагревателя.** При выборе источника питания (преобразователя частоты) и силового электротехнического оборудования индукционной технологической установки необходимо знать мощность нагревателя. Исходными данными для расчета являются: диаметр нагреваемой заготовки, необходимая производительность (кг/ч) и температура нагрева (°С).

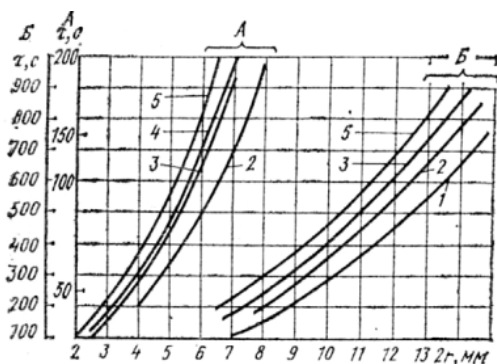


Рис. 5.10. Время нагрева заготовок при частоте, Гц:  
1 – 500; 2 – 1000; 3 – 2500; 4 – 4000; 5 – 10000

Мощность (кВт), выделяемая в нагреваемой заготовке,

$$P_3 = \frac{ctG}{3,6 \times 10^5}, \quad (5.49)$$

где  $t$  – температура нагрева, °С;  $c$  – удельная теплоёмкость нагреваемого металла, Дж/(кг×°С);  $G$  – необходимая производительность, кг/ч.

Полезную мощность (кВт) можно также определить с помощью кривых удельного количества теплоты  $l_0$ , показанных на рис. 5.11, и заданной производительности по формуле

$$P_3 = l_0 G \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}, \quad (5.50)$$

где  $l_0$  – удельное количество теплоты, Дж/кг;  $G$  – производительность, кг/ч.

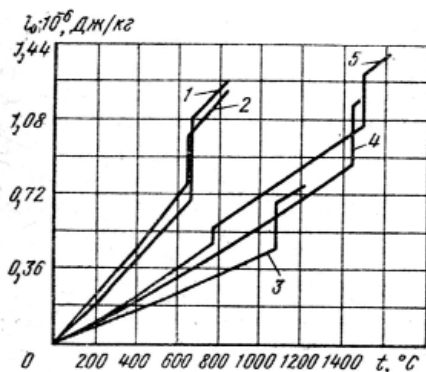


Рис. 5.11. Зависимость удельного количества теплоты металлов от температуры: 1 – алюминий; 2 – магний; 3 – медь; 4 – никель; 5 – сталь

Полезная мощность индукционного нагревателя  $P_{II}$  должна всегда превышать полезную мощность  $P_3$ , выделяемую в нагреваемой заготовке, на величину тепловых и электрических потерь, которые учитываются общим коэффициентом полезного действия ( $\eta = 0,5 \div 0,6$ ):

$$P_{II} \frac{P_3}{\eta}. \quad (5.51)$$

**Длина индуктора.** При использовании индукционного нагрева в конкретном технологическом процессе возникает необходимость в определении длины индуктора. Для этого вначале, зная диаметр нагреваемой заготовки, по графику на рис. 5.10 находят время нагрева  $\tau$  (с) и вычисляют массу 1 м длины заготовки  $L$  (кг/м). Затем по заданной производительности  $G$  (кг/ч) находят среднюю скорость (м/с) перемещения заготовки внутри индуктора:

$$v = \frac{G}{L3600}. \quad (5.52)$$

Длина индуктора (м):

$$l_{II} = v\tau. \quad (5.53)$$

Для нагрева стальных заготовок диаметром 60 мм и более под объёмную штамповку экономически целесообразно использовать комбинированный индукционный нагрев на двух частотах: до 770° С (несколько выше точки Кюри) – 50 Гц, а в диапазоне 770–1250° С – 1000 или 2500 Гц.

## 6. МЕТОДЫ РАСЧЁТА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ УСТАНОВОК

### 6.1. Метод М.А. Касенкова

Расчет установок контактного нагрева заключается в определении времени нагрева заготовок заданного размера, КПД и производительности установки, а также параметров, необходимых для подбора или конструирования силового трансформатора.

Исходными данными для расчета являются:

- 1) материал и размеры заготовок, подлежащих нагреву;
- 2) температура, до которой должна нагреваться заготовка;
- 3) режим работы установки и частота тока сети, к которой будет подключена установка.

#### 6.1.1. Продолжительность нагрева заготовок

Если обозначить через  $Q$  количество тепла, выделившегося в заготовке при прохождении по ней электрического тока  $I_{cp}$ ;  $Q_1$  – количество тепла, необходимого для нагрева заготовки весом  $G$  до температуры  $T_k$ , а  $Q_2$  – количество тепла, излучаемого с нагретой поверхности  $S$  заготовки, то с известным приближением можно записать следующее:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (6.1)$$

где

$$Q = 0,24P_A t = 0,24I_{cp}^2 R t; \quad (6.2)$$

$$Q_1 = cM(T_k - T_n); \quad (6.3)$$

$$Q_2 = g_t tS = C_0 K_i \left[ \left( \frac{T_k}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{1000} \right)^4 \right] tS. \quad (6.4)$$

В формулах (6.2–6.4)  $P_A$  – активная мощность электрического тока, вводимая в заготовку;  $t$  – продолжительность нагрева;  $c$  – средняя теплоемкость материала заготовки;  $M$  – масса заготовки;  $g_i$  – величина потерь на излучение с поверхности  $s$ , Вт/см<sup>2</sup>;  $C_0$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, величина  $C_0$  равна 4,9 ккал/м<sup>2</sup>·ч·°K<sup>4</sup> = 20,482 кДж/м<sup>2</sup>·ч·°K<sup>4</sup>;  $K_i$  – коэффициент, учитывающий отражающие свойства поверхности заготовки.

Средняя удельная теплоемкость стали при нагреве ее от 0 до  $T_k$  (с) и теплосодержание ( $Q$ ) при нагреве стали от 0 °C до  $T_k$  °C приведены в табл. 6.1.



*Теплоемкость стали  $C$  и теплосодержание  $Q$  в зависимости от изменения температуры*

Температура стали, °С	Теплоемкость $C$ , ккал/ кг	Теплосодержание $Q$ , ккал/кг
300	0,129	37,7
400	0,131	52,2
500	0,137	68,3
600	0,142	85,0
700	0,159	111,6
800	0,163	136,0
900	0,165	153,0
1000	0,168	168,0
1100	0,168	183,0
1200	0,167	200,0
1300	0,167	217,0
1400	0,167	233,0

Подставляя в уравнение (6.1) значения  $Q$ ,  $Q_1$  и  $Q_2$ , получим выражение

$$0,24P_A t = cM(T_k - T_n) + q_i tS; \quad (6.5)$$

отсюда

$$t = \frac{cM(T_n - T_n)}{0,24P_A - q_i S} = \frac{cM(T_k - T_n)}{0,24I_{cp}^2 R - C_0 K_i \left[ \left( \frac{T_k}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{1000} \right)^4 \right] S}. \quad (6.5 a)$$

Анализ формулы (6.5 a) показывает, что при постоянном контактном давлении регулирование времени или скорости нагрева осуществимо лишь путем изменения величины тока  $I_{cp}$ . Прочие величины, входящие в формулу, либо являются постоянными и не меняются в процессе нагрева ( $G$ ,  $S$  и  $\Delta T$ ), либо предопределены свойствами и физическим состоянием металла ( $R$ ,  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $K_i$ ) и произвольному изменению не поддаются.

Пределы изменения  $I_{cp}$ , а следовательно, и времени нагрева не безграничны и лимитируются, во-первых, трудностью введения электроэнергии в нагреваемую заготовку, а во-вторых – неравномерностью распределения температур по ее сечению. Трудности введения электроэнергии обуславливаются сравнительно высоким переходным сопротивлением системы *контакт–заготовка*. Неравномерность нагрева по сечению заготовки может при слишком большом токе привести к недопустимым местным перегревам и даже расплавлению металла. Оба эти обстоятельства заставляют

подбирать оптимальную величину тока  $I_{\text{ср}}$ , а следовательно, и вводимую в заготовку электрическую мощность, которая не вызывала бы перегрева заготовки и контактов в контактной зоне, а также обеспечила экономичный нагрев заготовки с перепадом температур между ее поверхностью и сердцевиной не выше допустимого.

Практикой установлено, что при нагреве под ковку и штамповку для соблюдения указанных требований вводимая в заготовку электрическая мощность должна быть порядка  $P_A = (16,7 \div 25 \text{ кВт}) n$ , где  $n = \frac{l}{100 \text{ мм}}$ ;  $l$  – длина заготовки.

При известном значении  $P_A$  формула (6.5) примет вид

$$t = \frac{cM(T_{\kappa} - T_n)}{0,24(16,7 \div 25)n - q_i S}, \text{ с.} \quad (6.6)$$

В практике инженерных расчетов контактного нагрева величинной потерь тепла на излучения ( $q_i S$ ) обычно пренебрегают и рассчитывают время (или скорость) нагрева заготовки заданных размеров по формуле

$$t = \frac{cM_{100}(T_{\kappa} - T_n)}{(4 \div 6)}, \text{ с,} \quad (6.7)$$

где  $M_{100}$  – масса нагреваемой заготовки длиной 100 мм, кг;  $4 \div 6$  – величина скорости выделения тепла на 100 мм длины заготовки, ккал/с.

В случае нагрева круглых заготовок, когда

$$M_{100} = \frac{\pi d^2}{4} \rho_n \cdot 10^{-3} = 0,785 d^2 \rho_n \cdot 10^{-2},$$

где  $\rho_n$  – выражена в г/см<sup>3</sup>, формула (6.7) примет вид

$$t = \frac{c0,785 d^2 c \rho_n (T_{\kappa} - T_n)}{4 \div 6} 10^{-2}, \text{ с.} \quad (6.8)$$

На основании формулы (6.8)

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}, \quad (6.9)$$

то есть при нагреве цилиндрических заготовок необходимое для него время пропорционально квадрату их диаметра.

### 6.1.2. КПД установок контактного электронагрева

Коэффициент полезного действия  $\eta$  установки контактного нагрева определяется отношением активного сопротивления  $R_A$  нагреваемой заготовки к сумме  $R_A$  и  $R_\sigma$ , где  $R_\sigma$  – сумма активного сопротивления подводящих шин и приведенного сопротивления первичной обмотки трансформатора, то есть

$$\eta = \frac{R_A}{R_A + R_\sigma}. \quad (6.10)$$

Из формулы (6.10) видно, что КПД установки контактного нагрева зависит как от конструктивного исполнения самой установки, так и от степени ее использования при эксплуатации.

В части конструктивной КПД зависит от активного сопротивления шин, подводящих ток от вторичной обмотки силового трансформатора к контактным устройствам, а также от величины приведенного сопротивления первичной обмотки трансформатора. Для повышения КПД, а также для уменьшения расхода меди при конструировании установок контактного нагрева необходимо стремиться к возможному укорочению путей вторичного тока (при контактном нагреве величина вторичного тока достигает десятков тысяч ампер, что при допустимой плотности тока во вторичной цепи трансформатора, равной  $2 \text{ А/мм}^2$ , приводит к значительному расходу меди (1–1,5 т на одну установку). Укорочение путей может быть достигнуто расположением силового трансформатора вблизи контактных головок.

Что касается повышения КПД установки в процессе эксплуатации, то такая возможность осуществима путем увеличения длины нагреваемой заготовки за счет штамповки из нее большего количества поковок.

В практике расчетов установок контактного нагрева величину  $\eta$  обычно определяют по графику, приведенному на рис. 6.1. Как видно из графика, КПД установки резко изменяется в зависимости от отношения  $\frac{l}{d^2}$  или, что то же, от величины активного сопротивления заготовки  $R_A = \frac{4}{\pi} \frac{l}{d^2} \rho$ .

При  $\frac{l}{d^2} < 1$  КПД установки резко падает, что необходимо учитывать при определении рациональности применения способа контактного электронагрева.

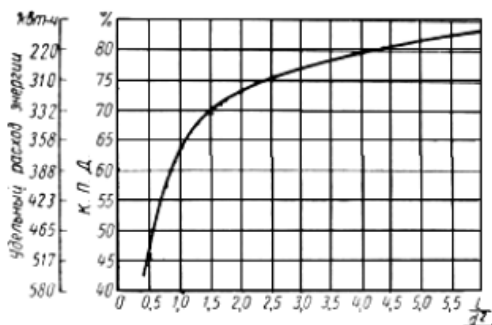


Рис. 6.1. График зависимости КПД и удельного расхода электроэнергии установки контактного нагрева от отношения  $\frac{l}{d^2}$ :

$l$  – длина заготовки, см;  $d$  – диаметр заготовки, см; КПД, %; удельный расход (кВт×ч) на 1 т стали, нагретой до  $T_k = 1200^\circ \text{C}$

### 6.1.3. Силовой трансформатор

Исходными параметрами, необходимыми для подбора или конструирования силового трансформатора электронагревательной установки, являются мощность трансформатора, первичное и вторичное напряжение, коэффициент повторного включения и частота тока.

При определении мощности трансформатора рассчитываются три величины:

- 1)  $P_A$  – активная мощность;
- 2)  $P_{\text{каж}}$  – кажущаяся мощность;
- 3)  $P_{\text{расч}}$  – расчетная мощность.

Активная мощность трансформатора определяется из условия непрерывной работы установки по формуле (6.5). При пользовании формулой (6.5) учитывают КПД установки –  $\eta$ ; потерями тепла на излучение ввиду незначительного времени нагрева обычно пренебрегают. С учетом вышеизложенного формула (3.5), решенная относительно  $P_A$ , примет вид

$$P_A = 4,18 \frac{cM(T_k - T_n)}{t\eta}. \quad (6.11)$$

При известном значении  $P_A$  величина  $P_{\text{каж}}$  определится по формуле

$$P_{\text{каж}} = \frac{P_A}{\cos \varphi}, \quad (6.12)$$

где  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности установки, определяемый по графику на рис. 6.2.

Расчетная длительная мощность  $P_{расч}$  определяется с учетом реальной загрузки трансформатора, который в процессе нагрева заготовки работает с паузами. Длительность пауз определяется временем, необходимым для замены горячей заготовки холодной, и вынужденным временем бездействия установки при недостаточной производительности ковочного механизма или штампа. Для определения  $P_{расч}$  вычисляется продолжительность включения ПВ, %, которая характеризует степень загрузки трансформатора по времени. Расчет ПВ производится по формуле

$$ПВ = \frac{\sum t}{\sum (t + t_n)} 100, \% \quad (6.13)$$

где  $t$  – время, в течение которого установка электронагрева находится в действии, с;  $t_n$  – время пауз, в течение которого установка выключена, с.

При известных значениях  $P_{каж}$  и ПВ величина  $P_{расч}$  определится по формуле

$$P_{расч} = \sqrt{P_{каж}^2 \frac{ПВ}{100}}, \text{ кВА.} \quad (6.14)$$

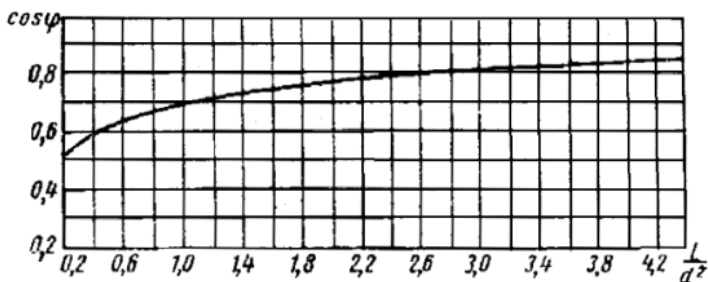


Рис. 6.2. График зависимости коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ) от отношения  $\frac{1}{d^2}$  нагреваемой заготовки (построен на основании данных испытаний установки контактного нагрева мощностью 200 кВА)

После подстановки значений  $P_{каж}$  и  $P_A$  [см. выражения (6.11) и (6.12)] формула (6.14) примет вид:

$$P_{расч} = \frac{0,418 M c (T_k - T_n)}{\cos \varphi \eta t} \sqrt{ПВ}, \text{ кВА.} \quad (6.14 a)$$

Для определения напряжения, подводимого к заготовке, в практике расчетов установок контактного нагрева пользуются

эмпирической формулой, дающей удовлетворительные результаты при скоростях выделения тепла 4–6 кал/с со 100 мм длины заготовки.

Эта формула имеет вид

$$U_{cp} = 7,07 \frac{l_3}{\eta \sqrt{t}}, \text{ В}, \quad (6.15)$$

где  $U_{cp}$  – среднее значение напряжения, подводимого в процессе нагрева к заготовке, В;  $l_3$  – длина нагреваемой части заготовки, мм;  $t$  – время нагрева заготовки, с;  $\eta$  – %.

Напряжение холостого хода  $U_{xx}$  трансформатора (при отключенной заготовке), соответствующее найденному значению  $U_{cp}$ , определится по формуле

$$U_{чч} = \frac{U_{cp}}{U \%} 100, \text{ В}, \quad (6.16)$$

где  $U \%$  – напряжение на заготовке в процентах от напряжения холостого хода.

Значение  $U \%$  определяется из графика (рис. 6.3), на котором по оси ординат приведены значения напряжения на заготовке в процентах от напряжения холостого хода, а по оси абсцисс – величина вторичного тока. При пользовании графиком величина вторичного тока определяется по формуле

$$I_{cp} = \frac{P \cdot 10^3}{U_{cp}}, \text{ А}, \quad (6.17)$$

где  $P$  – средняя мощность, идущая в заготовку, кВт; рассчитывается по формуле (6.11) без учета электрического КПД установки.

При расчетах установок, предназначенных для нагрева заготовок различного сечения и длины, напряжение холостого хода определяется для случаев нагрева самой длинной и тонкой и самой короткой и толстой заготовок, при этом рекомендуется, чтобы отношение наибольшего вторичного напряжения к наименьшему не превышало двух.

При расчете установки контактного нагрева необходимо определить:

- 1) производительность установки;
- 2) КПД установки;
- 3) исходные данные для подбора силового трансформатора;
- 4) давление на контакты.

При постоянном контактном давлении скорость нагрева регулируется изменением величины тока. Пределы изменения силы

тока  $I$  и времени нагрева лимитируются трудностью введения электроэнергии в нагреваемую заготовку и неравномерностью распределения температур по ее сечению.

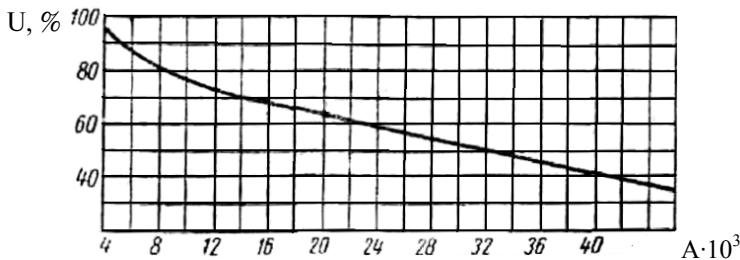


Рис. 6.3. График зависимости падения напряжения в силовом трансформаторе от величины вторичного тока ( $A \cdot 10^3$ )

Увеличение контактного давления, тщательная зачистка поверхности заготовок в местах контактирования, специальная форма контактов, устройство для охлаждения способствуют снижению продолжительности нагрева.

Производительность установки определяется по формуле

$$\Pi = \frac{3600}{\tau + \tau_n},$$

где  $\tau$  – продолжительность нагрева, с;  $\tau_n$  – время пауз, в течение которых установка включена, с.

Заготовка представляет собой часть вторичной цепи понижающего трансформатора, поэтому расход электроэнергии связан с КПД трансформатора:

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{R}{R + R_{\text{тр}}},$$

где  $R$  – активное сопротивление заготовки;  $R_{\text{тр}}$  – сопротивление трансформатора, приведенное к его вторичной обмотке.

Исходными параметрами, необходимыми для подбора силового трансформатора электронагревательной установки, являются его мощность, первичное и вторичное напряжение, коэффициент повторного включения.

## 6.2. Метод К.З. Шепеляковского

### Выбор основных параметров нагрева и оборудования

**Сила тока и мощность, выделяющаяся в заготовке.** Нагреваемая заготовка зажимается между двумя парами массивных контактов, соединенных с вторичной обмоткой понижающего трансформатора, первичная обмотка которого при помощи контактора подключается к питающей электросети напряжением 380 или 220 В. Сила тока, протекающего в заготовке:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (6.18)$$

где  $I$  – сила тока в заготовке, А;  $U$  – напряжение на контактах установки, В;  $Z$  – полное сопротивление заготовки, учитывающее её активное и индуктивное сопротивление.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (6.19)$$

где  $X$  – индуктивное сопротивление заготовки;  $R$  – активное сопротивление заготовки:

$$R = \delta \frac{l}{S}, \quad (6.20)$$

где  $\delta$  – удельное сопротивление металла заготовки, Ом×см;  $l$  – длина заготовки, см;  $S$  – поперечное сечение нагреваемой заготовки, см<sup>2</sup>.

При определении  $S$  необходимо учитывать глубину проникновения тока в металл заготовки.

Мощность  $P_3 = I^2 R \times 10^{-3}$ , кВт.

Количество тепла  $g = 0,24 I^2 R$ , ккал/с.

Для увеличения производительности нагревательного устройства желательно применять возможно большую скорость нагрева (прирост температуры в 1 с), которая пропорциональна мощности, передаваемой в заготовке. Однако при чрезмерно большой мощности в местах контакта развивается местный перегрев, приводящий к оплавлению заготовки.

Предельная мощность, которую можно подводить к заготовке, ограничивается давлением, развиваемым под контактами, и в меньшей степени – диаметром нагреваемой заготовки.

**Выбор мощности трансформатора.** Сопротивление заготовки, а следовательно, и КПД понижающего трансформатора тем выше, чем больше отношение длины заготовки к квадрату её диаметра –



$\frac{l}{d^2}$  (рис. 6.4). Интенсивность ввода энергии в заготовку можно характеризовать средней удельной погонной мощностью  $p$ , которая развивается в заготовке, на единицу её длины (например, на 1 см). При обычно применяемом давлении под контактами (см. ниже) рекомендуется следующая средняя удельная мощность в зависимости от диаметра заготовки:

Диаметр заготовки, мм	20	30	40	50
Средняя удельная мощность $p$ , кВт/см	1,7	1,9	2,1	2,3
Диаметр заготовки, мм	60	70	80	
Средняя удельная мощность $p$ , кВт/см	2,5	2,5	2,5	

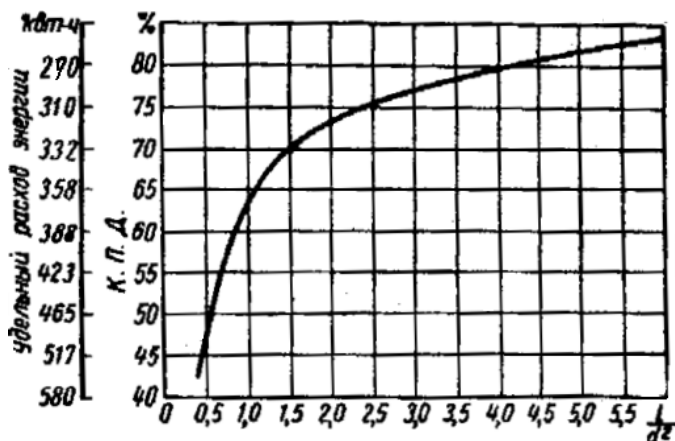


Рис. 6.4. Зависимость удельного расхода электроэнергии при нагреве методом сопротивления от соотношения  $\frac{l}{d^2}$  заготовки

Необходимая активная мощность нагревательного трансформатора

$$P_a = \frac{pl}{10\eta_{TP}}. \quad (6.21)$$

**Выбор давления на контакты.** Для обеспечения удовлетворительной работы контактов установки при рекомендованных выше удельных мощностях рекомендуют применять следующие контактные давления в зависимости от диаметра заготовок:

Диаметр заготовки, мм	20–30	30–50	50–70
Сила контактного давления, кг	9,8	29,4	43,4

Для уменьшения недогрева концов заготовки (зона *A* на рис. 6.5) их размещают так, чтобы контактирование происходило на длине, не превышающей половины ее диаметра. В этом случае распределение температур в местах контакта соответствует зоне *B* на рис. 6.5.

Наблюдаемая неравномерность нагрева (перегрев за контактом и недогрев под контактом) при рекомендованных выше удельных мощностях не снижает качества металла, так как при диаметрах заготовок выше 30 мм температуры достаточно выравниваются во время переноса заготовки из нагревателя в ковочный агрегат.

При диаметрах заготовок меньше 30 мм охлаждающее действие контактов сказывается так сильно, что для получения приемлемого прогрева заготовки под контактом прибегают к снижению давления под ним примерно в середине цикла нагрева. Это осуществляется автоматически посредством уменьшения давления в цилиндрах, зажимающих контакты.

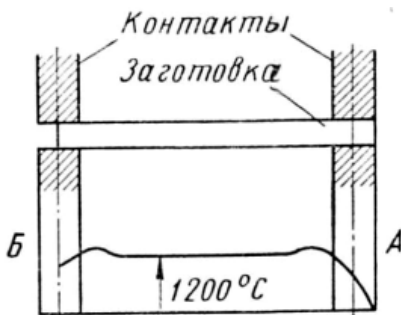


Рис. 6.5. Схема распределения температур на концах заготовки при различном их расположении в контактах установки

### **Время нагрева заготовки до ковочной температуры (1200° С)**

Наименьшего времени нагрева заготовки до ковочной температуры при стабильной, устойчивой работе установки можно достигнуть в том случае, если в ней развиваются приведенные выше значения удельной мощности.

Зависимость величины этого времени от диаметра заготовки показана на рис. 6.6.

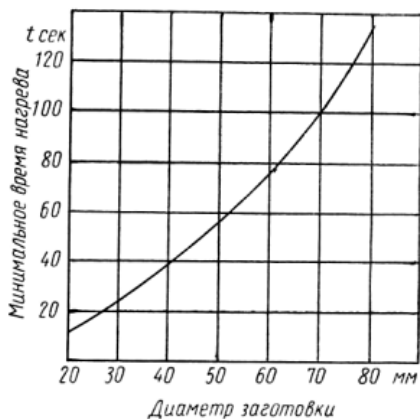


Рис. 6.6. Рекомендуемое минимальное время нагрева методом сопротивления в зависимости от диаметра заготовки

Если из каких-либо соображений применяемая средняя удельная погонная мощность отличается от приведенных выше величин, то время нагрева заготовки можно определить по формуле

$$t = \frac{4,18Gc\Delta T}{P_a \eta_{TP}}, \quad (6.22)$$

где  $t$  — время нагрева заготовки, с;  $G$  — масса заготовки, кг;  $c$  — средняя удельная теплоемкость стали в ккал/кг $^{\circ}$ С в интервале температур нагрева (для большинства сталей  $c = 0,17$ );  $\Delta T$  — повышение температуры заготовки в процессе нагрева,  $^{\circ}$ С;  $P_a$  — средняя потребляемая в процессе нагрева мощность трансформатора;  $\eta_{TP}$  — КПД трансформатора.

**Расчётные параметры трансформатора.** Величины вторичного рабочего напряжения, подводимого к заготовке, можно определить по формуле, предложенной Е.И. Натанзоном и Г.М. Тельновым:

$$U_{cp} = 7,1 \frac{l_k}{\eta_{TP} \sqrt{t}}, \quad (6.23)$$

где  $U_{cp}$  — среднее за время нагрева напряжение, подводимое к заготовке, В;  $l_k$  — длина нагреваемой части заготовки (расстояние между контактами), мм;  $\eta_{TP}$  — КПД нагревательного трансформатора при нагреве данной заготовки;  $t$  — время нагрева заготовки, с.

Вторичное напряжение холостого хода  $U_{2,x}$  нагревательного трансформатора будет отличаться от рабочего напряжения,

подводимого к заготовке, на величину падения напряжения в трансформаторе, что учитывается соотношением

$$U_{2x.x} = K_H U_{CP}, \quad (6.24)$$

где  $K_H$  — коэффициент, учитывающий падение напряжения в трансформаторе, он зависит от тока нагрузки трансформатора (рис. 6.7).

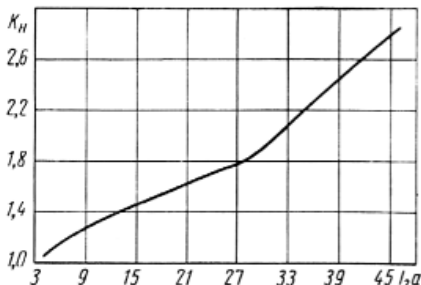


Рис. 6.7. Коэффициент, учитывающий падение напряжения в трансформаторе в зависимости от его тока нагрузки

Среднее значение вторичного тока ориентировочно определяется из соотношения

$$I_2 = \frac{100pl}{U_{CP}}, \text{ А}, \quad (6.25)$$

где  $p$  — средняя удельная мощность, кВт/см;  $l$  — длина заготовки, мм.

Кажущаяся мощность трансформатора:

$$P_{\text{каж}} = U_1 I_1 = \frac{P_a}{\cos \varphi}, \text{ кВА} \quad (6.26)$$

где  $U_1 I_1$  — напряжение и ток в первичной цепи трансформатора;  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности трансформатора (рис. 6.8).

Расчётная мощность трансформатора:

$$P_{\text{расч}} = \sqrt{P_{\text{каж}}^2 K}, \quad (6.27)$$

где  $K$  — коэффициент повторно-кратковременного режима,

$$K = \frac{\sum t}{\sum (t + t_n)}, \quad (6.28)$$

здесь  $\sum t$  — суммарное время работы установки за 1 ч или смену;  $\sum (t + t_n)$  — общее время работы установки, в том числе и паузы между включениями (час или смена).

Значения  $P_{\text{расч}}$ ,  $U_{2\text{х.х}}$ , а также величина первичного напряжения  $U_1$  (напряжения питающей сети) являются исходными данными для проектирования нагревательного трансформатора.

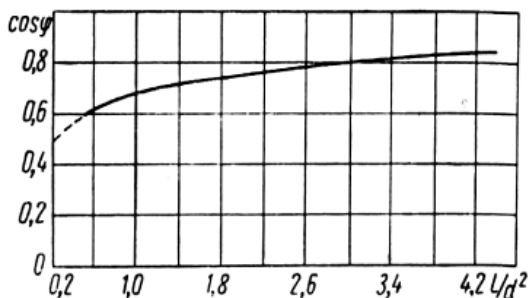


Рис. 6.8. Ориентировочный коэффициент мощности на первичных жазимах нагревательного трансформатора в зависимости от соотношения  $\frac{l}{d^2}$  заготовки

### 6.3. Метод С.В. Сельского и З.Г. Унаняна

#### Выбор и расчет основных параметров процесса и оборудования.

Активное и внутреннее индуктивное сопротивление заготовок цилиндрической формы из ферромагнитных и парамагнитных материалов определяют по графику на рис. 6.9.

Для заготовок из ферромагнитных материалов в виде прямоугольников, равнобоких уголков, тавров, двутавров можно пользоваться этими же графиками, если аргумент  $\frac{r_0}{z_0}$  заменить отношением  $\frac{2S}{\Pi z_0}$ , где  $S$ ,  $\Pi$  и  $r_0$  – соответственно площадь, периметр поперечного сечения и радиус заготовки;  $z_0 = \Delta$  – глубина проникновения тока в металл.

Сопротивление заготовок постоянному току

$$R_{3,\Pi} = \rho_{(t)} \frac{l}{S}, \quad (6.29)$$

где  $\rho_{(t)}$  – удельное сопротивление нагреваемого металла в зависимости от температуры  $t$ ;  $l$  – длина нагреваемой заготовки;  $S$  – площадь поперечного сечения нагреваемой заготовки.

Продолжительность нагрева (с) заготовки массой  $m'$  до заданной температуры  $t_2$  при средней удельной теплоёмкости

$$\tau = \frac{m'c(t_2 - t_1)}{\eta_T P_{cp}}, \quad (6.30)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – соответственно начальная и конечная температуры заготовки, °С;  $P_{cp} = (17-25) 10^4$ , Вт – средняя мощность, выделяющаяся на 1 м длины заготовки;  $c$  – средняя удельная теплоемкость материала заготовки в заданном интервале температур, Дж/(кг×К);  $m'$  – масса заготовки на 1 м её длины, кг;  $\eta_T$  – коэффициент, учитывающий тепловые потери:

$$\eta_T = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{2r} (0,1 + \frac{10^{-2}}{l}) 10^{-3}}, \quad (6.31)$$

здесь  $r$  – радиус заготовки, м;  $l$  – длина заготовки, м;  $\tau$  – продолжительность нагрева, с.

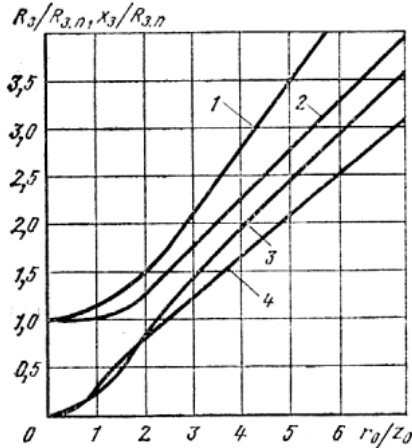


Рис. 6.9. График для расчёта активного и внутреннего индуктивного сопротивлений цилиндрических заготовок из ферромагнитных и парамагнитных материалов:

$$1 - \frac{R_{3,\phi}}{R_{3,\Pi}}; 2 - \frac{R_3}{R_{3,\Pi}}; 3 - \frac{x_3}{R_{3,\Pi}}; 4 - \frac{x_{3,\phi}}{R_{3,\Pi}};$$

$R_3$  – активное сопротивление заготовки из парамагнитного материала;

$R_{3,\phi}$  – то же, для ферромагнитного материала;

$x_3$  – внутреннее индуктивное сопротивление заготовки из

парамагнитного материала;  $x_{3,\phi}$  – то же, для ферромагнитного материала;

$R_{3,\Pi}$  – сопротивление заготовки постоянному току;  $r_0$  – радиус заготовки;

$z_0$  – глубина проникновения электромагнитной волны в металл

Рекомендуемую минимальную продолжительность нагрева в зависимости от диаметра заготовки определяют по рис. 6.10.

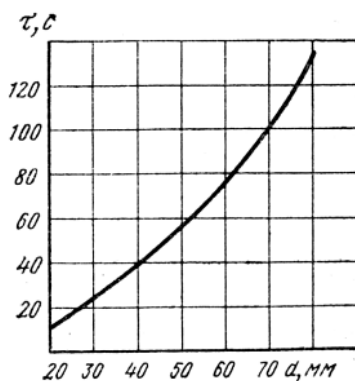


Рис. 6.10. Рекомендуемая минимальная продолжительность нагрева в зависимости от диаметра заготовки

Коэффициент, учитывающий электрические потери в элементах вторичной цепи установки:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{1}{1 + \frac{R_K}{R_3}}, \quad (6.32)$$

где  $R_K$  – сопротивление короткой токопроводящей сети (без обмотки трансформатора), Ом;  $R_3$  – сопротивление заготовки, Ом.

Общий КПД электроконтактной установки:

$$\eta = \eta_{TP} \eta_T \eta_{\Sigma}, \quad (6.33)$$

где  $\eta_{TP}$  – коэффициент полезного действия силового согласующего трансформатора (по паспортным данным).

Активная мощность трансформатора (кВт):

$$P_a = \frac{mc(t_2 - t_1)}{\eta\tau}, \quad (6.34)$$

где  $m$  – масса нагреваемой заготовки, кг.

Установленная мощность трансформатора (кВ×А):

$$P_{y.T} = \frac{P_a}{\cos \varphi}, \quad (6.35)$$

где  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности устройства.

Коэффициент мощности зависит от отношения длины нагреваемой заготовки к квадрату её диаметра  $d$ . Так, при изменении соотношения  $\frac{l}{d^2}$  в пределах 4–14  $\cos \varphi$  меняется от 0,68 до 0,75.

При повторном кратковременном режиме работы показатель

$$\xi = \frac{\tau}{\tau + \tau_{3B}}, \quad (6.36)$$

где  $\tau_{3B}$  — время загрузки и выгрузки заготовки.

Расчётная мощность трансформатора (кВ×А) для продолжительного режима его работы:

$$P_{TP} = P_{y.T} \sqrt{\xi}. \quad (6.37)$$

Среднее за период нагрева напряжение (В) на заготовке:

$$\bar{U} = 70,7 \frac{l}{\sqrt{\tau}}, \quad (6.38)$$

где  $l$  — длина нагреваемой заготовки (расстояние между контактными зажимами), м;  $\tau$  — время нагрева, с;  $\eta$  — общий КПД.

Средний за период нагрева ток (А), протекающий через нагреваемую заготовку:

$$I = \frac{\eta P_a}{U}. \quad (6.39)$$

Удельный расход электроэнергии при нагреве заготовки в зависимости от соотношения её размеров  $\frac{l}{d^2}$  можно определить по графику на рис. 6.11.

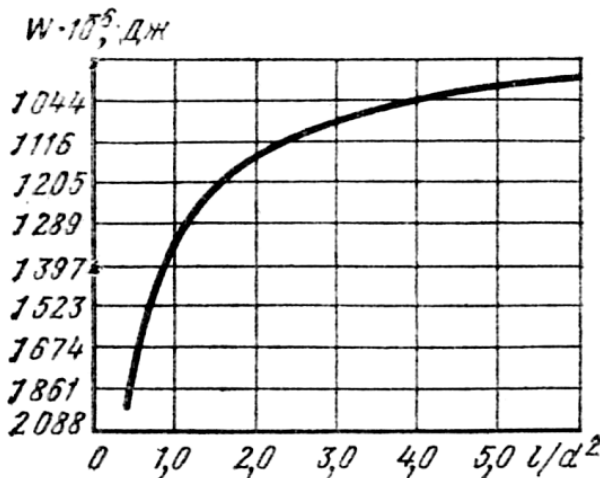


Рис. 6.11. Зависимость удельного расхода электроэнергии при нагреве тонны заготовок методом сопротивления в зависимости от соотношения  $\frac{l}{d^2}$  заготовки



Часто на практике возникает необходимость быстро выполнить ориентировочный прикидочный расчет энергетических параметров электроконтактной установки для нагрева круглых стальных заготовок до ковочных температур. В этом случае можно пользоваться данными табл. 6.2, в которой приведена мощность, необходимая для нагрева заготовок длиной 0,1 м в зависимости от диаметра и продолжительности нагрева.

Приведенные значения соответствуют теплосодержанию нагреваемых заготовок длиной 0,1 м, численно равному 21 кДж.

От продолжительности нагрева зависит вторичное напряжение питающей сети: чем больше продолжительность нагрева, тем меньше мощность, а следовательно, ниже напряжение.

Вторичное напряжение на 0,1 м длины нагреваемой заготовки в зависимости от продолжительности нагрева можно определить по табл. 6.3.

Таблица 6.2

*Мощность для нагрева (кВт) заготовок длиной 0,1 м*

Продолжительность нагрева, с	Диаметр заготовки, мм								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
6	34	76,0	122	—	—	—	—	—	—
9	22,7	57,0	81	141	—	—	—	—	—
12	17,0	38,0	61	106	153	—	—	—	—
15	13,2	30,2	48,5	98	140	183	—	—	—
18	11,3	25,4	41	70	102	138	181	—	—
21	9,9	22,0	35	52	85	117	156	195	—
27	7,5	17,0	27	47	68	92	120	153	188
36	5,7	12,7	20	36	57	69	91	115	141
54	3,8	8,5	13,5	23	34	46	60	77	95
72	2,8	6,4	10,5	17,5	25,5	35	45	57	71
90	2,3	5,7	8,1	14,0	20,3	28	36	46	56
120	1,7	3,8	6,1	10,6	15,3	21	27	34	42
180	1,1	2,5	4,1	7,0	10,2	14	18	23	28

При определении мощности и вторичного напряжения питающей сети для нагрева заготовок длиной более 100 мм найденные по табл. 6.2 и 6.3 значения необходимо умножить на поправочный коэффициент  $K_{гр}$ , приведенный в табл. 6.4.

Таблица 6.3

*Вторичное напряжение на 0,1 м длины заготовки*

Продолжительность нагрева, с	Вторичное напряжение, В	Продолжительность нагрева, с	Вторичное напряжение, В	Продолжительность нагрева, с	Вторичное напряжение, В
6	2,9	21	1,46	72	0,84
9	2,36	27	1,36	90	0,75
12	2,04	36	1,18	120	0,65
15	1,79	54	0,96	180	0,48
18	1,67				

Таблица 6.4

*Значения поправочного коэффициента  $K_D$* 

Длина заготовки, мм	Диаметр заготовки, мм								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	1,34	—	—	—	—	—	—	—	—
150	1,89	2,12	—	—	—	—	—	—	—
200	2,42	2,7	2,9	—	—	—	—	—	—
250	3,01	3,26	3,53	—	—	—	—	—	—
300	3,5	3,84	4,1	4,55	—	—	—	—	—
350	4,03	4,41	4,73	5,11	—	—	—	—	—
400	4,68	4,93	5,36	5,65	—	—	—	—	—
450	5,22	5,49	5,88	6,21	6,78	—	—	—	—
500	5,75	6,1	6,5	6,85	7,25	—	—	—	—
550	6,43	6,61	7,04	7,43	7,85	—	—	—	—
600	7,0	7,15	7,6	8,1	8,35	9,05	—	—	—
650	7,61	7,74	8,12	8,65	8,9	9,55	10,35	—	—
700	8,2	8,25	8,6	9,0	9,6	10,1	10,8	12,0	13,1
750	8,77	8,82	9,18	9,77	10,15	10,75	11,45	12,6	13,7
800	9,28	9,35	9,75	10,4	10,8	11,3	12,0	13,2	14,3

В случае нагрева заготовок из высоколегированных сталей продолжительность нагрева увеличивается на 10%, а при нагреве квадратных заготовок со стороны квадрата, равной диаметру круглой заготовки, — на 25%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предпочтительным является тот способ нагрева металла, который обеспечивает высокое качество выпускаемых поковок при наименьших затратах. Такого сочетания трудно добиться, так как выбор способа нагрева стали в кузнечно-штамповочном производстве – сложная задача. При ее решении необходим всесторонний анализ, позволяющий сопоставить технико-экономическую эффективность различных способов. Как правило, целесообразность применения того или иного способа определяется не только наличием более удобного и дешевого энергоносителя, имеющего местное значение, но и рядом других показателей: характером производства (массовое или др.), принятой технологией, угаром металла, связанным с его потерей и влиянием на точность и чистоту получаемых поковок, расходом воды для охлаждения индуктора, расходом сжатого воздуха (для толкателя и пр.), расходом электроэнергии на механизмы печи, условиями эксплуатации (сложность обслуживания, текущий ремонт и пр.) и капитальными затратами на постройку нагревательного устройства.

Технические возможности для применяемых способов нагрева не одинаковы. До настоящего времени пламенные печи вследствие их универсальности являются основными нагревательными устройствами кузнечного производства, причем из всего количества металла 60% нагревается в печах, работающих на мазуте, и 38% – в печах, работающих на газе; следовательно, в электроустановках нагревается всего 2% металла. Кроме данных способов внедряется безокислительный нагрев в печах открытого пламени.

Расход топлива или электроэнергии на тонну стальных заготовок при различных способах нагрева:

- |   |                          |
|---|--------------------------|
| 1) пламенный нагрев с газом ( $Q = 7000\div 7500$ ккал/м <sup>3</sup> ) | 150–180 м <sup>3</sup> ; |
| 2) пламенный с мазутом  | 110–120 кг;              |
| 3) безокислительный нагрев в печах открытого пламени                    | 125–150 м <sup>3</sup> ; |
| 4) индукционный электронагрев   | 450–500 кВт×ч;           |
| 5) контактный электронагрев   | 300–350 кВт×ч;           |
| б) в электрических печах сопротивления                                  | 1300 кВт×ч.              |

При большой номенклатуре заготовок (заготовок разного диаметра и длины), нагреваемых в одном индукторе, расход электроэнергии резко возрастает до 650 кВт×ч и больше.

Наименьшая стоимость достигается при безокислительном нагреве в печах открытого пламени, главным образом за счет снижения потери металла на угар и затрат на штампы вследствие повышения их стойкости.

Самым дорогим является контактный нагрев, так как при нем резко повышается расход на штампы вследствие недостаточного прогрева концов заготовок.

Наименьшие капитальные затраты при обычном пламенном нагреве, а наибольшие – при электронагреве. Например, индукционный нагрев требует в 3 раза больших вложений, чем обычный пламенный, и в 2 раза больших по сравнению с безокислительным нагревом в печах открытого пламени.

# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

## Введение

1. Назначение нагрева металла перед штамповкой.
2. Какова роль нагревательных устройств в КШП?
3. Преимущества и недостатки электрических способов нагрева металла.

## 1. Современное состояние электронагрева стали перед объемной штамповкой

1. Каковы требования к процессу нагрева стали перед ОМД?
2. Перспективы развития теории и способов нагрева заготовок и слитков перед ОМД.
3. Классификация видов электронагрева стали и нагревательных установок, применяемых при горячей штамповке.

## 2. Анализ индукционного способа нагрева

1. Область применения индукционного нагрева.
2. В чем сущность способа индукционного нагрева?
3. В чем заключается поверхностный эффект?
4. Различие между ферромагнетиками и парамагнетиками.
5. Зависимость магнитной проницаемости от температуры нагрева стали.
6. Зависимость КПД индуктора от частоты тока.
7. В чем сущность ускоренного и обычного режимов нагрева на индукционных установках?
8. Как выбираются преобразователи частоты для индукционного нагрева?
9. Зависимость температуры от времени нагрева заготовок.
10. Преимущества ускоренного режима нагрева.
11. Какое оборудование применяется для индукционных установок?
12. Виды и устройство индукторов.
13. Каково назначение конденсаторной батареи?
14. Что входит в комплект измерительных приборов?
15. Виды высокочастотных трансформаторов.
16. Виды токопроводов.
17. Механизмы для подачи заготовок в индуктор и извлечения их после нагрева.
18. Как осуществляется автоматическое управление работой индукционных нагревателей?

19. Какие источники питания применяются для индукционных установок?
20. Электрические схемы установок индукционного нагрева.
21. Классификация индукционных нагревателей по режиму нагрева.
22. Достоинства и недостатки индукционного способа нагрева.

### **3. Анализ электроконтактного способа нагрева**

1. Какова область применения электроконтактного нагрева?
2. В чем сущность электроконтактного нагрева?
3. Какие явления сопровождают прохождение переменного тока через заготовку?
4. В чем особенности прохождения электрического тока через систему *контакт-заготовка*?
5. Характер неравномерности распределения температуры по нагреваемой заготовке.
6. Какими параметрами характеризуется электроконтактный нагрев стали?
7. Какие способы совмещения электронагрева и деформации применяются при ОМД?
8. Основные узлы установки электроконтактного нагрева.
9. Какие силовые трансформаторы применяются в установках электроконтактного нагрева?
10. Устройство и назначение зажимных контактных головок.
11. Типы токоподводящих контактов.
12. Какая аппаратура управления и автоматизации применяется в электроконтактных установках?
13. Что представляет собой система разводки сжатого воздуха и воды?
14. Достоинства и недостатки электроконтактного способа нагрева.

### **4. Выбор способа электронагрева стали**

Как определяется целесообразность применения индукционного или электроконтактного способа нагрева стали?

### **5. Методы расчета индукционных установок**

1. Содержание расчета по методу **М.А. Касенкова**.
2. Как выбирается тип генератора?
3. Как определяется внутренний диаметр спирали индуктора?
4. Как рассчитывается длина индуктора?
5. Как определяется число витков индуктора?

6. Определение мощности.
7. Определение размеров трубки спирали индуктора.
8. Как определяются мощность конденсаторной батареи и число банок конденсатора?
9. В чем заключаются особенности расчета индуктора для нагрева заготовок квадратного сечения?
10. Как осуществляется проверка возможности использования рассчитанного индуктора для нагрева заготовок меньшего сечения?
11. Выбор основных параметров и оборудования по методу

### **К.З. Шепеляковского.**

12. В чем сущность метода **С.В. Сельского** и **З.Г. Унаняна**?

#### **6. Методы расчета электроконтактных установок**

1. В чем сущность метода **М.А. Касенкова**?
2. Как определяется продолжительность нагрева заготовок?
3. Определение КПД.
4. Конструкция и подбор силового трансформатора.
5. Выбор основных параметров нагрева и оборудования по методу **К.З. Шепеляковского**:
  - 1) сила тока и мощность, выделяющаяся в заготовке;
  - 2) выбор мощности трансформатора;
  - 3) выбор давления на контакты;
  - 4) время нагрева заготовок до ковочной температуры;
  - 5) расчетные параметры трансформатора.
6. Выбор и расчет основных параметров процесса и оборудования по методу **С.В. Сельского** и **З.Г. Унаняна**.

#### **Заключение**

Как определяется предпочтительный способ нагрева?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касенков, М.А. Нагревательные устройства кузнечного производства / М.А. Касенков. – М. : Машиностроение, 1962. – 472 с.
2. Шепеляковский, К.З. Ковка и объёмная штамповка стали : справочник : в 2 т. / К.З. Шепеляковский ; под ред. М.В. Сторожева. – М. : Машиностроение, 1976. – Т. 1. – 435 с.
3. Сельский, С.В. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. / С.В. Сельский, З.Г. Унанян ; под ред. Е.И. Семёнова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 568 с.
4. Охрименко, Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я.М. Охрименко. – М. : Машиностроение, 1976. – 435 с.
5. Телегин, А.С. Теплотехника и нагревательные устройства / А.С. Телегин, В.Г. Авдеева. – М. : Машиностроение, 1985. – 248 с.
6. Ключко, С.Л. Нагрев и нагревательные устройства : в 2 ч. / С.Л. Ключко. – Тольятти : ТГУ, 2007. – Ч. 2. – 105 с.



# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА СТАЛИ ПЕРЕД ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКОЙ .....	6
1.1. Требования к процессу нагрева стали перед обработкой металлов давлением (ОМД) .....	6
1.2. Перспективы развития теории и способов нагрева заготовок и слитков перед ОМД .....	6
1.3. Классификация видов электронагрева стали и нагревательных установок, применяемых в ОМД, в частности, при горячей объёмной штамповке .....	7
1.4. Методы расчёта установок для электроконтактного и индукционного нагрева .....	9
2. АНАЛИЗ ИНДУКЦИОННОГО СПОСОБА НАГРЕВА .....	10
2.1. Область применения .....	10
2.2. Сущность способа .....	10
2.3. Теоретические основы .....	11
2.4. Режимы нагрева .....	12
2.5. Оборудование для индукционного нагрева .....	17
2.5.1. Индуктор .....	18
2.5.2. Конденсаторная батарея .....	22
2.5.3. Комплект измерительных приборов .....	25
2.5.4. Высокочастотные трансформаторы и токопроводы .....	26
2.5.5. Механизмы подачи заготовок в индуктор и извлечения их после нагрева .....	30
2.6. Автоматическое управление работой индукционных нагревателей .....	33
2.7. Источники питания установок индукционного нагрева .....	35
2.8. Электрические схемы установок индукционного нагрева .....	36
2.9. Классификация индукционных нагревателей по режиму нагрева .....	39
2.10. Достоинства и недостатки индукционного способа нагрева .....	43

3. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПОСОБА НАГРЕВА .....	44
3.1. Область применения .....	44
3.2. Сущность электроконтактного нагрева .....	45
3.3. Теоретические основы способа .....	46
3.3.1. Прохождение переменного тока через нагреваемую заготовку .....	46
3.3.2. Прохождение электрического тока через систему «контакт–заготовка» .....	49
3.3.3. Распределение температур по сечению и длине заготовки при контактном нагреве .....	52
3.4. Параметры нагрева стали .....	56
3.5. Совмещение электронагрева и деформации .....	58
3.6. Оборудование для электроконтактного нагрева .....	60
3.7. Аппаратура управления и автоматизации .....	65
3.8. Система разводки сжатого воздуха и воды .....	67
3.9. Достоинства и недостатки электроконтактного нагрева .....	68
4. ВЫБОР СПОСОБА ЭЛЕКТРОНАГРЕВА СТАЛИ .....	69
5. МЕТОДЫ РАСЧЁТА ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК .....	70
5.1. Метод М.А. Касенкова .....	70
5.1.1. Содержание расчета .....	70
5.1.2. Выбор типа генератора .....	70
5.1.3. Внутренний диаметр спирали индуктора .....	73
5.1.4. Длина индуктора .....	74
5.1.5. Число витков индуктора .....	76
5.1.6. Определение мощности .....	79
5.1.7. Размеры трубки спирали индуктора .....	80
5.1.8. Реактивная мощность конденсаторной батареи и число банок конденсатора .....	82
5.1.9. Особенности расчета индуктора для нагрева заготовок квадратного сечения .....	82
5.1.10. Проверка возможности использования рассчитанного индуктора для нагрева заготовок меньшего сечения .....	83
5.2. Метод К.З. Шепеляковского .....	85
5.3. Метод С.В. Сельского и З.Г. Унаняна .....	91

6. МЕТОДЫ РАСЧЁТА	
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ УСТАНОВОК .....	95
6.1. Метод М.А. Касенкова .....	95
6.1.1. Продолжительность нагрева заготовок .....	95
6.1.2. КПД установок контактного электронагрева .....	98
6.1.3. Силовой трансформатор .....	99
6.2. Метод К.З. Шепеляковского .....	103
6.3. Метод С.В. Сельского и З.Г. Унаняна .....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	114
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ .....	116
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	119

Учебное издание

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВОК  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА СТАЛИ

Учебное пособие

Составитель

*Ключко Светлана Леонидовна*

Редактор *Е.Ю. Жданова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Компьютерная верстка: *И.И. Шишкина*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 02.10.2012. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 7,15.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-65-11.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

