

УДК 621.365 (075.6)

БОГДАНОВ В. Н. и РЫСКИН С. Е.

Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности.
М.—Л., изд. «Машиностроение», 1965, 96 стр. с илл.

В серии брошюр «Библиотечка высокочастотника-термиста» излагаются последние достижения Советского Союза в области высокочастотного нагрева и освещается опыт работы Всесоюзного научно-исследовательского института токов высокой частоты имени В. П. Вологодина, а также обобщается зарубежный опыт в этой области.

Цель Библиотечки — содействовать широкому внедрению высокочастотного нагрева и обмену передовым производственным опытом.

Библиотечка рассчитана на технический персонал, использующий высокочастотный нагрев в промышленности.

Полный перечень брошюр Библиотечки публикуется в конце каждого выпуска.

В брошюре рассмотрены принципы работы, конструкции и схемы питания индукционных нагревательных устройств для кузнечного, прокатного и других производств. Приведен расчет нагревательного устройства. Даны рекомендации по выбору частоты и режимов нагрева металла с различными профилями и размерами сечения.

Рецензент д-р техн. наук, проф. А. В. Донской

ПРЕДИСЛОВИЕ

За время, истекшее с момента выхода в свет второго издания Библиотечки высокочастотника-термиста, объем промышленного применения сквозного индукционного нагрева сильно увеличился. В течение этого периода в кузнечных цехах большого числа заводов печной нагрев заменен индукционным. Построено и строится несколько новых цехов, в которых нагрев осуществляется только с помощью токов высокой частоты. Мощность высокочастотных установок в некоторых цехах уже превышает 10 тысяч киловатт. В прокатном производстве также значительно увеличилось число установок для индукционного нагрева и их мощность. Например, запущен в эксплуатацию нагреватель мощностью 12 000 квт высокой частоты в линии трубопрокатного агрегата 30—102.

Появились новые технологические процессы, в которых индукционный нагрев начал с успехом применяться. Такими процессами являются разрезка труб на мерные длины, рекристаллизационный отжиг стали, рубка сортового проката и др.

Всесоюзный научно-исследовательский институт токов высокой частоты им. В. П. Вологодина и другие организации продолжают работать в области усовершенствования аппаратуры для индукционного нагрева металлов. Ознакомление широкого круга работников промышленности с опытом, накопленным в институте, будет способствовать дальнейшему распространению сквозного индукционного нагрева.

В настоящем, третьем издании, брошюры делается попытка систематического описания методов нагрева и нагревательных устройств, разработанных и освоенных в нашей промышленности.

ВВЕДЕНИЕ

Экономическая целесообразность индукционной поверхностной закалки почти никогда не подвергалась сомнению. В большинстве случаев технико-экономические результаты, получающиеся при ее применении, недостижимы никакими иными способами термообработки.

Сквозной индукционный нагрев начал широко применяться в промышленности СССР начиная с 1947 года. Однако целесообразность его использования часто оспаривают сторонники других методов нагрева.

Если различные способы нагрева сравнивать по стоимости энергоносителя на тонну нагреваемого металла, то индукционный нагрев оказывается менее выгодным, чем нагрев в электрических печах сопротивления, газовых или мазутных. Капитальные затраты при индукционном нагреве также в большинстве случаев более высокие. И все же объем промышленного использования индукционного нагрева непрерывно растет. Это объясняется тем, что уже при работе первых установок выявились весьма существенные технологические и эксплуатационные достоинства нового метода нагрева, часто полностью компенсирующие вышеуказанные недостатки его. Так, при нагреве легированных сталей только экономия за счет уменьшения образования окалины делает индукционный нагрев более выгодным, чем нагрев в пламенных печах.

Большая скорость нагрева, легкость автоматизации и дозирования его, малые габариты нагревательных устройств позволяют легко встраивать их в линии непрерывных прокатных станков и других автоматизированных агрегатов. Эти технологические особенности позволили не только успешно применять индукционный нагрев вместо печного, но также дали возможность

создать некоторые новые технологические процессы, например, разрыв труб на мерные длины в линиях трубо-электросварочных станков, которые вообще невозможно осуществить при других способах нагрева.

В связи с непрерывным проникновением индукционного нагрева в новые технологические процессы и увеличением объема его использования, растет выпуск высокочастотного оборудования, что неизбежно должно привести к уменьшению его стоимости, а следовательно, к сокращению капитальных затрат.

Увеличение производства электроэнергии сделает ее более дешевой. Таким образом, высокая себестоимость индукционного нагрева не будет больше препятствовать его распространению. Будет расти его роль как средства совершенствования процессов производства в нашей промышленности.

I. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ МЕТАЛЛА

I. ОСНОВЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

При прохождении по проводнику переменного тока около него создается переменное электромагнитное поле. В куске металла, помещенном в это поле, индуцируются токи, частота которых совпадает с частотой первичного тока. Прохождение индуцированного электрического тока вызывает нагрев металла. Нагрев металла описанным способом называется индукционным, а проводник, по которому пропускается электрический ток, — индуктирующим проводом. Индуктирующий провод может быть изготовлен из любого хорошо проводящего материала и ему может быть придана любая форма. Чаще всего он навивается из прямоугольных медных трубок в виде цилиндрических спиралей. Внутри спирали устанавливается нагреваемая заготовка. Для уменьшения тепловых потерь между индуктирующим проводом и заготовкой помещается изоляция из шамота или других жароупорных, теплоизоляционных материалов. Для отвода тепла, выделяющегося при прохождении тока, по медной трубке, образующей индуктирующий провод, пропускается вода. Индуктирующий провод, жароупорная футеровка, шланги, через которые подается вода, изоляционные бруски для крепления индуктирующего провода, контактные пластины, припаянные к нему и служащие для подвода тока, объединяются в единое устройство, называемое индуктором (рис. 1).

Переменный ток как в индуктирующем проводе, так и в нагреваемом металле распределяется по сечению неравномерно, плотность тока имеет наибольшее значение на поверхности проводника и спадает к его сердцевине по экспоненциальному закону. Для простоты

решения задач индукционного нагрева металлов условно принято считать, что переменный электрический ток протекает лишь в некотором определенном поверхностном слое, а в сердцевине проводника тока нет вообще.

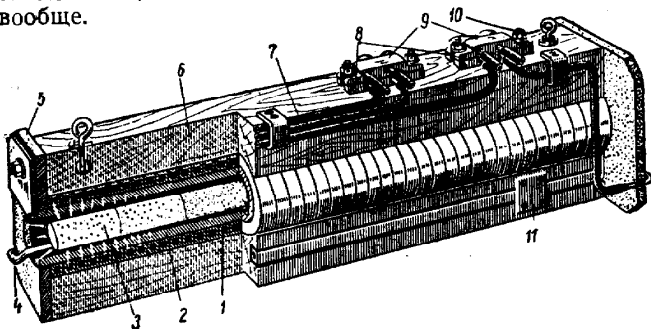


Рис. 1. Индуктор для нагрева цилиндрических заготовок:

1 — индуктирующий провод — спираль из прямоугольной медной трубки; 2 — тепловая изоляция из шамотных втулок; 3 — нагреваемые заготовки; 4 — трубчатые охлаждаемые водой направляющие, поддерживающие заготовки; 5 — плита из асбестоцемента. К плите присоединены бруски 6; 6 — бруски, на которые опирается индуктирующий провод 1; 7 — шланги для подачи воды в индуктирующий провод 1 и направляющие 4; 8 — колодки на индукторе, с которыми соединены шланги 7; 9 — колодки, к которым с помощью шлангов подается вода из системы водоснабжения; 10 — накладные болты для соединения между собой колодок 8 и 9; 11 — контактная пластина.

Толщина слоя, по которому проходит ток, называется глубиной проникновения тока и определяется по следующей формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \text{ м}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$;

f — частота тока, Гц ;

μ — магнитная проницаемость, Гн/м ;

γ — удельная электропроводность материала, $1/\text{ом}$.

Все материалы и сплавы по магнитным свойствам можно разбить на две группы:

1) ферромагнитные металлы и сплавы, т. е. имеющие магнитную проницаемость значительно большую, чем магнитная проницаемость вакуума;

2) парамагнитные металлы и сплавы, имеющие магнитную проницаемость, близкую к магнитной проницаемости вакуума.

8

К первой группе относятся углеродистые стали, железо, никель и кобальт, во второй — жароупорные и нержавеющие стали, латунь, алюминий, мельхиор и др.

В процессе нагрева диамагнитных и парамагнитных металлов и сплавов изменяется лишь их удельная электропроводность, магнитная же проницаемость остается практически неизменной. Ввиду этого глубина проникновения тока при нагреве диамагнитных и парамагнитных металлов и сплавов увеличивается незначительно лишь вследствие уменьшения электропроводности материала.

В процессе нагрева ферромагнитных металлов и сплавов наряду с уменьшением удельной электропроводности уменьшается и их магнитная проницаемость.

При достижении нагреваемым металлом определенной температуры значение магнитной проницаемости падает до величины магнитной проницаемости вакуума, что ведет к резкому увеличению глубины проникновения тока. Эта температура называется температурой магнитных превращений или критической точкой. Поэтому различают глубину проникновения тока в сталь, нагретую ниже температуры магнитных превращений, и глубину проникновения в сталь, нагретую выше температуры магнитных превращений («горячая» глубина проникновения тока).

В расчетах индукционных нагревательных устройств необходимо использовать значения глубины проникновения тока в медь индуктора, температура которой при нагреве заготовок достигает $40-60^\circ\text{C}$, и глубины проникновения тока в сталь, нагретую до температуры $1000-1200^\circ\text{C}$.

Эти значения соответственно равны:

$$\Delta_1 = \frac{0,07}{\sqrt{f}} \text{ м}; \quad (2)$$

$$\Delta_2 = \frac{0,60}{\sqrt{f}} \text{ м}. \quad (3)$$

Установка для индукционного нагрева кроме индуктора включает в себя также и другие элементы, о них будет сказано подробнее в п. 4. Однако индуктор является основным, так как посредством индуктора

9

происходит преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую.

Если в индукторе находится одна заготовка, длина ее для обеспечения равномерного нагрева концов и середины должна быть несколько меньше длины индуктора. После подключения такого индуктора к источнику токов высокой частоты (ТВЧ), например машинному высокочастотному генератору, начинается процесс нагрева, режим которого непрерывно меняется вместе с изменением физических свойств заготовки. После достижения заготовкой требуемой температуры нагрев выключается. Заготовка выдвигается из индуктора для последующей обработки. Такой способ нагрева называется периодическим. Применяется также другой способ нагрева, когда в индукторе одновременно находится несколько заготовок. В индуктор через определенные интервалы времени подается очередная заготовка. При этом из него выталкивается заготовка, нагретая до заданной температуры. Если одновременно в индукторе находится достаточно большое число заготовок, режим работы такого индуктора при постоянстве напряжения на нем практически можно считать постоянным. Выключение нагрева в момент подачи в индуктор новой заготовки не производится. Этот способ нагрева называется методическим. Соображения, которыми следует руководствоваться при выборе способа нагрева, будут изложены ниже.

2. ВЫБОР ЧАСТОТЫ ТОКА

Эффективность использования сквозного индукционного нагрева в большинстве случаев определяется главным образом его технологическими преимуществами. Стоимость индукционного нагрева пока еще выше стоимости нагрева в электрических печах сопротивления и пламенных. Однако все же во всех случаях практики где необходим нагрев металла, следует осуществлять индукционный нагрев с минимальным расходом электроэнергии. Для этого все непроизводительные потери электроэнергии необходимо свести к минимуму. К непроизводительным потерям можно отнести:

1) потери при преобразовании посредством индуктора электрической энергии в тепловую;

2) потери на нагрев токоведущих элементов, передающих энергию от источника тока высокой частоты к индуктору;

3) потери, вызванные холостыми пробегами высокочастотных машинных генераторов. Эти потери могут иметь место в том случае, когда машинные генераторы используются в качестве источника ТВЧ.

Вопросы правильного использования высокочастотных генераторов и рационального конструирования токопроводов рассматриваются в выпуске № 10 настоящей серии. Поэтому здесь анализируются только источники потерь, связанные с энергетическими процессами, проходящими в индукторе. Как показано ниже, эффективность этих процессов определяется главным образом правильным выбором частоты тока и режима нагрева.

В настоящее время индукционным способом нагреваются тела различной формы: призматические, с круглым, прямоугольным и квадратным поперечным сечением (трубы, ленты, листы, кольца). Для тел каждой формы разработана специальная методика выбора частоты тока и режима нагрева.

Круглые цилиндрические заготовки. Индуктируемый ток протекает в поверхностных слоях заготовки, повышение температуры сердцевины происходит за счет теплопроводности. Если к заготовке подведена достаточно большая мощность, температура на поверхности в пределах горячей глубины проникновения тока очень быстро может быть доведена до заданной. Обычно стальные заготовки перед ковкой и прокаткой необходимо нагревать до 1200°С.

Во избежание окисления поверхности и ухудшения структуры металла в процессе нагрева не допускается значительного превышения заданной температуры. Поэтому после достижения поверхностным слоем заданной температуры, мощность, подводимая к заготовке, должна постепенно уменьшаться. Она определяется теперь только скоростью передачи тепла от поверхности к сердцевине и интенсивностью излучения с поверхности заготовки в окружающее пространство. При постоянстве температуры мощность излучения остается постоянной. По мере роста температуры сердцевинной скорость передачи тепла от поверхности к сердцевине уменьшается.

В связи с последним явлением для полного выравнивания температуры сердцевин и поверхности требуется длительное время. Практически нагрев прекращают, когда перепад температуры между поверхностью и сердцевиной составляет $100-150^{\circ}\text{C}$. Время, необходимое для нагрева заготовки с заданным перепадом температуры, называется *временем нагрева*.

В процессе передачи заготовки для последующей обработки температура поверхности вследствие отдачи тепла в окружающую среду и сердцевину падает, а температура сердцевин растет. Таким образом происходит окончательное выравнивание температуры. Электрическая энергия, подводимая к индуктору, частично передается в нагреваемую заготовку, частично расходуется на нагревание индуктирующего провода. Отношение энергии, передаваемой в заготовку, ко всей энергии, подводимой к индуктору, называется электрическим к. п. д. индуктора.

Энергия, переданная в заготовку, частично расходуется на повышение ее температуры, частично излучением и конвекцией рассеивается в окружающем пространстве. Отношение энергии, израсходованной на повышение температуры заготовки, ко всей энергии, переданной в нее из индуктора, называется термическим к. п. д. индуктора. Отношение энергии, затраченной на повышение температуры заготовки, ко всей энергии, подведенной к индуктору, называется полным к. п. д. индуктора. Полный к. п. д. индуктора равен произведению электрического и термического к. п. д.

Электрический к. п. д. растет с увеличением частоты и достигает предельного значения, когда отношение диаметра нагреваемой заготовки к горячей глубине проникновения тока равно десяти.

Термический к. п. д. тем выше, чем меньше потери тепла вследствие рассеивания энергии с поверхности заготовки. Эти потери пропорциональны средней во времени температуре на поверхности, ее площади, а также времени нагрева.

Режим нагрева, при котором температура на поверхности в пределах горячей глубины проникновения тока быстро поднимается до заданной, а затем сохраняется постоянной, называется *нагревом при постоянной температуре*.

При той же частоте тока можно мощность подобрать таким образом, чтобы температура поверхности и сердцевин, постепенно поднимаясь, одновременно достигала заданных значений. Ввиду того, что такой режим нагрева используется чаще, чем нагрев при постоянной температуре, его принято называть *обычным нагревом*.

Нагрев при постоянной температуре позволяет нагревать заготовку за минимальное время. Большой градиент температуры обеспечивает быструю передачу тепла от поверхности к сердцевине. Поэтому среди всех возможных режимов нагрева током данной частоты режим при постоянной температуре будет иметь самый высокий термический к. п. д. Однако уменьшая частоту, можно увеличить горячую глубину проникновения тока. При этом меньший объем металла будет нагреваться за счет теплопроводности. Время нагрева уменьшится, а следовательно, термический к. п. д. возрастет. Это показывает, что величина термического к. п. д. также зависит от отношения диаметра нагреваемой заготовки к горячей глубине проникновения тока. Чем больше это отношение, тем термический к. п. д. меньше.

Таким образом, при увеличении отношения диаметра нагреваемой заготовки к «горячей» глубине проникновения электрический к. п. д. возрастает, а термический к. п. д. падает. Это обстоятельство позволяет для каждого диаметра заготовки установить полосу частот тока, в пределах которой полный к. п. д., равный произведению электрического и термического коэффициентов полезного действия, имеет достаточно высокое значение.

Нагрев заготовок в этом случае будет осуществляться с потерями в допустимых пределах.

При обычном индукционном нагреве к. п. д. будет достаточно высоким, если отношение диаметра нагреваемой заготовки к «горячей» глубине проникновения тока лежит в пределах от 3,5 до 5,0. В отдельных случаях, когда нежелательно вводить дополнительную частоту тока, диапазон нагреваемых диаметров может быть расширен.

Диаметры заготовок, для индукционного нагрева которых могут быть использованы стандартные частоты тока, указаны в табл. 1.

При индукционном нагреве с постоянной температурой на поверхности, вследствие наличия большего градиента температуры и меньшего времени нагрева, можно допустить использование каждой из частот тока для нагрева заготовок большего диаметра.

Таблица 1

Диаметры заготовок, для индукционного нагрева которых могут быть использованы стандартные частоты тока, при „обычном“ нагреве

Частота тока, гц	50	500	1000	2500	8000	Радиочастота
Диаметры заготовок, мм рекомендуемые	250 и более	95—135	65—95	40—60	25—35	20 и менее
допустимые	150 и более	70—160	50—120	30—80	15—40	20 и менее

Пределы целесообразного использования каждой из стандартных частот тока при нагреве с постоянной температурой на поверхности указаны в табл. 2.

Таблица 2

Диаметры заготовок, для индукционного нагрева которых с постоянной температурой на поверхности могут быть использованы стандартные частоты тока

Частота тока, гц	50	500	1000	2500	8000	Радиочастота
Диаметры заготовок, мм рекомендуемые	250 и более	95—200	65—150	40—100	25—60	30 и менее
допустимые	150 и более	70—250	50—180	30—120	15—70	30 и менее

Как видно из таблиц, каждую заготовку можно нагревать током двух и даже трех смежных частот. Это обстоятельство позволяет сводить к минимуму число различных частот в цеху. Необходимо отметить, что с понижением частоты упрощается передача тока на большие расстояния.

Стоимость высокочастотных генераторов уменьшается, а к. п. д. их растет. Уменьшаются потери в то-

копроводах. Поэтому всегда следует стремиться использовать самую низкую из частот, которая рекомендуется табл. 1 и 2.

Энергетическую эффективность индукционного нагрева можно повысить также применением тока двух частот. Так как глубина проникновения тока 50 гц до температуры магнитных превращений (768°С) не превышает 10 мм, электрический к. п. д. нагрева заготовок диаметром более 50 мм протекает на частоте 50 гц до температуры 768°С при достаточно высоком электрическом, а следовательно, и полном к. п. д. Так как при преобразовании частоты 50 гц в более высокие частоты расходуется до 15% дополнительной энергии, нагрев заготовок в рассматриваемом диапазоне температур на частоте 50 гц более выгоден, чем на высоких частотах. Дальнейший нагрев до температуры 1100—1200°С, как это требуется для последующих пластических деформаций, может осуществляться током частотой, выбираемой в соответствии с табл. 1 и 2.

При использовании токов двух частот сокращаются капитальные затраты, что особенно важно при создании нагревательных устройств большой мощности. Однако по поводу вышеизложенных соображений необходимо сделать несколько замечаний.

При выборе частоты кроме энергетических (экономических) необходимо учитывать также и другие технико-экономические соображения. Для удобства эксплуатации желательно в цехе иметь более двух различных частот, так как при этом потребуется большое разнообразие запасной аппаратуры и оборудования, усложнится обслуживание и наладка нагревателей. Поэтому частоту выбирают обычно по заготовкам, которые являются преобладающими по тоннажу. Для остальных заготовок приходится мириться с нагревом при меньших к. п. д.

При выборе частоты следует также учитывать, что в настоящее время машинные генераторы гораздо надежнее в эксплуатации, чем ламповые. Они проще в наладке и обслуживании. Передача токов звуковой частоты может легко осуществляться на расстоянии до 500 м.

Ламповые же генераторы должны устанавливаться в непосредственной близости от нагревательного

устройства. Их не рекомендуется устанавливать в таких цехах, как кузнечные, где возможны сильные сотрясения почвы и повышенная запыленность воздуха.

Усложнение устройства, связанное с нагревом на двух частотах — 50 гц и повышенной, оправдывается при небольшой номенклатуре заготовок, проходящих сквозь нагреватель, так как цель будет достигнута только в том случае, если при переналадке нагрев на обеих частотах будет осуществляться в оптимальных режимах. Осуществление же оптимальных режимов для обеих частот при частых переналадках весьма затруднено.

Применение двух частот может оказаться рациональным иногда в связи с технологическими особенностями процесса.

Так, эксперименты, проведенные во ВНИИ ТВЧ, показывают, что двухчастотный нагрев целесообразно применять при нагреве концов штанг дляковки на горизонтальноковочных машинах в том случае, если у нагреваемого конца отковывается несколько заготовок, а затем оставшийся пруток подвергается новому нагреву и т. д., пока вся штанга не будет откована. Подробнее об этом сказано в п. II.

Квадратные и прямоугольные заготовки. При выборе частоты тока для нагрева квадратных и прямоугольных заготовок также можно пользоваться табл. 1 и 2. При нагреве заготовок прямоугольного сечения можно располагать их в индукторе двумя способами. Так, как показано на рис. 2, а, когда магнитный поток проходит вдоль заготовки и как на рис. 2, б, при расположении ширины заготовки перпендикулярно направлению магнитного потока индуктора. В первом случае расчетным размером, определяющим выбор частоты (в табл. 1 и 2 «диаметр заготовок»), является толщина полосы, а во втором ее ширина.

Как видно из таблиц, во втором случае возможно применение более низких частот. Квадратные и круглые заготовки также можно нагревать в поперечном магнитном поле, как это показано на рис. 2, а и б. Однако в этом случае частота тока остается неизменной.

Время нагрева круглых и квадратных заготовок при одинаковой плотности тока и при нагреве в попереч-

ном поле получается в 1,5—2,0 раза больше, чем при нагреве в продольном поле. В этом случае значительная часть поверхности заготовок не обтекается током. Еще больше растет время нагрева при нагреве прямоугольных заготовок в поперечном магнитном поле, так как в этом случае индуктированный ток протекает только по узкой боковой поверхности заготовки.

Металлическая лента и листы. Индукционный нагрев металлической ленты может быть успешно использован

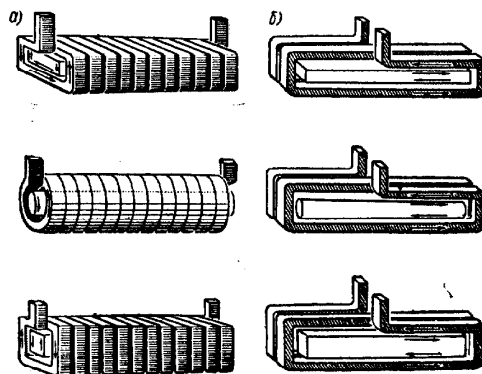


Рис. 2. Схемы нагрева прямоугольных, круглых и квадратных заготовок: а — в продольном, б — в поперечном магнитном поле.

Стрелками показано мгновенное направление тока в индуктирующем проводе и нагреваемых заготовках.

при проведении ряда важных технологических процессов. С помощью индукционного нагрева производится сушка защитного покрытия, исключающего сваривание и окисление при термической обработке рулонов трансформаторной стали в колпаковых печах. Проектируются установки для сушки лаковых покрытий при изготовлении жести, для нанесения пластмассовых покрытий на металлическую ленту и ряд других.

Во всех случаях вместо пламенных печей и печей сопротивления длиной в несколько десятков метров представляется возможным использовать индукционные нагревательные устройства длиной в несколько метров. Толщина ленты и листов, подвергающихся

индукционному нагреву, лежит в большинстве случаев в пределах от 0,15 до 3,0 мм.

По специфике использования индукционного нагрева ленты и листы могут быть разбиты на три характерных группы:

- 1) ленты и листы из ферромагнитных материалов, подвергающихся нагреву до температуры ниже точки магнитных превращений;
- 2) ленты и листы из парамагнитных материалов;
- 3) ленты и листы из ферромагнитных материалов, подвергающихся нагреву до температуры выше точки магнитных превращений.

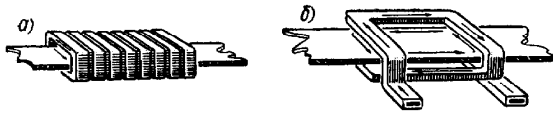


Рис. 3. Схемы нагрева ленты: а — в продольном; б — в поперечном магнитном поле. Стрелками показано мгновенное направление тока в индуктирующем приводе и нагреваемых заготовках.

Нагрев лент первой группы нужно производить с помощью индукторов с продольным магнитным полем (рис. 3, а). В этом случае лента проходит через овальную многовитковую катушку определенной длины. Индуктируемый в ленте ток замыкается в плоскости ее поперечного сечения. Коэффициент полезного действия такого индуктора будет достаточно высок, если толщина ленты будет в несколько раз больше глубины проникновения тока.

Минимальная частота тока, обеспечивающая удовлетворительный к.п.д. нагревательного устройства при наименьшей длине индукторов может быть определена из следующего соотношения:

$$f \mu_e > 0,4 \cdot 10^6 \frac{\rho}{t^2} \text{ гц}, \quad (4)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление металла, Ом;

μ_e — магнитная проницаемость материала ленты на ее поверхности;

t — толщина ленты, м.

Магнитная проницаемость ферромагнитного материала зависит от напряженности магнитного поля, в котором он находится. При индукционном нагреве ленты в продольном поле напряженность поля обычно много выше, чем 100 а/м. В таких полях магнитная проницаемость уменьшается с ростом их напряженности. Поэтому оптимальная частота увеличивается с ростом

напряженности поля. Это обстоятельство позволяет в известных пределах произвольно изменять частоту тока при нагреве ленты.



Рис. 4. Графики зависимости скорости нагрева ленты от частоты тока: а — лента толщиной 0,15 мм; б — лента толщиной 0,25 мм.

Желая понизить частоту тока, необходимо уменьшить напряженность магнитного поля. Однако при этом будет также уменьшаться удельная мощность, передаваемая в ленту. Для передачи ленте той же энергии, при данной скорости ленты, необходимо соответственно увеличить длину индукторов.

На рис. 4 представлены графики зависимости скорости нагрева ленты из ферромагнитных материалов толщиной 0,15 мм и 0,25 мм от частоты тока. Из графиков видно, что при использовании тока частотой 8000 гц для нагрева ленты толщиной 0,25 мм может быть достигнута скорость нагрева 100° С/сек. Если, например, в технологическом процессе обработки ленты

требуется нагрев до 200°C , а скорость ее движения 120 м/мин , суммарная длина индукторов должна быть равна 4 м .

При использовании тока частотой 70 кгц нагрев этой же ленты может быть осуществлен со скоростью 1250°C/сек . В этом случае длина индуктора может быть сокращена до 170 мм .

При выборе частоты тока нужно учитывать также и удобства создания высокочастотных индукционных устройств и условия эксплуатации высокочастотных генераторов. С этой точки зрения нужно отдавать предпочтение высокочастотным машинным преобразователям. Производить нагрев лент из неферромагнитных материалов с помощью индукторов с продольным магнитным полем нецелесообразно, ввиду невозможности достичь высокого значения коэффициента мощности ($\cos\phi$).

Для нагрева таких лент нужно использовать индукторы с поперечным магнитным полем (рис. 3, б). Индуцирующий провод такого индуктора образован двумя плоскими прямоугольными рамками из медной трубки, установленными на небольшом расстоянии друг от друга. Рамки расположены так, что магнитные потоки их складываются. Лента пропускается между рамками. Поэтому магнитный поток, проходящий последовательно через одну и вторую рамки, пронизывает ленту перпендикулярно ее плоскости. Индуцируемый ток замыкается в плоскости ленты. Последнее обстоятельство позволяет применять для нагрева ленты в индукторах с поперечным магнитным полем ток значительно более низкой частоты, чем при нагреве ее в продольном поле.

Частота тока, обеспечивающая нагрев лент в поперечном магнитном поле с к.п.д., близким к максимальному, может быть определена по формуле

$$f = 2 \cdot 10^6 \frac{\rho}{\tau^2} \frac{h}{t} \text{ гц}, \quad (5)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление материала ленты, $\text{ом}\cdot\text{м}$;
 t — толщина ленты, м ;
 h — воздушный зазор индуктора, мм ;
 τ — шаг индуктора, м .

Формула справедлива при отношении воздушного зазора к шагу индуктора, равном $0,25-0,5$, что чаще всего имеет место в практике.

При использовании индукторов с поперечным полем может быть достигнута скорость нагрева 5000°C/сек и более. Длина индукторов при осуществлении любого технологического процесса будет незначительной. Основной трудностью осуществления нагрева ленты в поперечном магнитном поле является достижение равномерного распределения температуры по ее ширине. Форму индуктора приходится подбирать опытным путем таким образом, чтобы в каждой точке поверхности ленты при движении сквозь индуктор выделялось одинаковое количество тепла.

Практически при нагреве непрерывной ленты удастся осуществить нагрев таким образом, чтобы температура в различных точках ее отклонялась не более чем на $\pm 5\%$ от заданной величины. При нагреве отдельных кусков ленты и листов необходимую для равномерного нагрева форму индуктора подобрать не удастся. Поэтому нагрев листов можно осуществлять только в продольном магнитном поле.

Нагрев ленты из ферромагнитных материалов до температуры выше точки магнитных превращений (3 группа, см. стр. 18) наиболее целесообразно осуществлять в комбинированном нагревательном устройстве до температуры магнитных превращений с помощью индукторов с продольным полем, а далее с помощью индукторов с поперечным магнитным полем. При создании каждого из элементов такого устройства нужно пользоваться вышензложенными рекомендациями.

Трубные заготовки. Нагрев трубных заготовок и колец осуществляется обычно в цилиндрических индукторах током высокой частоты. При выборе частоты тока для нагрева труб и колец необходимо соблюдать следующие два условия:

$$f \geq \frac{30\,000}{d^2}; \quad (6)$$

$$0,35\Delta_{20p} < a < 2\Delta_{20p}, \quad (7)$$

где d — внешний диаметр трубы, см ;
 a — толщина его стенки, см ;
 Δ_{20p} — глубина проникновения тока в горячий металл.

Если глубина проникновения $\Delta_{\text{гор}}$ значительно больше толщины стенки, для нагрева коротких труб и колец используются также индукторы с замкнутыми магнитопроводами (см. рис. 35). Индуцирующий провод наматывается на сердечник магнитопровода. Нагреваемая деталь одевается на тот же сердечник и в зависимости от ее размеров помещается или внутрь или поверх индуктирующего провода. При таком способе нагрева используются частоты более низкие, чем обусловленные уравнениями (6) и (7).

Э. д. с., индуцируемая в кольце, может быть определена по формуле

$$E = kBfS, \quad (8)$$

где B — индукция, в/м²;

f — частота, гц;

S — площадь сердечника магнитопровода, м²;

k — коэффициент пропорциональности.

Из приведенной формулы видно, что для получения достаточно большой э. д. с. в случае низкой частоты необходимо увеличивать индукцию в сердечнике и площадь его сечения.

При нагреве током промышленной частоты, индукция не должна превышать 10 000 гс. Иначе в случае непрерывной работы устройства сердечник будет сильно нагреваться. Площадь сердечника ограничена размерами отверстия в нагреваемом кольце.

Обычно установки с замкнутыми магнитопроводами используются при нагреве на промышленной частоте колец и гильз диаметром более 100 мм.

3. ВРЕМЯ НАГРЕВА

Если при данной частоте тока требуется нагреть заготовку быстро, необходимо использовать режим нагрева при постоянной температуре на поверхности.

Для осуществления такого режима в начале нагрева необходимо подвести к заготовке большую мощность, а затем, когда поверхностный слой в пределах горячей глубины проникновения достигает заданной температуры, эта мощность должна быть снижена до уровня, достаточного для поддержания в нагретом слое постоянной температуры.

Мощность, подводимая к единице поверхности при данной частоте тока, пропорциональна квадрату ампервитков, приходящихся на единицу длины индуктора¹.

Поэтому при методическом способе нагрева режим постоянной температуры на поверхности заготовки можно осуществить, разбивая индуктор на несколько секций. Секции навиваются из трубок различного поперечного сечения и отличаются поэтому друг от друга различным шагом навивки и, следовательно, числом витков на единицу длины. Длина каждой секции должна быть кратной длине заготовки. В начале индуктора, куда подаются холодные заготовки, располагаются секции с малым шагом навивки, т. е. большим числом витков на единицу длины. В последующих секциях число витков на единицу длины постепенно уменьшается. Электрически все секции соединяются последовательно, поэтому по ним протекает одинаковый ток.

Шаг навивки секции подбирается таким образом, чтобы в первой секции к заготовке подводилась большая мощность, достаточная для быстрого нагрева ее поверхности. В остальных секциях подводимая мощность уменьшается в соответствии с требованиями режима нагрева при постоянной температуре.

Для обеспечения однообразия режима нагрева для всех заготовок данной партии напряжение на индукторе и темп подачи заготовок в индуктор поддерживается постоянным.

При периодическом способе нагрева заготовка лежит в индукторе неподвижно. Число ампервитков на единицу длины индуктора может быть изменено только изменением силы тока в индукторе. Сила тока изменяется при изменении напряжения на индукторе. Поэтому при периодическом способе нагрева режим с постоянной температурой на поверхности можно осуществить с помощью системы управления, автоматически изменяющей напряжение. Эта система должна управляться фотопирометром, измеряющим температуру на поверхности заготовки. Может быть использована также система программного регулирования.

При нагреве первой заготовки, измеряя температуру поверхности термомпарой или фотопирометром, при

¹ См. Библиотечку, вып. 2.

ручном управлении, подбирают необходимый закон изменения напряжения на индукторе. Затем этот закон воспроизводится запоминающим устройством.

Время, необходимое для нагрева заготовок различного диаметра при нагреве током частотой 500, 1000, 2500, 8000 гц и радиочастоты в режиме постоянной температуры поверхности, можно определить по кривым, приведенным на рис. 5.

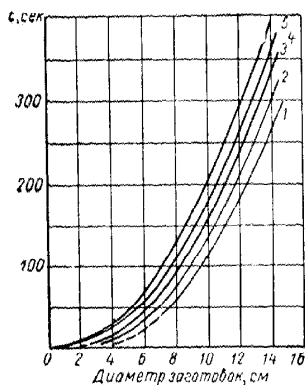


Рис. 5. Время нагрева заготовок в режиме постоянной температуры на поверхности током различной частоты в гц: 1 — 500; 2 — 1000; 3 — 2500; 4 — 8000; 5 — радиочастоты.

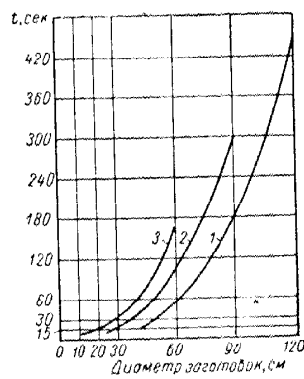


Рис. 6. Время нагрева заготовок при обычном режиме нагрева током различной частоты в гц: 1 — 1000; 2 — 2500; 3 — 8000.

В практике индукционного нагрева встречается много случаев, когда нагрев в режиме постоянной температуры не может быть использован. В некоторых материалах при большом градиенте температур образуются трещины.

Если при методическом нагреве в одном и том же индукторе требуется нагревать различные заготовки, длина секций индуктора может оказаться не кратной длине заготовки. При нагреве заготовок одинакового диаметра может потребоваться разная производительность.

Не всегда, как это будет показано ниже, при данной частоте можно осуществить индуктор для нагрева

по режиму с постоянной температурой на поверхности. Плотность тока в первых секциях индуктора может оказаться недопустимо большой. Сечение трубки, получившееся при расчете индуктора, будет мало для пропуска достаточного количества воды и т. п.

Если нагрев при постоянной температуре использован быть не может, необходимо выбрать какой-либо другой режим нагрева.

Проще всего в изготовлении и настройке для нагрева различных заготовок индукторы с постоянным шагом навивки индуктирующего провода. При методическом и периодическом способах нагрева в таких индукторах всегда удается подобрать напряжение на индукторе таким образом, чтобы температура на поверхности и в сердцевине, постепенно повышаясь, одновременно достигла заданных значений. Для получения однообразных результатов напряжение на индукторе должно поддерживаться постоянным. Такой режим нагрева, как уже указано выше, называют *обычным нагревом*.

Благодаря уменьшению градиента температуры при обычном нагреве время нагрева значительно возрастает. Оно может быть определено по графикам рис. 6.

Кривые рис. 5 и 6 построены на основании экспериментальных работ, во время которых нагревались заготовки из конструкционных углеродистых сталей. Для легированных сталей, а также цветных металлов, физические свойства которых сильно отличаются от свойств углеродистой конструкционной стали, время нагрева должно быть определено опытным путем.

После того как выбраны частота и режим нагрева и по кривым на рис. 5 или 6 определено время нагрева, выбирают способ нагрева. Соображения, которыми руководствуются при выборе способа нагрева, излагаются ниже в гл. II при описании схем нагревателей. Затем для методического способа нагрева определяют число заготовок в индукторе по формуле

$$n = \frac{t_n}{t_k}, \quad (9)$$

где t_n — время нагрева;
 t_k — заданный темп выдачи заготовок.

Длина индуктора определяется по формуле

$$l_1 = nl_2 + \Delta l, \quad (10)$$

где l_2 — длина заготовки;

Δl — дополнительная величина, на которую необходимо удлинить индуктор, чтобы первая и последняя заготовки находились достаточно далеко от концов индуктора.

При периодическом способе нагрева по формуле 9 определяется число индукторов, необходимых для обеспечения заданной производительности.

Время, необходимое в каком-либо конкретном случае для нагрева заготовок до заданной температуры поверхности при определенном перепаде температур, обычно несколько отличается от получаемого по кривым на рис. 5 и 6. Это отличие может быть связано с некоторой разницей в конструкции и размерах индуктора, а также разницей физических свойств между нагреваемой заготовкой и теми заготовками, которые нагревались при экспериментальном построении вышеуказанных кривых. Однако фактическое время будет одним и тем же для всех заготовок данной партии, если напряжение на индукторе остается постоянным или изменяется незначительно. В этом случае для управления процессом нагрева может быть установлено реле времени. По команде реле через равные интервалы заготовки могут подаваться в индуктор и извлекаться из него.

Если вследствие каких-либо причин напряжение на индукторе изменяется так, что при выдаче заготовок через равные интервалы времени изменения температуры превышают допустимые пределы, для управления процессом нагрева можно воспользоваться термопарой или фотопирометром.

Фотопирометр и термопара измеряют температуру на поверхности заготовки. Чтобы фотопирометр давал правильные показания, поверхность заготовок должна быть чистой от окалины и масла. Дым и копоть, образующиеся при горении масла, нарушают нормальную работу фотопирометра.

Термопара прижимается к поверхности заготовки специальным приспособлением. В момент удаления заготовки из индуктора термопара приподнимается. Команды на выдачу нагретых заготовок, подаваемые

фотопирометром и термопарой после измерения ими температуры поверхности автоматически изменяют темп выдачи от заготовки к заготовке и компенсируют таким образом отклонения в режиме, связанные с колебаниями напряжения на индукторе. При этом в некоторых пределах будет также изменяться перепад температуры. Поэтому колебания напряжения на индукторе при использовании термопар и фотопирометров также должны быть ограничены определенными пределами.

В случае нагрева в режиме постоянной температуры на поверхности заготовки термопара и фотопирометр должны измерять температуру в центре заготовки на ее торце. Температура в этом месте будет несколько отличаться от температуры на оси заготовки в точках удаления от торца. Однако разница температур не очень велика и, кроме того, одинакова для всех заготовок данного типа, а поэтому существенного значения для работы устройства иметь не будет.

4. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

До сих пор из всего устройства, необходимого для осуществления индукционного нагрева, мы рассматривали только индуктор. Для питания индукторов могут использоваться следующие источники:

- 1) сеть промышленной частоты 50 гц;
- 2) машинные преобразователи частоты, от которых получается ток частотой от 500 до 8000 гц;
- 3) ламповые генераторы — источники тока частотой от 70 кц до нескольких мегагерц.

Наибольшее распространение в промышленности получили установки с питанием от машинных преобразователей частоты.

На рис. 7 приведена принципиальная электрическая схема, на которой показаны все основные элементы индукционного нагревательного устройства, получающего питание от машинного преобразователя частоты. Тип источника или генератора тока высокой или повышенной частоты выбирается в соответствии с частотой и мощностью, необходимых для нагрева заготовок данной формы с заданной производительностью.

Управление режимом нагрева осуществляется с помощью электромашинного или магнитного усилителя. Включение и выключение нагрева контактором при

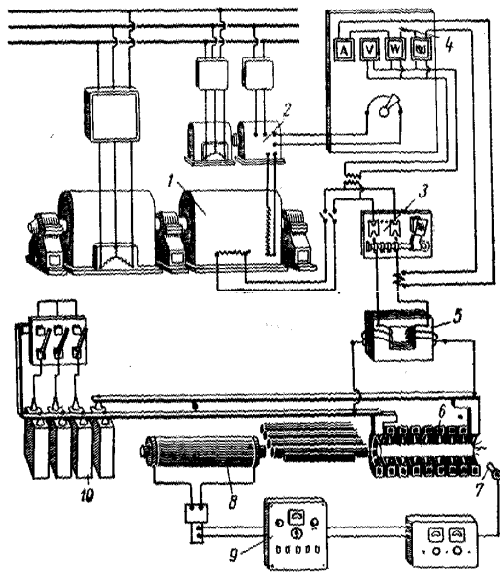


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема нагревательного устройства:

1 — машинный генератор тока высокой частоты; 2 — электромашинный усилитель, управляющий режимом нагрева; 3 — контактор для включения и выключения нагрева; 4 — шкаф с измерительными приборами и аппаратурой управления работой электромашинного усилителя; 5 — высокочастотный автотрансформатор для регулирования напряжения на индукторе; 6 — индуктор; 7 — фотопирометр и усилитель к нему; 8 — толкатель, подающий заготовки в индуктор; 9 — пульт с элементами схемы автоматического управления работой толкателя; 10 — батарея конденсаторов.

няется при параллельном питании от одного генератора нескольких нагревательных устройств.

При индивидуальном питании нагревательного устройства нагрев может включаться и отключаться как контактором, так и включением и отключением возбуждения генератора.

Для наблюдения за режимом работы устройства служит комплект измерительных приборов с трансформаторами тока и напряжения.

Для регулирования напряжения, подводимого к индуктору, и, следовательно, мощности, передаваемой в нагреваемые заготовки, служит высокочастотный автотрансформатор. Автотрансформатор устанавливается в случае централизованного питания. При индивидуальном питании единичного нагревательного устройства напряжением, подводимое к индуктору, изменяется регулированием тока возбуждения генератора. Размеры и форма индуктора определяются размерами и формой заготовки, а также требуемой производительностью устройства.

В качестве датчика для системы автоматического управления нагревом, применяется фотопирометр с усилителем.

Нагреваемые заготовки подаются в индуктор и выдаются из него для последующей обработки с помощью специального механизма.

Первые четыре элемента схемы располагаются обычно в отдельном помещении — генераторной станции. Остальные в зависимости от принятого способа компоновки собираются в одном или нескольких корпусах, устанавливаются в цеху и образуют собственно тот агрегат, который принято называть «индукционным нагревателем».

Питание нагревателей осуществляется как по индивидуальной схеме, когда один нагреватель соединен с одним или несколькими параллельно работающими преобразователями частоты, так и по централизованной схеме, когда несколько нагревателей связаны с центральной генераторной станцией.

Схемы индивидуального питания используются при установке в цехе одного нагревателя и в случаях установки нескольких нагревателей, если потребляемая каждым нагревателем мощность в процессе работы изменяется незначительно. При установке в цехе большого количества нагревателей со значительно изменяющейся потребляемой мощностью должны применяться схемы централизованного питания.

В этом случае генераторы могут быть использованы лучше. При уменьшении мощности, потребляемой

несколькими нагревателями, часть генераторов может быть остановлена. Так как обычно все нагреватели не работают одновременно с максимальной нагрузкой, общая установленная мощность генераторов может быть при централизованном питании меньше.

При индивидуальном питании режим нагрева определяется напряжением на генераторе, которое поддерживается на установленном уровне с помощью автоматического регулятора с электромашинным или магнитным усилителем. При централизованном питании напряжение на сборных шинах, к которым параллельно присоединены все генераторы, автоматически поддерживается равным номинальному напряжению генераторов.

Напряжение на каждом отдельном нагревателе а следовательно и режим его работы, устанавливается с помощью автотрансформатора.

Существуют две схемы передачи энергии от сборных шин к нагревателям при централизованном питании:

1) в цехе прокладываются один или два фидера соединенных со сборными шинами. К фидерам параллельно подключаются нагреватели;

2) к каждому из нагревателей от сборных шин прокладывается отдельный фидер.

Недостатком первого способа канализации энергии является взаимное влияние нагревателей друг на друга в процессе работы. Стабильность температуры нагреваемых заготовок в этом случае может обеспечиваться только применением фотопирометра, однако при этом перепад температуры между поверхностью и сердцевиной заготовки может отклониться от заданного. Может также измениться производительность нагревателя.

Второй способ канализации энергии свободен от этих недостатков, но связан с прокладкой большого числа линий, а следовательно с большими капитальными затратами. Несмотря на это, предпочтение нужно отдавать второму способу. Постоянство температуры заготовок в этом случае может быть обеспечено как с помощью фотопирометра, так и с помощью реле времени.

6. РАСЧЕТ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Авторами приведены схемы расчетов, наиболее часто используемые в практике проектирования [1, 2]. В настоящее время разработаны и другие схемы расчета.

В брошюре А. Е. Слухоцкого «Индукторы» (вып. 6) приведены схемы, позволяющие получить результат более коротким путем. Наибольшее распространение получили устройства для методического нагрева мерных заготовок круглого поперечного сечения в многовитковых индукторах. Поэтому ниже рассматривается методика расчета таких индукторов. Она поясняется числовым примером, взятым из практики.

1. Материал заготовок	сталь 45
2. Диаметр	$d_2 = 10 \text{ см}$
3. Длина	$l_2 = 12 \text{ см}$
4. Интервал времени, через который нужно подавать нагретые заготовки к ковочному механизму	$t_k = 20 \text{ сек}$
5. Температура поверхности нагретой заготовки	$T = 1200^\circ \text{ С}$
6. Допустимый температурный перепад по сечению заготовки	$\Delta T = 100^\circ \text{ С}$

Расчет индуктора производится сначала для обычного, а затем для нагрева в режиме постоянной температуры поверхности.

Величины, характеризующие индукционное нагревательное устройство, определяются в следующем порядке.

1. Частота выбирается в соответствии в табл. 1, $f = 1000 \text{ гц}$.
2. Время нагрева заготовок выбирается по графикам рис. 6, $t_k = 300 \text{ сек}$.
3. Напряжение на индукторе принимается $u = 750 \text{ в}$.
4. Удельное электрическое сопротивление:

меди при 40° С	$\rho_1 = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$
стали при 1200° С	$\rho_2 = 130 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$

5. Вес заготовки

$$G = \frac{\pi d^2}{4} l_2 g = \frac{\pi 10^2}{4} 12 \cdot 7,8 = 7,3 \text{ кг.}$$

6. Глубина проникновения тока в медь индуктора при температуре 40°С (Δ_1) и в сталь заготовки при температуре 1200°С (Δ_2) определяются по формулам (2) и (3)

$$\Delta_1 = \frac{0,07}{\sqrt{f}} = \frac{0,07}{\sqrt{1000}} = 0,0022 \text{ м} = 0,22 \text{ см};$$

$$\Delta_2 = \frac{0,60}{\sqrt{f}} = \frac{0,60}{\sqrt{1000}} = 0,019 \text{ м} = 1,9 \text{ см}.$$

7. Размеры индуктора:

а) число одновременно нагреваемых заготовок

$$n = \frac{t_n}{t_k} = \frac{300}{20} = 15;$$

б) внутренний диаметр индуктора d_1 определяется диаметром заготовки d_2 и толщиной электрической и тепловой изоляции, последняя из условия получения высокого к. п. д. нагревателя принимается равной 2,5–5,0 см

$$d_1 = d_2 + (2,5 - 5) \text{ см},$$

в рассматриваемом случае

$$d_1 = d_2 + 5 = 10 + 5 = 15 \text{ см};$$

в) длина индуктора по формуле (10)

$$l_1 = nl_2 + \Delta l;$$

$$\Delta l = (1 - 2) d_1,$$

в рассматриваемом случае

$$l_1 = nl_2 + 2d_1 = 15 \cdot 12 + 2 \cdot 15 = 210 \text{ см};$$

В зависимости от условий работы нагревателя и наличия места в цеху в данном случае может быть принято два решения:

1) установить один индуктор длиной 210 см;

2) установить два индуктора длиной в два раза меньшей.

В первом случае нагреватель будет иметь большую длину, во втором — большую ширину и больший объем механизмов и электротехнической аппаратуры.

Ниже рассматривается расчет индуктора длиной 210 см. В случае принятия второго решения необходимо выполнить расчет по той же схеме, учитывая, что при

определении длины индуктора число заготовок в индукторе должно быть принято равным восьми.

8. Активные и реактивные составляющие собственного сопротивления индуктора, отнесенные к одновитковому индуктору, и приведенного сопротивления заготовок определяются следующим образом:

а) собственное активное сопротивление индуктора

$$R'_1 = \rho_1 \frac{\pi d_1}{l_1 \Delta_1} =$$

$$= 1,9 \cdot 10^{-8} \frac{\pi 15}{210 \cdot 0,22} =$$

$$= 1,94 \cdot 10^{-6} \text{ ом};$$

б) приведенное активное сопротивление заготовки

$$R'_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{d_2^2 A}{\pi l_2} =$$

$$= 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 \frac{10^2 \cdot 0,3}{15 \cdot 12} =$$

$$= 10,3 \cdot 10^{-6} \text{ ом},$$

где функция $A = f(p)$, характеризующая влияние отношения диаметра заготовки к глубине проникновения тока в нагретую сталь на величину приведенного активного сопротивления заготовки, находится по кривым, приведенным на рис. 8,

$$p = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{d_2}{\Delta_2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{10}{1,9} = 3,7; A = 0,3;$$

в) собственное реактивное сопротивление индуктора

$$x'_1 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{d_1^2}{l_1} = 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 \frac{15^2}{210} = 66 \cdot 10^{-6} \text{ ом};$$

г) приведенное реактивное сопротивление заготовки

$$x'_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{d_2^2}{\pi l_2} (1 - B) =$$

$$= 6,2 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 \frac{10^2}{15 \cdot 12} (1 - 0,4) = 20,6 \cdot 10^{-6} \text{ ом},$$

где $B = f(p) = 0,4$ (по кривым рис. 8).

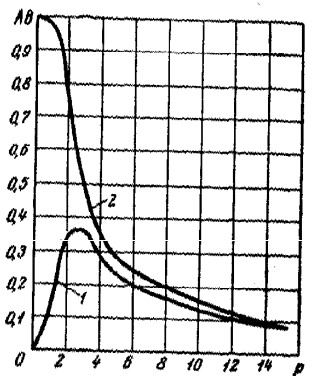


Рис. 8. Кривые зависимости функций A и B от параметра p :

1 — функция A ; 2 — функция B .

9. Эквивалентные составляющие полного сопротивления индуктора, отнесенные к одному витку,

$$R'_0 = R'_1 + R'_2 = 1,94 \cdot 10^{-6} + 10,3 \cdot 10^{-6} = 12,24 \cdot 10^{-6} \text{ ом};$$

$$x'_0 = x'_1 - x'_2 = 66 \cdot 10^{-6} - 20,6 \cdot 10^{-6} = 45,4 \cdot 10^{-6} \text{ ом}.$$

10. Полное сопротивление индуктора, отнесенное к одному витку

$$z' = \sqrt{(R'_0)^2 + (x'_0)^2} = \\ = \sqrt{(12,24 \cdot 10^{-6})^2 + (45,4 \cdot 10^{-6})^2} = 47,5 \cdot 10^{-6} \text{ ом}.$$

11. Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi = \frac{R'_0}{z'} = \frac{12,24 \cdot 10^{-6}}{47,5 \cdot 10^{-6}} = 0,26.$$

12. Электрический к. п. д. индуктора

$$\eta_0 = \frac{R'_2}{R'_0} = \frac{10,3 \cdot 10^{-6}}{12,24 \cdot 10^{-6}} = 0,84.$$

13. Термический к. п. д. η_t при рассматриваемых условиях может быть принят равным 0,9.

14. Полный к. п. д.

$$\eta = \eta_0 \eta_t = 0,84 \cdot 0,9 = 0,76.$$

15. Средняя мощность, развиваемая в нагрузке в процессе нагрева

$$P_n = \frac{cTGn}{0,24t_n} = \frac{0,17 \cdot 1200 \cdot 7,3 \cdot 15}{0,24 \cdot 300} = 310 \text{ квт},$$

где c — удельная теплоемкость стали $0,17 \text{ ккал/С}^\circ \text{кг}$.

16. Мощность, подводимая к индуктору,

$$P_u = \frac{P_n}{\eta} = \frac{310}{0,76} = 410 \text{ квт}.$$

17. Число витков индуктора

$$w = \frac{u}{z'} \sqrt{\frac{R'_0 \cdot 10^{-3}}{P_u}} = \\ = \frac{750}{47,5 \cdot 10^{-6}} \sqrt{\frac{12,24 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3}}{410}} = 87 \text{ витков}.$$

18. Ток индуктора

$$I_u = \frac{u}{wz'} = \frac{750}{87^2 \cdot 47,5 \cdot 10^{-6}} = 2080 \text{ а}.$$

19. Ширина трубки по оси индуктора

$$a = \frac{l_1 k_0}{w + 1} = \frac{210 \cdot 0,8}{87 + 1} = 1,9 \text{ см} = 19 \text{ мм},$$

где k_0 — коэффициент заполнения, учитывающий наличие электрической изоляции между витками, обычно принимается равным 0,8.

20. Толщина стенки трубки

$$b = 1,35\Delta_1 = 1,35 \cdot 0,22 = 0,3 \text{ см} = 3 \text{ мм}.$$

21. Радиальная высота трубки вычисляется после определения площади сечения S трубки, достаточного для пропускания необходимого количества воды,

$$S = \frac{P_u (1 - \eta)}{4,18v (T_1 - T_0)} = \frac{410 \cdot 10^3 (1 - 0,76)}{4,18 \cdot 120 (40 - 18)} = 9,0 \text{ см}^2,$$

где v — скорость движения воды по трубке индуктора (при давлении 1,5—2 ат принимается равной 120 см/сек);

T_0 — температура входящей в индуктор воды 18°С ;

T_1 — температура выходящей воды 40°С .

Высота трубки при последовательном пропускании воды через все витки индуктора

$$h = \frac{S}{a - 2b} + 2b = \frac{900}{19 - 6} + 6 = 75 \text{ мм}.$$

Целесообразно катушку индуктора разделить на пять параллельных ветвей охлаждения, тогда $h = \frac{75}{5} = 15 \text{ мм}$.

Таким образом катушка индуктора изготавливается из трубки с наружными размерами сечения 19×15 и с толщиной стенки 3 мм. Трубки прямоугольного сечения получают волочением из круглых трубок равного периметра сечения.

22. Плотность тока в индукторе

$$\delta = \frac{I_u}{a\Delta_1} = \frac{2080}{19 \cdot 2,2} = 50 \text{ а/мм}^2.$$

Плотность тока для меди при водяном охлаждении может достигать 150 а/мм^2 .

23. Ток генератора

$$I_2 = I_u \cos \varphi = 2080 \cdot 0,26 = 540 \text{ а.}$$

24. Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$p_c = \frac{P_u}{\cos \varphi} = \frac{410}{0,26} = 1600 \text{ квар.}$$

25. Число банок конденсаторной батареи при реактивной мощности одного конденсатора типа ЭСВ-750—140 квар,

$$N_c = \frac{1600}{140} = 12 \text{ шт.}$$

Приведенный расчет справедлив при условии, что отношение длины индуктора к его диаметру $\frac{l_1}{d_1} > 5$ а отношение длины индуктора к длине нагреваемых заготовок близко к единице, что, как правило, соблюдается в индукторах для сквозного нагрева металла перед горячей обработкой.

Далее приводится расчет индуктора, предназначенного для нагрева тех же заготовок при постоянной температуре на их поверхности.

Частота тока, как и при обычном нагреве, выбирается 1000 гц . Время нагрева определяется по кривым рис. 9, $t_n = 140 \text{ сек}$.

Исходя из этого времени нагрева, производится расчет индуктора по вышеприведенной схеме. Часть величин в расчете остается без изменения, результаты расчета изменившихся величин приведены ниже: $l_1 = 120 \text{ см}$; $R'_1 = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$; $R'_2 = 22 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$; $x'_1 = 116 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$; $x'_2 = 44 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$; $R'_3 = 25,4 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$; $x'_3 = 72 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$; $z' = 75 \cdot 10^{-6} \text{ ом}$; $\cos \varphi = 0,34$; $\eta_0 = 0,86$; $\eta_2 = 0,93$. (При нагреве с постоянной температурой поверхности термический к.п.д. имеет более высокое значение) $\eta = 0,8$; $p_u = 390 \text{ квт}$; $\omega = 80 \text{ витков}$; $I_u = 1560 \text{ а}$.

Для получения параметров обмотки индукторов в отдельных участках при нагреве в режиме постоянной температуры вводится понятие об удельном токе индуктора, т. е. токе, приходящемся на 1 см длины и

дуктора. Эта величина условно названа «настилом тока».

При ускоренном нагреве настил тока имеет максимальное значение в начале индуктора и затем спадает по определенному закону. В соответствии с изменением настила тока изменяется и удельная мощность, передаваемая в нагреваемые заготовки. Максимально допустимое значение настила тока при плотности тока

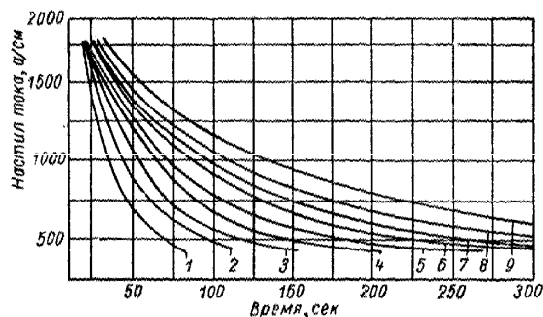


Рис. 9. Зависимость настила тока от времени при нагреве в режиме постоянной температуры поверхности для второй стадии нагрева, когда температура поверхности достигла заданного значения, при частоте 1000 гц для заготовок диаметром в мм: 1 — 60; 2 — 70; 3 — 80; 4 — 90; 5 — 100; 6 — 110; 7 — 120; 8 — 130; 9 — 140.

в меди, охлаждаемой водой, 150 а/мм^2 составляет при частоте тока $1000, 2500$ и 8000 гц соответственно $2650, 1670, 940 \text{ а/см}$. Эти значения настила тока и нужно принимать для первой стадии нагрева. Во второй стадии нагрева, когда постоянно поддерживается ковочная температура на поверхности заготовок, настил тока для частот $1000, 2500$ и 8000 гц определяется по графикам на рис. 9, 10, 11.

Для рассматриваемого случая шаг витков индуктора в первой стадии нагрева будет равен: $x_1 = \frac{1560}{2650} = 0,6 \text{ см} = 6 \text{ мм}$.

Выполнить катушку с таким шагом витков невозможно, если считать, что толщина стенки трубки при

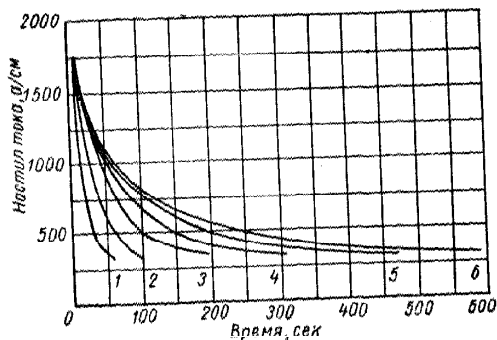


Рис. 10. Зависимость настила тока от времени при нагреве в режиме постоянной температуры поверхности для второй стадии нагрева, когда температура поверхности достигла заданного значения, при частоте 2500 гц, для заготовок диаметром в мм: 1 - 40; 2 - 60; 3 - 80; 4 - 100; 5 - 120; 6 - 140.

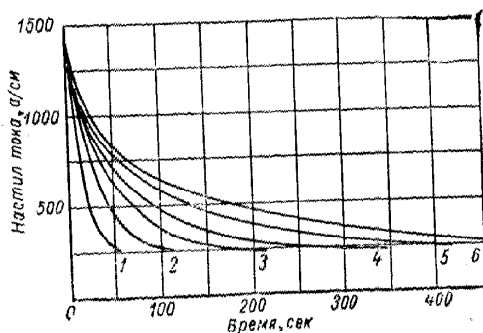


Рис. 11. Зависимость настила тока от времени при нагреве в режиме постоянной температуры поверхности для второй стадии нагрева, когда температура поверхности достигла заданного значения, при частоте 8000 гц для заготовок диаметром в мм: 1 - 40; 2 - 60; 3 - 80; 4 - 100; 5 - 120; 6 - 140.

частоте 1000 гц должна составлять 3 мм, а ширина внутреннего окна не может быть меньше 5—6 мм, то минимальная ширина трубки по оси индуктора будет равна ~12 мм, а шаг витков ~15 мм.

Таким образом, при частоте тока 1000 гц в рассматриваемом случае осуществить нагрев заготовок в режиме постоянной температуры не представляется возможным.

Целесообразно избрать для осуществления нагрева в режиме постоянной температуры в данном случае частоту тока 2500 гц. Время ускоренного нагрева заготовок диаметром 100 мм при частоте тока 2500 гц составит $t_n = 160$ сек, т. е. будет лишь незначительно больше времени нагрева при частоте тока 1000 гц (140 сек).

Проведенный вновь расчет индуктора по ранее приведенной схеме дает следующие результаты: $\Delta_1 = 0,14$ см; $\Delta_2 = 1,2$ см; $d_1 = 15$ см; $l_1 = 120$ см (число заготовок в индукторе 8, $\Delta l = 24$ см); $R'_1 = 5,3 \cdot 10^{-6}$ ом; $R'_2 = 34 \cdot 10^{-6}$ ом; $x'_1 = 290 \cdot 10^{-6}$ ом; $x'_2 = 120 \cdot 10^{-6}$ ом; $R'_3 = 39,3 \cdot 10^{-6}$ ом; $x'_3 = 170 \cdot 10^{-6}$ ом; $z' = 174 \cdot 10^{-6}$ ом; $\cos \varphi = 0,225$; $\eta_3 = 0,86$; $\eta_4 = 0,93$; $\eta = 0,8$; $p_u = 390$ квт; $p_c = 1700$ квар; $N_c = 8$ банок типа ЭСВ-750-2,5; $w = 43$ витка; $I_u = 2300$ а; $I_{m1} = 1670$ а/см — максимальное значение для частоты тока 2500 гц (функции А и В соответственно равны 0,21 и 0,26).

Далее рассчитываются параметры индуктора на первом его участке, когда осуществляется интенсивный подъем температуры на поверхности заготовки до ее конечного значения.

1. Удельная мощность

$$P_{уд} = 39,4 \cdot 10^{-9} I_m^2 r_2 f A = 39,4 \cdot 10^{-9} \cdot 1670^2 \cdot 5 \cdot 2500 \cdot 0,21 = 280 \text{ вт/см}^2.$$

2. Приведенный радиус заготовки, учитывающий выделение энергии при индукционном нагреве в поверхностном слое металла вместо передачи ее извне

$$r_{пр} = \sqrt{r_2^2 - \Delta_2 \left(r_2 - \frac{\Delta_2}{3} \right)} = \sqrt{5^2 - 1,2 \left(5 - \frac{1,2}{3} \right)} = 4,4 \text{ см.}$$

3. Относительная глубина прогретого слоя

$$\delta = \frac{8,36\lambda}{\rho_{уд} r_{пр}} (T_n - T_0) = \frac{8,36 \cdot 0,108}{280 \cdot 4,4} (1200 - 20) = 0,87,$$

где $\lambda = 0,108$ кал/см·сек·°С — коэффициент теплопроводности.

Расчет оправдлив, если $\delta \leq 1$. В данном случае это условие соблюдается.

4. Продолжительность первой стадии нагрева

$$t_1 = \frac{r_{пр}^2}{6a} \left(1 - \frac{\delta}{4}\right) \delta^2 = \frac{4,4^2}{6 \cdot 0,083} \left(1 - \frac{0,87}{4}\right) 0,87^2 = 24 \text{ сек.}$$

где $a = 0,083$ см²/сек — коэффициент температуропроводности.

В целях обеспечения равномерного нагрева заготовок по длине необходимо, чтобы длина каждого участка индуктора при методическом нагреве была кратна длине заготовки.

В рассматриваемом случае заготовки проталкиваются через индуктор с интервалом времени 20 сек. Если на первом участке индуктора расположить две заготовки, то продолжительность нагрева в первой стадии должна возрасти до 40 сек. Целесообразно рассмотреть возможность осуществления индуктора при расположении на первом участке одной заготовки, т. е. при $t_1 = 20$ сек.

5. Критерий Фурье

$$F_0 = \frac{at_1}{r_{пр}^2} = \frac{0,083 \cdot 20}{4,4^2} = 0,085.$$

6. $\delta = 0,8$ — находится по графику (рис. 12).

7. Удельная мощность на первой стадии нагрева при времени 20 сек

$$\rho_{уд} = \frac{8,36\lambda}{\delta r_{пр}} (T_n - T_0) = \frac{8,36 \cdot 0,108}{0,8 \cdot 4,4} (1200 - 20) = 304 \text{ вт/см}^2.$$

8. Настил тока

$$I_{н1} = \sqrt{\frac{\rho_{уд}}{39,4 \cdot 10^{-9} r_{2f} A}} = \sqrt{\frac{304}{39,4 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 2500 \cdot 0,21}} = 1720 \text{ а/см.}$$

Полученный настил тока также допустим, так как индуктор может надежно работать и при плотности тока несколько большей 150 а/мм².

9. Шаг витков на первом участке индуктора

$$x_1 = \frac{I_n}{I_{н1}} = \frac{2300}{1720} = 1,34 \text{ см} = 13,4 \text{ мм.}$$

10. Длина первого участка индуктора

$$l_{1.1} = l_2 n_1 + \frac{\Delta l}{2} = 12 \cdot 1 + 12 = 24 \text{ см.}$$

11. Число витков на первом участке индуктора

$$w_1 = \frac{24}{1,34} = 18 \text{ витков.}$$

Для расчета параметров индуктора во второй стадии определяется значение настила тока, которое убывает от своего максимального значения по мере нагрева глубинных слоев заготовки.

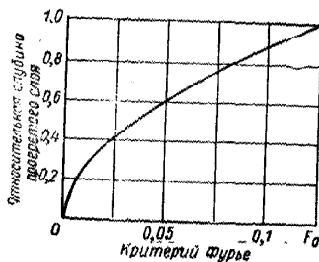


Рис. 12. Зависимость относительной глубины прогретого слоя от критерия Фурье F_0 .

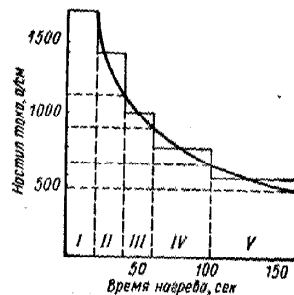


Рис. 13. График зависимости настила тока в процессе нагрева заготовки.

Значение настила тока для рассматриваемого случая определяется по графикам рис. 10. Полученное значение представлено на рис. 13.

Часть индуктора, соответствующая второй стадии нагрева, разбивается на несколько участков с постоянным настилом тока. Число участков зависит от условий

нагрева заготовок в каждом конкретном случае. Обычно их делают от I до V.

В рассматриваемом случае целесообразно остановиться на четырех участках. Длину участка выбирают таким образом, чтобы разность ординат настила тока в начале и конце каждого из участков была одинаковой

$$\Delta I_n = \frac{I_{н.н} - I_{н.к}}{k} = \frac{1720 - 480}{4} = 310 \text{ а/см},$$

где $I_{н.н} = I_{н1}$ — настил тока в начале второй стадии нагрева;

$I_{н.к}$ — настил тока в конце нагрева;

k — число участков части индуктора, соответствующей второй стадии нагрева.

Такое определение настила тока будет справедливо лишь для случая нагрева заготовок при непрерывном продвижении их через индуктор или при методическом нагреве очень коротких заготовок.

В случае же методического нагрева заготовок длиной, соизмеримой с длиной индуктора на отдельных участках, в целях равномерного нагрева их по длине необходимо, чтобы длина каждого участка была кратна длине нагреваемых заготовок.

Исходя из этих условий, длины участков будут составлять: $l_2 = 12,0 \text{ см}$; $l_3 = 12,0 \text{ см}$; $l_4 = 24,0 \text{ см}$; $l_5 = 36,0 + \frac{\Delta l}{2} = 48,0 \text{ см}$.

Среднее значение настила тока на каждом из участков определяется как среднее арифметическое значений настила тока в начале и конце каждого участка:

$$I_{н. ср. 2} = \frac{1720 + 1130}{2} = 1425 \text{ а/см};$$

$$I_{н. ср. 3} = \frac{1130 + 900}{2} = 1015 \text{ а/см};$$

$$I_{н. ср. 4} = \frac{900 + 650}{2} = 775 \text{ а/см};$$

$$I_{н. ср. 5} = \frac{650 + 480}{2} = 565 \text{ а/см}.$$

Шаг витков на каждом из участков равен:

$$x_2 = \frac{I_u}{I_{н. ср. 2}} = \frac{2300}{1425} = 1,6 \text{ см} = 16 \text{ мм};$$

$$x_3 = \frac{2300}{1015} = 2,3 = 23 \text{ мм};$$

$$x_4 = \frac{2300}{775} = 3,0 = 30 \text{ мм};$$

$$x_5 = \frac{2300}{565} = 4,0 = 40 \text{ мм}.$$

Число витков каждой из секций составит:

$$w_2 = \frac{l_2}{x_2} = \frac{12}{1,6} = 7,5 \text{ (8 витков)};$$

$$w_3 = \frac{12}{2,3} = 5,2 \text{ (5 витков)};$$

$$w_4 = \frac{24}{3,0} = 8 \text{ витков};$$

$$w_5 = \frac{48}{4,0} = 12 \text{ витков}.$$

Осевая ширина трубки на каждом участке:

$$a_1 = x_1 k_3 = 1,34 \cdot 0,8 = 1,1 \text{ см} = 11 \text{ мм};$$

$$a_2 = 1,6 \cdot 0,8 = 1,3 \text{ см} = 13 \text{ мм};$$

$$a_3 = 2,3 \cdot 0,8 = 1,8 \text{ см} = 18 \text{ мм};$$

$$a_4 = 3,0 \cdot 0,8 = 2,4 \text{ см} = 24 \text{ мм};$$

$$a_5 = 4,0 \cdot 0,8 = 3,2 \text{ см} = 32 \text{ мм}.$$

Толщина трубки индуктора $b = 1,35 \cdot \Delta_1 = 2,0 \text{ мм}$.

Радиальная ширина трубки на каждом участке определяется из условия охлаждения меди. Площадь внутреннего окна трубки на первом участке составляет:

$$S = \frac{r_1 \pi a_1 w_1 I_u^2}{a_1 4,18 v (T_1 - T_0)} = \frac{1,9 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 18 \cdot 2300^2}{1,1 \cdot 0,14 \cdot 4,15 \cdot 120 \cdot 22} = 4,9 \text{ см}^2;$$

$$h_1 = \frac{S}{a_1 - 2b} + 2b = \frac{4,9}{1,1 - 2,02} + 2 \cdot 0,2 = 7,4 \text{ см} = 74 \text{ мм}.$$

В первом участке индуктора целесообразно сделать 5 ветвей охлаждения, тогда $h_1 = 15 \text{ мм}$.

Радиальную высоту трубки целесообразно оставить одинаковой, тогда во второй секции индуктора должно быть две ветви охлаждения, в третьей — одна, в четвертой — одна и в пятой — одна.

Таким образом, все данные, необходимые для проектирования индукционного нагревательного устройства, получены.

6. РАСЧЕТ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

От правильного определения установленной мощности высокочастотных генераторов во многом зависит бесперебойная работа кузнечного или прокатного цеха и сумма капитальных затрат на создание индукционных нагревательных устройств.

В случае, когда от генератора или нескольких генераторов, работающих параллельно, получает питание одно индукционное нагревательное устройство, установленная мощность высокочастотных генераторов определяется электрическим расчетом индукционного нагревательного устройства при максимальной его производительности. Полученная в расчете мощность округляется в сторону повышения до кратной мощности выбранных для питания нагревателей генераторов. В зависимости от условий работы нагревательного устройства принимается решение об установлении резервных генераторов.

Значительно сложнее произвести расчет установленной мощности для случая, когда от одной генераторной станции получает питание большое количество нагревателей. Неправильно определять установленную мощность генераторной станции как сумму максимальных нагрузок, создаваемых отдельными нагревателями. Это может привести к необоснованному завышению мощности и капитальных затрат.

В крупном кузнечном цехе ковочные механизмы практически никогда не работают одновременно. Кроме того, все работающие механизмы никогда не обрабатывают одновременно заготовки, требующие для нагрева максимальной мощности. Учитывая эти обстоятельства, при расчете установленной мощности высокочастотных генераторов необходимо учитывать коэффициенты одно-

временной работы ковочных механизмов $k_{одн}$ и совпадения максимальных нагрузок $k_{сов}$. Установленная мощность может быть определена по формуле

$$P_{уст} = k_{одн} k_{сов} \sum P_{max}, \text{ кВт.}$$

Коэффициенты $k_{одн}$ и $k_{сов}$ в зависимости от условий работы кузнечного цеха могут иметь различные значения, например, для кузнечных цехов автомобильных заводов они принимаются равными 0,8. Часто требуется определить установленную мощность высокочастотных генераторов до выполнения электрических расчетов индукционных нагревательных устройств. С достаточной степенью точности это может быть сделано по формуле

$$P_{уст} = \omega_{уд} k_{одн} k_{сов} G_{max}, \text{ кВт,}$$

где $\omega_{уд}$ — удельный расход высокочастотной энергии на индукционный нагрев металла до ковочной температуры, приблизительно равный 0,4 кВт ч/кг;

G_{max} — максимально возможная часовая производительность по весу металла нагревательных устройств кузнечного цеха, кг/час.

В случае использования для нагрева двух частот тока, расчет установленной мощности генераторов для каждой из частот нужно производить отдельно.

В кузнечных цехах заводов с мелкосерийным или индивидуальным производством часто устанавливается ковочное оборудование, исходя из потребности технологи, но с производительностью, значительно превышающей потребную.

В этом случае целесообразно разработать график работы ковочных механизмов при их номинальной нагрузке и, исходя из этого графика, определить установленную мощность высокочастотных генераторов в приведенном выше порядке.

II. СХЕМЫ ОСНОВНЫХ ТИПОВ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

7. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ИНДУКТОРА И СХЕМЫ НАГРЕВАТЕЛЯ

Конструкция индуктора и механизмов, автоматизирующих работу нагревательного устройства, в значительной степени определяется размерами и формой нагреваемых заготовок, требуемой производительностью, температурой нагрева и другими технологическими особенностями процесса. Схема автоматического управления составляется в соответствии с принятым способом дозирования нагрева и конструкцией механизмов, используемых для автоматизации подачи заготовок.

Остальные элементы нагревательного устройства: конденсаторная батарея, контактор, измерительные приборы, автотрансформатор—не связаны технологическими особенностями производства. Они выбираются в зависимости от частоты тока и потребляемой мощности и могут быть одинаковыми у нагревателей различной конструкции. Отличными могут быть только способы их компоновки в один общий агрегат с остальными частями нагревателя. Эти способы выбираются в зависимости от места в цеху, отводимого под нагреватель, возможности сооружения подвалов под нагревателем для расположения конденсаторов и т. д.

Таким образом, проектирование индукционного нагревателя состоит из выбора конструкции индуктора, разработки механизмов, подающих заготовки, составления схемы автоматического управления работой нагревателя, компоновки элементов между собой и размещения их в цеху.

Нагрев заготовок определенного размера и формы часто можно осуществлять в индукторах¹ различного

¹ См. Библиотечку, вып. 6.

типа. Так, например, мерные цилиндрические заготовки можно нагревать в круглых цилиндрических индукторах, в индукторах цилиндрических секционированных, т. е. разделенных на отдельные части, между которыми оставлены промежутки для размещения механизмов, транспортирующих заготовки, и индукторах щелевых.

Если зазор между нагреваемой заготовкой и индуктирующим проводом не очень велик, цилиндрические индукторы имеют высокий к. п. д. и обеспечивают хорошую защиту поверхности заготовки от образования окалины, так как в малом промежутке между заготовкой и футеровкой воздух почти не циркулирует. Однако проталкивание заготовок сквозь длинные цилиндрические индукторы при малых зазорах затруднено. Часто повреждается футеровка и изоляция. Если механизмы сложны и ненадежны в эксплуатации, нагреватель приходится часто останавливать для ремонта и подналадки. При этом питающие генераторы работают на холостом ходу. Смежные механизмы и обслуживающий персонал простаивают. При таких простоях может быть потеряна весь выигранный, достигнутый за счет использования индуктора с высоким к. п. д.

Индукторы щелевые и цилиндрические, разделенные на отдельные секции, между которыми установлены ролики, поддерживающие заготовки, имеют более низкий к. п. д.

Заготовки в них легко омываются воздухом и поэтому окисляются сильнее. Однако механизмы для подачи и перемещения заготовок в нагревателях с такими индукторами получаются более простыми и надежными.

Таким образом, при выборе конструкции основных элементов нагревателя—индуктора и механизмов приходится учитывать весьма разнообразные технико-экономические факторы. Поэтому трудно привести общие правила, руководствуясь которыми можно было бы во всех случаях выбрать оптимальную схему этих устройств.

В настоящее время разработано и построено большое число нагревателей различного типа. Знакомление с их конструкциями поможет читателю правильно решать возникающие перед ним задачи.

Ниже приводится схематическое описание конструкции индукторов и механизмов для подачи заготовок для некоторых типов индукционных нагревателей, ужешедших примененне в промышленности.

Примеры различных компоновок нагревателей приведены в п. III, где описываются промышленные установки для сквозного индукционного нагрева металлов.

8. СПОСОБЫ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК СКВОЗЬ ИНДУКТОР

Применяются два принципиально отличных способа транспортирования заготовок сквозь индуктор:

1) заготовки одна за другой подаются в индуктор с помощью толкателя или ведущих роликов, установленных перед индуктором. Каждая заготовка проталкивает все заготовки, находящиеся впереди;

2) посредством специальных транспортирующих устройств — шагающего механизма, цепи, карусельного стола или роликов, поддерживающих заготовки во время их перемещения сквозь индуктор.

Первый способ транспортирования используется главным образом при нагреве в круглых цилиндрических индукторах. Нагреваемые заготовки обычно подерживаются водоохлаждаемыми трубчатыми направляющими. Чтобы заготовки не заклинивались в индукторе и не повреждали его футеровку, они должны быть прямыми. Торцы заготовок должны быть перпендикулярны их оси и не иметь больших заусенцев. Отношение длины заготовки к ее диаметру не должно быть больше 1,5.

При первом способе транспортировки, в случае заклинивания заготовок или не подачи по каким-либо причинам очередной заготовки в индуктор, перемещение и выдача заготовок прекращаются. Во избежание перегрева заготовок, находящихся в индукторе, последний должен быть отключен. Остановлены должны быть также механизмы, подающие заготовки.

После устранения причины задержки нагреватель снова включается в работу. Однако при продолжительной остановке заготовки, лежащие в индукторе, остывают. Поэтому первые заготовки, выходящие из индуктора, после перерыва в работе нагревателя не успевают нагреться до заданной температуры. Они должны быть

возвращены для повторного нагрева. Точно так же при остановке нагревателя в конце смены большое число заготовок остается в нагревателе. На другой день в начале работы первые заготовки, выходящие из индуктора, не имеют заданной температуры.

Весьма существенным недостатком первого способа транспортирования, при котором заготовки проталкивают друг друга, является частое сваривание заготовок друг с другом. Вследствие сваривания заготовки выдаются из индуктора сразу по две.

Перемещение заготовок с помощью специальных транспортирующих устройств используется при нагреве в щелевых и секционированных индукторах. Шагающие механизмы иногда используются также для перемещения заготовок в круглых цилиндрических индукторах.

При перемещении с помощью специальных транспортирующих устройств заготовки могут пропускаться сквозь индуктор по одной, что бывает необходимо при наладке ковочного агрегата. Перерывы в подаче заготовок не сказываются на нормальной работе нагревателя.

В конце рабочего дня индуктор может быть полностью освобожден от заготовок. При транспортировке заготовок цепью, шагающим механизмом или карусельным столом они могут иметь значительную кривизну и заусенцы. Отношение длины к диаметру не имеет существенного значения. Секционированные индукторы с промежутками между секциями для установки механизмов, перемещающих заготовку, могут использоваться для нагрева заготовок длиной больше 400 мм.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛИ ДЛЯ МЕРНЫХ ЗАГОТОВОК

Эти нагреватели строятся в различных конструктивных модификациях для нагрева заготовок как в продольном, так и поперечном магнитном поле.

Схемы методических нагревателей, в которых использован первый способ транспортирования заготовок, приведены на рис. 14 и 15. В нагревателе с механическим толкателем (рис. 14) заготовки, подлежащие нагреву укладываются на наклонный лоток. Толкатель, приводимый в движение электродвигателем посредством

червячного редуктора, поочередно, через определенные интервалы времени, подает заготовки в индуктор.

При каждом ходе толкателя заготовки, лежащие в индукторе, сдвигаются на один шаг влево. У левого конца индуктора установлены ролики. Ролики все время

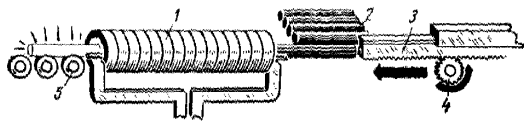


Рис. 14. Схема методического нагревателя с механическим толкателем:

1 — индуктор; 2 — заготовки, подлежащие нагреву; 3 — толкатель с зубчатой рейкой; 4 — шестерня привода, зацепляющаяся с рейкой толкателя; 5 — ролики, извлекающие заготовку из индуктора.

вращаются. Они приводятся во вращение вторым электромотором. Нагретая заготовка, выталкиваемая из индуктора, попадает на ролики, увлекается ими и сбрасывается на транспортер, передающий ее для последу-

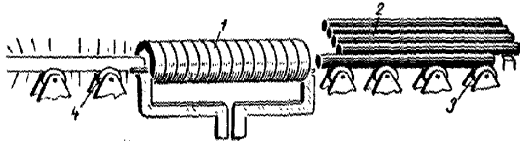


Рис. 15. Схема методического нагревателя с непрерывным движением заготовок:

1 — индуктор; 2 — заготовки, подлежащие нагреву; 3 — магнитные ролики; 4 — ролики, извлекающие заготовки из индуктора.

ющей обработки. Работой нагревателя управляет реле времени или фотопирометр посредством схемы автоматического управления.

В нагревателе с непрерывным движением заготовок (рис. 15) проталкивание последних осуществляется магнитными роликами, установленными перед индуктором. Каждый ролик состоит из двух дисков, на наружные диаметрах сняты фаски под углом 45°. Между дисками помещен постоянный магнит. Фаски на дисках образуют канавку для заготовок.

Магнит притягивает заготовку к роликам и обеспечивает таким образом перемещение ее без проскальзывания. Заготовки, подлежащие нагреву, укладываются на наклонный лоток. Отсекающий механизм пропускает их по очереди на магнитные ролики.

Последние подают заготовки одну за другой непрерывным потоком в индуктор. Темп выдачи нагретых заготовок определяется скоростью перемещения их, т. е. числом оборотов магнитных роликов. Ролики у выхода

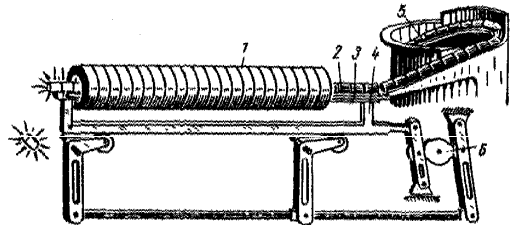


Рис. 16. Схема методического нагревателя с цилиндрическим индуктором и шагающим механизмом для транспортирования заготовок:

1 — индуктор; 2 — заготовки; 3 — неподвижные направляющие, поддерживающие заготовки; 4 — подвижные направляющие, перемещающие заготовки; 5 — вибраторный бункер, подающий заготовки на направляющие 3 и 4; 6 — кулачковый вал, приводящий направляющие 4.

из индуктора, удаленные от него на длину заготовки, имеют увеличенную окружную скорость. Таким образом, сокращается промежуток времени между моментами выхода заготовок из индуктора и подачи ее в ковочный агрегат.

В нагревателе с цилиндрическим индуктором и шагающим механизмом (рис. 16) заготовки, подлежащие нагреву посредством вибраторного бункера или какого-либо иного устройства подаются по одной на три направляющие, проходящие сквозь индуктор. Средняя из этих направляющих подвижная, а две крайние неподвижные. Подвижная направляющая приводится в возвратно-поступательное движение электродвигателем посредством червячного редуктора и кулачкового диска. При своем движении средняя направляющая приподнимает заготовки с крайних и перемещает их небольшими шагами вдоль индуктора.

Скорость перемещения заготовок определяется числом ходов в минуту и амплитудой колебания подвижной направляющей. Изменяя число оборотов приводного электродвигателя, можно в соответствии с требуемой производительностью изменять скорость перемещения заготовок.

В нагревателях большой производительности при нагреве заготовок длиной больше 400 мм используются секционированные индуктора. Между секциями индуктора помещаются механизмы, поддерживающие и перемещающие заготовки. Шаг, с которым устанавливаются

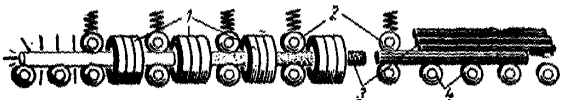


Рис. 17. Схема нагревателя с секционированным индуктором и роликовым механизмом для транспортирования заготовок:

1 — секции индуктора; 2 — нажимные ролики, служащие для увеличения силы сцепления между заготовками и роликами 4; 3 — заготовки; 4 — ведущие ролики.

секции, должен быть несколько меньше половины длины заготовки. При этом каждая заготовка всегда будет опираться по меньшей мере в двух точках на механизмах, располагающихся между секциями. Длина секции должна быть несколько меньше шага, чтобы в промежутках между секциями было достаточно места для расположения вышеуказанных механизмов.

Схемы нагревателей с секционированными индукторами приведены на рис. 17, 18 и 19.

В нагревателе с роликовым приводом (рис. 17) заготовки, подлежащие нагреву, с наклонного лотка по одной подаются на ролики. Перед первой секцией индуктора и между секциями установлены, кроме поддерживающих роликов, также прижимные. Последние увеличивают сцепление между заготовкой и ведущими роликами и таким образом не позволяют ей останавливаться при случайных прикосновениях к футеровке индуктора.

В связи с тем, что в секционированных индукторах нет направляющих, поддерживающих заготовку, последняя не оказывает обычно никаких механических воз-

действий на футеровку и изоляцию индуктора. Поэтому толщину футеровки можно уменьшить. Благодаря уменьшению зазора между индуктирующим проводом и заготовкой к. п. д. индуктора несколько увеличивается.

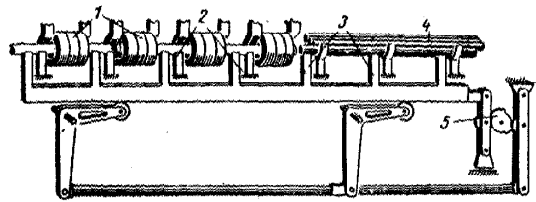


Рис. 18. Схема нагревателя с секционированным индуктором и шагающим механизмом для транспортирования заготовок:

1 — секции индуктора; 2 — неподвижные опоры; 3 — подвижные опоры, перемещающие заготовки; 4 — заготовки; 5 — кулачковый вал, приводящий подвижные опоры 3.

Недостаток секционированного индуктора — трудность защиты заготовок от окисления, так как они легко омываются воздухом в промежутках между секциями.

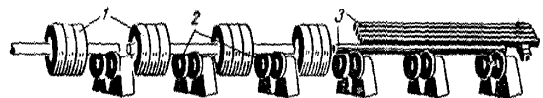


Рис. 19. Схема нагревателя с секционированным индуктором и роликовым механизмом для перемещения и вращения заготовок:

1 — секции индуктора; 2 — ведущие ролики, оси которых расположены под углом к оси заготовки; 3 — заготовки.

Поэтому промежутки необходимо закрывать, например, трубками из шамота или другого жаростойкого материала.

Для подачи заготовок в нагревателях с секционированными индукторами могут быть использованы также шагающие механизмы (рис. 18). Заготовки лежат на неподвижных опорах, установленных перед индуктором и между секциями его. Подвижные опоры закреплены на общей рейке. Под действием системы рычагов, приводимых в движение кулачковым валом, рейка

посредством подвижных опор периодически приподнимает заготовки и смещает их вдоль индуктора. Если кроме перемещения заготовок вдоль оси необходимо также их вращать, ведущие ролики между секциями индуктора устанавливаются под углом к направлению осей заготовок (рис. 19).

Меняя величину этого угла, можно изменять скорость перемещения заготовок сквозь индуктор. Вращение заготовок может быть полезно в устройствах для термообработки прутков, так как оно способствует выравниванию нагрева и охлаждения.

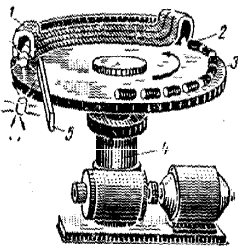


Рис. 20. Схема карусельного нагревателя с щелевым индуктором:

1 — индуктор; 2 — заготовки; 3 — вращающийся стол; 4 — механизм привода стола; 5 — отражатель, сбрасывающий заготовки.

В нагревателе карусельного типа с щелевым индуктором (рис. 20) заготовки укладываются на вращающийся стол. Поверхность стола футерована жаростойким, непроводящим материалом. Карусельный нагреватель может использоваться для нагрева коротких заготовок в небольшом диапазоне длин и диаметров.

В случае нагрева нескольких цилиндрических заготовок в цилиндрическом индукторе последние можно располагать двумя способами.

1) продольные оси заготовок находятся на одной прямой. В этом случае длина индуктора несколько превышает сумму длин находящихся в нем заготовок (формула 10). Индуктор имеет прямоугольное или круглое поперечное сечение в соответствии с формой поперечного сечения заготовки. В схемах, рассмотренных выше, принят описываемый способ расположения заготовок

2) заготовки располагаются рядом, параллельно друг другу, в одной плоскости, подобно, например, карандашам в коробке. Длина индуктора определяется суммой диаметров нагреваемых заготовок. Поперечное сечение индуктора имеет прямоугольную форму с закругленными углами. Размеры поперечного сечения определяются диаметром и длиной заготовки. Заготовки перемещаются в индукторе в направлении, перпендикулярном их оси.

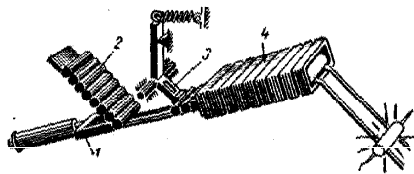


Рис. 21. Схема нагревателя для нагрева цилиндрических заготовок в поперечном магнитном поле:

1 — толкатель, подающий заготовки по одной в индуктор 4 из магазина 2; 2 — магазин с заготовками; 3 — защелка, не позволяющая заготовкам скатываться вниз из индуктора; 4 — индуктор.

При втором способе расположения заготовок в индукторе магнитное поле направлено перпендикулярно оси заготовок. Поэтому время нагрева несколько увеличивается (см. п. 2). В индукторе должно находиться примерно в полтора раза больше заготовок, чем при первом способе расположения их. Однако второй способ расположения заготовок применяется, когда длина заготовок значительно превышает их диаметр. При этом удается в несколько раз уменьшить длину индуктора.

На рис. 21 показана схема нагревателя с индуктором, в котором заготовки расположены в процессе нагрева перпендикулярно магнитному полю. Индуктор установлен слегка наклонно.

Заготовки из магазина подаются в индуктор по одной снизу вверх. Верхняя заготовка выкатывается из индуктора. Нагреватели такого типа могут использоваться в очень узком диапазоне длин и диаметров заготовок.

10. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛИ ДЛЯ МЕРНЫХ ЗАГОТОВОК

В индукторе периодического нагревателя находится одна заготовка. Нагрев включается после подачи заготовки в индуктор. Перед выдачей заготовки индуктор отключается. В том случае, если необходимая производительность обеспечивается при нагреве заготовок по одной, естественно, должен использоваться периодический нагреватель. Однако и в том случае, когда из-за высокой производительности устройства необходимо одновременно нагревать несколько заготовок, может оказаться целесообразным вместо одного методического индуктора установить несколько периодических.

Проталкивание заготовок в нескольких коротких периодических индукторах осуществляется проще, чем в одном длинном методическом. Можно нагревать заготовки с большей кривизной, с неровными обрезками заусенцами.

В зависимости от требуемой производительности можно использовать то или иное число индукторов. В время наладки ковочного агрегата заготовки можно нагревать по одной. В конце смены можно выдать заготовки из всех индукторов.

При включении нагревателя, после перерыва в работе, связанного с ремонтом смежного оборудования, все заготовки могут быть доведены до заданной температуры и выданы для последующей обработки. В случае выхода из строя одного из индукторов, остальные могут продолжать нормальную работу.

При нагреве заготовок на промышленной частоте используя три или шесть периодических индукторов обеспечивают равномерную загрузку всех фаз трехфазной сети.

Однако механизмы для автоматического распределения заготовок по нескольким периодическим индукторам получаются более сложными, чем при подаче заготовок в один методический индуктор.

Если индукторы установлены неподвижно, приходится устанавливать механизмы, распределяющие заготовки в определенном порядке по индукторам. Эти механизмы и схема автоматического управления получаются весьма сложными.

Для упрощения устройств, подающих заготовки, в некоторых конструкциях индукторы устанавливаются на подвижных каретках или вращающихся барабанах. Это позволяет устанавливать индукторы по очереди по оси толкателя, служащего для подачи заготовок.

Подвод тока и воды к подвижным индукторам несколько усложняется. Однако механизмы, подающие заготовки, работают более надежно.

В периодических нагревателях заготовки могут подерживаться как трубчатыми водоохлаждаемыми на-

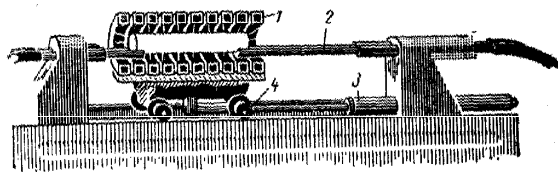


Рис. 22. Схема периодического нагревателя с подвижным индуктором:

1 — индуктор; 2 — опоры для заготовок, охлаждаемые водой; 3 — цилиндр, перемещающий каретку; 4 — каретка, на которой смонтирован индуктор.

правляющими, проходящими внутри индуктора, так и водоохлаждаемыми опорами под концами заготовок.

Ниже рассматривается несколько схем нагревателей с подвижными и неподвижными индукторами.

В нагревателе (рис. 22) индуктор установлен на подвижной каретке. Благодаря этому он может смещаться вдоль оси. Заготовка удерживается концами на неподвижных опорах. После окончания нагрева каретка с индуктором смещается в сторону, а заготовка остается на месте.

При смещенном индукторе нагретая заготовка легко может быть снята и заменена новой. Иногда в описанной схеме индуктор устанавливается неподвижно, а опоры для заготовок закрепляются на подвижной каретке.

В нагревателе (рис. 23) два периодических индуктора, расположены вдоль общей оси. С обеих сторон от индукторов параллельно их оси проходят два приводных роликана. Первый роликан служит для подачи

холодных заготовок к индукторам. Второй для передачи нагретых заготовок к ковочному агрегату.

Вдоль первого рольганга расположены: магазин для заготовок, подлежащих нагреву, упоры, останавливающие заготовки для подачи к тому или иному индуктору, и рычаги для подъема заготовок с рольганга.

Перед каждым индуктором находится наклонная площадка на несколько заготовок и толкатель. С противоположной стороны по оси индуктора установлены

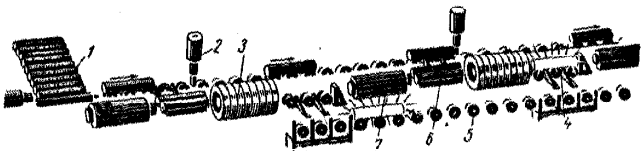


Рис. 23. Схема нагревателя с двумя периодическими индукторами: 1 — магазин для заготовок; 2 — убирающийся упор, останавливающий заготовку; 3 — рольганг для подачи заготовок на площадку 6; 4 — механизмы для выдачи нагретых заготовок; 5 — рольганг для транспортировки нагретых заготовок; 6 — площадка перед индуктором на несколько заготовок; 7 — толкатель для подачи заготовки в индуктор.

ролики для удаления нагретых заготовок и рычажные механизмы для сбрасывания последних на второй продольный рольганг.

Заготовки из магазина транспортируются первым рольгангом до одного из расположенных вдоль него упоров. Затем они поднимаются рычагами на загрузочные площадки индукторов и далее толкателями подаются в индукторы. Нагретые заготовки извлекаются из индукторов роликами и затем рычагами сбрасываются на второй рольганг. Работой нагревателя управляет реле времени посредством схемы автоматического управления.

В карусельном нагревателе (рис. 24) шесть индукторов установлены вертикально на вращающемся барабане. Под индукторами на барабане закреплены подъемные столы. Через равные интервалы времени барабан поворачивается на одну шестую часть оборота.

В одном из шести положений, занимаемых каждым индуктором при поворотах барабана, стол под ним опускается. На стол устанавливается заготовка, подле-

жащая нагреву. Затем он поднимается и заготовки вводятся в индуктор.

При дальнейшем вращении барабана осуществляется нагрев заготовки. После того как барабан сделает полный оборот, нагрев заканчивается, стол опускается и заготовка сбрасывается с него.

В вертикальных индукторах не требуется направляющих для удерживания заготовок. Последние могут быть установлены концентрично с отверстием в индукторе. Это способствует большей равномерности нагрева. Футеровка вертикальных индукторов лучше сохраняется, так как не подвергается механическим воздействиям.

При горизонтальном расположении индукторов они могут быть установлены на тележке

(рис. 25). По команде автоматического управления тележка перемещается и устанавливает индукторы по очереди на ось толкателя. Толкатель подает заготовки в индукторы с наклонного магазина. Нагретые заготовки выталкиваются вновь поступающими в индуктор холодными заготовками.

Можно упростить механизацию подачи заготовок и вместе с тем не делать индукторы подвижными, если одну и ту же заготовку нагревать последовательно в нескольких индукторах.

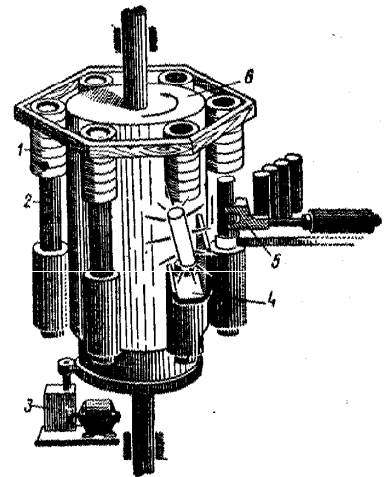


Рис. 24. Схема карусельного нагревателя с шестью периодическими индукторами:

1 — индуктор; 2 — подъемный стол, на котором удерживается заготовка; 3 — механизм привода стола; 4 — приемный желоб для нагретых заготовок; 5 — механизм для установки на стол 2 заготовок, подлежащих нагреву; 6 — поворотный стол, на котором закреплены индукторы.

На рис. 26 показана схема нагревателя, в котором нагрев заготовки осуществляется последовательно в трех индукторах. Благодаря тому, что все нагреваемые заготовки подаются в одно место и проходят одни

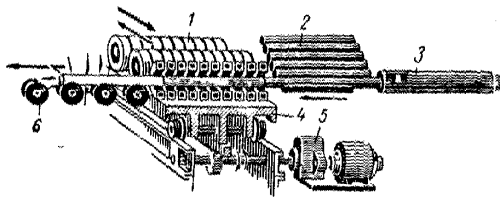


Рис. 25. Схема нагревателя с периодическими индукторами, установленными на каретке:

1 — индуктор; 2 — магазин с заготовками; 3 — пневматический цилиндр, подающий заготовки в индуктор 1; 4 — каретка, на которой смонтированы индукторы 1; 5 — механизм привода каретки, устанавливающий индукторы по очереди на линии толкателя; 6 — ролик, извлекающие заготовки из индукторов.

и тот же путь, схема автоматического управления и механизмы в данном случае проще, чем в нагревателе, который приведен на рис. 23. Кроме того, при последо-

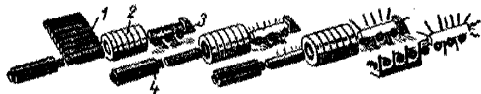


Рис. 26. Схема нагревателя, в котором каждая заготовка нагревается последовательно в трех индукторах:

1 — магазин с заготовками; 2 — индуктор; 3 — ролик, извлекающие заготовку из индуктора; 4 — толкатель для подачи заготовок в индуктор.

вательном нагреве заготовки в нескольких индукторах можно легко осуществить режим нагрева с постоянной температурой на поверхности. Каждый из индукторов рассчитывается на соответствующую стадию нагрева.

11. УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНЦЕВОГО И МЕСТНОГО НАГРЕВА ЗАГОТОВОК

Для нагрева концов заготовок могут быть применены некоторые из вышеописанных нагревателей, обычно используемых для нагрева заготовок по всей длине. Так

для этой цели могут быть использованы нагреватели, показанные на рис. 22 и 24. Они должны быть настроены таким образом, чтобы в индуктор входила не вся заготовка, а только конец ее, подлежащий нагреву. Кроме того, имеются специальные нагреватели, предназначенные для нагрева концов.

Нагреватели с щелевыми индукторами (рис. 27) используются для нагрева концов заготовок во время их

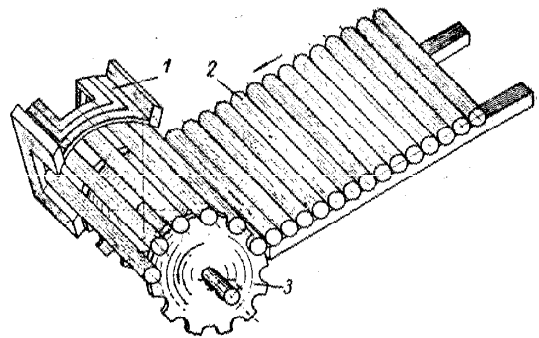


Рис. 27. Схема нагревателя концов заготовок с щелевым индуктором:

1 — индуктор; 2 — магазин с заготовками; 3 — барабан, перемещающий заготовки сквозь индуктор.

перемещения с помощью вращающегося барабана. Заготовки, подлежащие нагреву, находятся на наклонном лотке. Барабан вырезами, расположенными на его периферии, захватывает заготовки по одной с лотка и подает их концами в индуктор.

При нагреве концов длиной более 300—500 мм к. п. д. щелевых индукторов сильно падает, так как возрастают потери в П-образных перемычках на концах индуктора. При значительной длине нагреваемых концов суммарная длина перемычек может оказаться больше длины прямолинейных участков индуктора. Более рационально длинные концы нагревать в цилиндрических индукторах с прямоугольным, закругленным по концам, поперечным сечением (рис. 28). Заготовки подаются вдоль оси толкателем в верхний конец наклонно установленного индуктора. В процессе нагрева они

скатываются вниз по футеровке индуктора. В нижнем конце индуктора они выдаются из него выталкивателем.

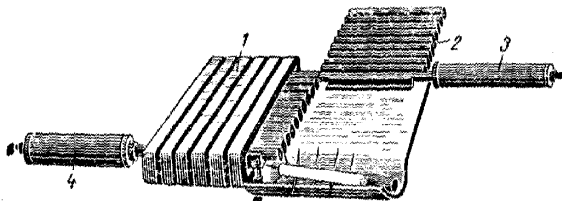


Рис. 28. Схема нагревателя для нагрева концов, длина которых в несколько раз больше их диаметра: 1 — индуктор; 2 — магазин с заготовками; 3 — заталкиватель заготовок; 4 — выталкиватель заготовок.

Для нагрева длинных концов успешно используются также нагреватели с щелевыми индукторами кольцевого типа. В этих нагревателях (рис. 29) индуктор образован двумя концентрическими спиральми из медных трубок, из которых одна находится в другой. Спиральи включаются таким образом, чтобы магнитные потоки, создаваемые токами в каждой из них, суммировались в пространстве между спиральми.

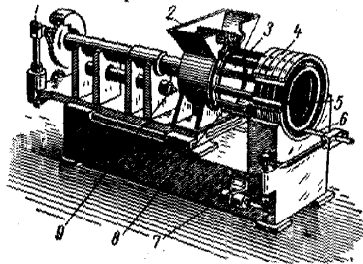


Рис. 29. Схема нагревателя для концов заготовок с щелевым кольцевым индуктором:

1 — механизм, поворачивающий барабан 3; 2 — магазин для заготовок; 3 — барабан с пазами для заготовок; 4 — индуктор; 5 — нагреваемые заготовки; 6 — извлекатель заготовок; 7 — цилиндр привода извлекателя 6; 8 — трубки, закрепленные на барабане 3, поддерживающие заготовки 5; 9 — толкатель, проталкивающий заготовки в трубки из пазов барабана 3.

Тогда при достаточно большом диаметре спиралей и небольшом зазоре между ними в этом зазоре создается равномерное магнитное поле. Сюда и вводятся нагреваемые концы заготовок. Последние удерживаются в отверстиях вращающегося барабана, установленного концентрично индуктору.

В некоторых случаях после нагрева конца заготовки и отрезки, полученных из конца поковок, оставшуюся часть необходимо снова нагреть для продолжения процессаковки. Так осуществляется, например, ковка подшипниковых колец, мелких шестерен и т. п. изделий. При этом оставшаяся часть штанги, подлежащая повторному нагреву, на конце длиной 100—200 мм имеет довольно высокую температуру, а остальная часть ее холодная. При подаче такой заготовки в индуктор для повторного нагрева трудно добиться равномерной температуры по длине.

Можно было бы изготовить индуктор с неравномерным шагом навивки таким образом, чтобы ослабить нагрев части заготовки, имеющей более высокую температуру. Однако температура оставшегося конца и длина нагретой части от нагрева к нагреву изменяются. Поэтому устойчивых результатов таким приемом практически добиться очень трудно.

В настоящее время предложено два способа преодоления вышеуказанного затруднения.

1. *Применение двухчастотного нагрева.* При нагреве током 50 гц заготовки диаметром меньше 100 мм не нагреваются выше точки магнитных превращений. Поэтому температура заготовки выравнивается и достигает 768°С. Затем включается ток более высокой частоты и осуществляется нагрев до ковочной температуры.

2. *Нагрев на одной высокой частоте, но в индукторе в два раза более длинном, чем длина нагреваемой части.* При первом нагреве заготовка вставляется в индуктор на половину его длины и конец ее нагревается только до 500—700°С. Затем она вводится полностью на длину индуктора. При второй стадии первого нагрева конец догревается до ковочной температуры, а остальная часть, находящаяся в индукторе, нагревается до 700—900°С.

В процессе отковки эта часть остывает до 500—700°С. При повторной подаче в индуктор заготовка вводится на всю длину его. Нагреваемый конец сразу оказывается в таких же условиях, как при второй стадии первого нагрева. Если при всех последующих нагревах заготовку вводить в индуктор также на полную длину его, удастся осуществить постоянство режима нагрева.

Местный нагрев заготовок. Наиболее широко местный нагрев применяется в устройствах для гибки труб

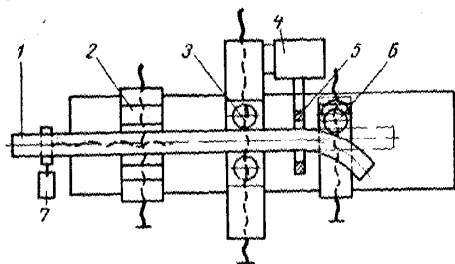


Рис. 30. Схема устройства для гибки труб:
1 — труба; 2 — каретка с зажимным устройством для подачи трубы вдоль оси; 3 — направляющие ролики; 4 — высокочастотный трансформатор; 5 — индуктор; 6 — нажимной ролик; 7 — механизм привода каретки 2.

и прутков. Схема одного из устройств для гибки труб приведена на рис. 30. Нагрев и гибка осуществляются здесь непрерывно последовательным методом при дви-

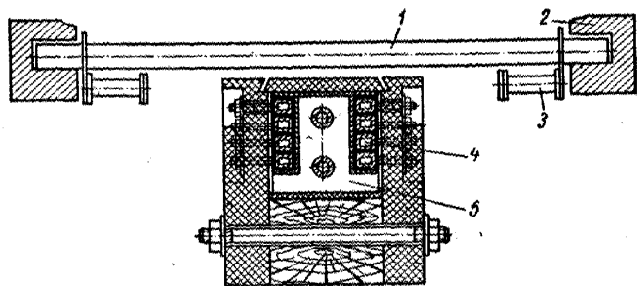


Рис. 31. Схема нагревателя для местного нагрева прямоугольных заготовок:

1 — нагреваемые заготовки; 2 — направляющие, поддерживающие конец заготовки; 3 — цепь, транспортирующая заготовки в плоскости перпендикулярно чертежу; 4 — индуктор; 5 — магнитопровод.

жении заготовки сквозь индуктор. За индуктором установлен ролик, придающий трубе требуемую форму. Для продольного перемещения трубы служит каретка. На каретке установлено зажимное устройство, которое за-

хватывает за конец трубы. Каретка перемещается ходовым винтом.

В автоматической линии для изготовления зубьев бороны заготовки прямоугольного сечения длиной 500 мм опираются концами на параллельных направляющих (рис. 31). Две цепи Галля, проходящие рядом с направляющими, подают заготовки непрерывным потоком к прессу для фрезерки их на две равные части. Для облегчения процесса резки узкие зоны в средней части должны быть нагреты до температуры 900—1000°С. Нагрев осуществляется индуктором с Т-образным железным сердечником. Индуктор установлен под серединой заготовок вдоль направления их перемещения. Одновременно нагревается 15 заготовок. Сердечник обеспечивает локализацию нагрева в пределах узкой зоны.

Зональный нагрев прутков применяется в кузнечных цехах для облегчения резки их на мерные заготовки и устранения трещинообразования при этой операции.

За последнее время на трубозлектросварочных станках и станах, изготавливающих бесшовные трубы, вместо трубоотрезных станков при разделении труб на мерные куски нашли применение труборазрывные станки, в которых для облегчения и ускорения процесса разделения используется местный индукционный нагрев. Устройство для местного нагрева прутков и труб для этих операций описано ниже, в гл. III.

III. ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

12. ИНДУКЦИОННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ В КУЗНЕЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В брошюре невозможно привести описание даже основных типов установок для сквозного индукционного нагрева, находящихся в промышленной эксплуатации. Мы рассмотрим несколько конструкций различного типа для иллюстрации того, как общие соображения по выбору методов нагрева и схем нагревательных устройств, приведенные выше, находят практическое применение при решении конкретных задач.

Некоторые из описываемых устройств могут служить примером новых конструктивных решений при построении устройств для индукционного нагрева в технологических процессах, где он применялся уже и ранее. Другие показывают, как индукционный нагрев применяется для усовершенствования технологических процессов, в которых ранее использовались другие способы нагрева.

Индукционные нагреватели с толкателями. Различные конструкции кузнечных индукционных нагревателей методического типа с толкателями уже описаны в литературе [1, 4]. Однако за последнее время в связи с ростом производительности нагревателей, а также увеличением диаметра нагреваемых заготовок в устройство и компоновку нагревателей внесены значительные изменения. Основное из них — выделение конденсаторных батарей в самостоятельный узел.

Раньше при малых мощностях нагревателей конденсаторную батарею удавалось разместить в корпусе нагревателя под индуктором и механизмами для подачи заготовок. В настоящее время при компоновке нагре-

вателей большой мощности, чтобы не увеличивать габаритов оборудования, устанавливаемого в цеху, конденсаторные батареи располагают в подвалах под нагревателями. Общий вид одного из нагревателей нового

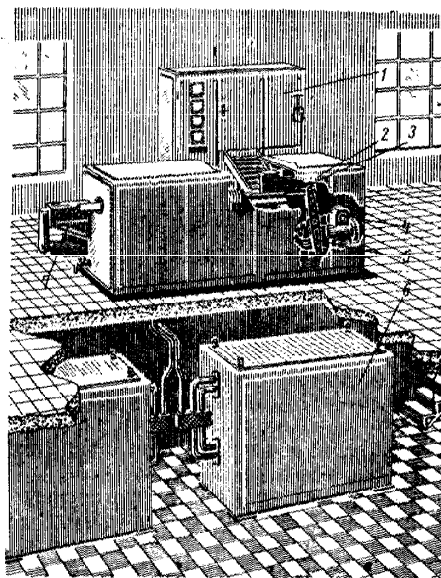


Рис. 32. Методический нагреватель кузнечных заготовок:

1 — шкаф управления нагревателем; 2 — нагреватель; 3 — толкатель заготовок; 4 — редуктор с кривошипом, приводящий кулису 5; 5 — кулиса, перемещающая толкатель 3; 6 — батарея конденсаторов; 7 — механизм, извлекающий заготовки из нагревателя.

типа приведен на рис. 32. Такая компоновка нагревателя делает его более универсальным, так как нагреватели различной мощности отличаются главным образом размерами конденсаторной батареи. Остальные элементы его могут в довольно широких пределах оставаться неизменными. Кроме того, если конденсаторная батарея расположена в подвале, можно индуктор

и механизмы подачи заготовок располагать на меньшем расстоянии от пола.

Благодаря этому облегчается подача заготовок в нагреватель, упрощается обслуживание его механизмов. Вместе с тем удешевляется и упрощается конструкция батарей конденсаторов, так как в подвале конденсаторы устанавливаются на открытых стеллажах. Для них не требуется закрытых шкафов с большим числом дверей и блокировок. Единственная дверь в подвал просто запирается на ключ. Доступ к батарее имеет только квалифицированный персонал электриков. В подвальном помещении шинопроводы и изоляторы лучше защищены от попадания пыли.

При параллельном питании группы нагревателей от общей генераторной подстанции применяется новый способ регулирования темпа выдачи нагреваемых заготовок.

Раньше для изменения мощности, передаваемой заготовке, применялись регулируемые автотрансформаторы. Теперь индукторы снабжаются отпайками. Кабель от питающей подстанции подается на одну из этих отпайек. Таким образом, напряжение на колебательном контуре, а следовательно, и мощность, подводимая к заготовкам, может в известных пределах изменяться. В этой схеме не всегда полностью используется конденсаторная батарея. Зато не требуется изготавливать специальный высокочастотный регулируемый автотрансформатор.

Изменены также механизмы, используемые для перемещения заготовок сквозь индуктор. Ранее применявшиеся пневматические или пневмогидравлические толкатели часто заменяют механическими толкателями.

Пневматические толкатели не обеспечивают равномерного проталкивания тяжелых заготовок. Гидравлические и пневмогидравлические толкатели требуют высокой культуры изготовления и эксплуатации. Механические толкатели оказались наиболее простыми для изготовления и обслуживания. В этих устройствах привод толкателя, перемещающего заготовки, осуществляется:

1) зубчатой рейкой, приводимой в движение асинхронным электродвигателем посредством червячного редуктора (рис. 14). После окончания толкания направ-

ление вращения электродвигателя изменяется на обратное и толкатель возвращается в исходное положение. Двигатель отключается до получения команды для следующего толкания от управляющего работой нагревателя реле времени;

2) с помощью кривошипного или кулсного механизма (рис. 32)¹. В этом случае толкатель непрерывно осуществляет возвратно-поступательное движение. Число ходов в минуту выбирается так, чтобы обеспечить необходимый темп выдачи заготовок. Для возможности регулирования темпа выдачи в приводе используется мотор постоянного тока. Реле времени в данной схеме не нужно.

Конструкция второго типа более надежна в эксплуатации. Однако может быть использована в том случае, когда темп выдачи не превышает 10 сек.

Индукционные нагреватели с секционированными индукторами. Нагреватель с секционированным индуктором для заготовок диаметром 23 мм и длиной 445 мм показан на рис. 33. Индуктор состоит из 10 секций, которые разбиты на три группы. В первой по ходу заготовки группе три секции, во второй также три секции, а в третьей четыре секции. Все секции в группах соединены последовательно. Первую группу питают два генератора мощностью 150 квт. Каждая из 2 остальных групп получает питание от одного генератора 150 квт. Частота тока всех генераторов 10 000 гц.

Таким образом, в первых трех секциях температура на поверхности заготовки быстро поднимается до 1100—1150° С. При дальнейшем движении заготовки подводящая к ней удельная мощность уменьшается таким образом, чтобы температура на поверхности поддерживалась около достигнутого уровня. За счет большого градиента температуры между поверхностью и сердцевиной происходит быстрое выравнивание температуры по сечению.

Заготовки, подлежащие нагреву, укладываются в приемный бункер. Отсюда они поднимаются до одной цепным элеватором и подаются на ролики, внутри которых установлены постоянные магниты. Благодаря

¹ Нагреватель разработан в НИИ ТВЧ инженерами Шуккелем Ю. Ф. и Белоусовым В. И.

наличие магнитов возрастает сила сцепления между роликом и заготовкой, и последняя без проскальзывания попадает в первую секцию индуктора.

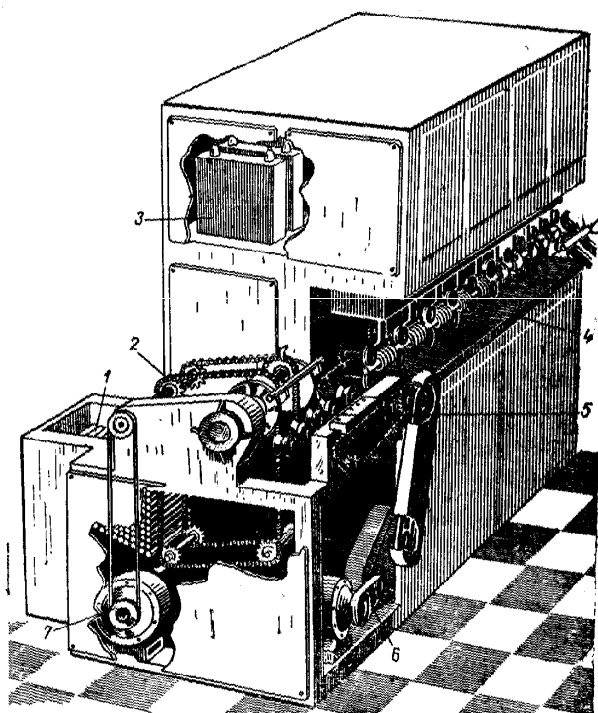


Рис. 33. Нагреватель с секционированным индуктором:
1 — магазин с заготовками; 2 — цепной элеватор, подающий заготовки из магазина 1 на ролики 5; 3 — батарея конденсаторов; 4 — секция индуктора; 5 — магнитные ролики, подающие заготовки в индуктор; 6 — привод роликов; 7 — привод элеватора.

Между секциями индуктора кроме поддерживающих роликов для увеличения сцепления заготовки с роликами установлены также и прижимные ролики. Магнитные ролики здесь использованы быть не могут, так как заготовка теряет при нагреве магнитные свойства.

После выхода из последней секции индуктора заготовки с помощью рычажного механизма сбрасываются на приемный транспортер ковочных валцов. Производительность нагревателя — 180 заготовок в минуту, т. е. 1500 кг нагретого металла в час.

Применение этого нагревателя взамен пламенной печи позволило в два раза повысить производительность ковочных валцов и в два раза повысить стойкость штампов¹.

Нагрев заготовок под резку на ножницах. Для облегчения резки на ножницах и предотвращения трещинообразования в этом процессе прутки перед резкой нагреваются обычно в пламенных печах до температуры 300—600° С. Однако для резки совершенно не требуется нагревать прутки по всей длине. Достаточно нагревать узкие пояски в зонах, где будет производиться разрезка.

Кроме того, для успешной резки нет необходимости прогревать прутки равномерно по всему сечению. Вполне допустим значительный перепад температуры между поверхностью и сердцевиной.

Для осуществления местного нагрева с большим перепадом температур с успехом используются токи высокой и промышленной частоты.

Установки для индукционного нагрева под резку обычно осуществляются по одной из двух схем:

1) если прутки имеют небольшие поперечные сечения и необходимая часовая производительность сравнительно мала, так что нагрев может быть осуществлен не более чем в двух-трех индукторах, они могут быть установлены непосредственно в линии с ножницами. Таким образом, на одном и том же прутке часть зон подвергается нагреву, в то время как по ранее нагретым зонам производится резка. Однако такая схема хотя и является наименее сложной, но имеет существенный недостаток. При резке на ножницах прутки испытывают удары и часто повреждают индукторы;

2) при больших производительностях и значительных сечениях прутков для обеспечения требуемой

¹ Нагреватель разработан инженерами НИИ ТВЧ Безменовым Ф. В. и Андреевым В. К., а также работниками завода «Свет шахтера» Сериковой Г. В., Ордановским А. И. и Пудакским Е. Т.

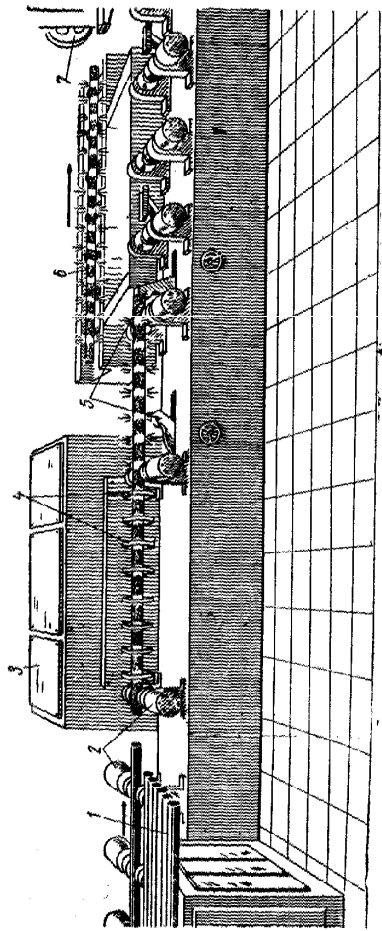


Рис. 34. Устройство для нагрева заготовок под резку на ножницах:
1 — магазин с прутками; 2 — рольганг; 3 — батарея конденсаторов; 4 — индукторы; 5 — убранные упоры;
6 — нагретый прутки; 7 — ножницы.

скорости нагрева необходимо осуществлять нагрев одновременно в большом числе индукторов.

При переходе к другой длине отрезаемых заготовок индукторы надо переставлять. В этих условиях оказываются более удобными устройства, в которых нагрев и резка производятся раздельно. Одна из установок такого типа для нагрева прутков длиной до 6 м показана на рис. 34¹.

Пачка прутков, подлежащих нагреву и резке, укладывается в магазин. Отсюда прутки по одному сбрасываются на рольганг для подачи в индукторы, расставленные на расстояниях, равных длине неразрезаемых заготовок вдоль рольганга на участке длиной 3 м.

Каждый индуктор состоит из нескольких витков прямоугольной медной трубки. Индукторы подсоединяются к токоподводящим шинам, проходящим вдоль над рольгангом. Они могут переставляться по этим шинам в соответствии с длиной заготовок, на которые нужно резать прутки. За последним индуктором на расстоянии, равном также длине отрезаемой заготовки, установлен первый упор. Далее на расстоянии 3 м установлен еще один упор. Оба упора могут быть убраны с помощью пневматических цилиндров. Когда передний конец заготовки упрется в первый из упоров, индукторы включаются и начинается нагрев.

По истечении определенного промежутка времени по команде реле, управляющего работой установки, отключается нагрев, отводится первый упор и включается рольганг. Заготовка перемещается до второго упора. После этого рольганг снова останавливается. Индукторы включаются и начинается нагрев зон на следующем 3-метровом отрезке прутка. В области зон, находящихся в индукторах, при первом периоде нагрева происходит передача тепла к внутренним слоям прутка. После окончания нагрева второй упор отводится, заготовка выводится из индукторов и перебрасывается на рольганг, подающий ее к ножницам для резки.

Если заготовки, как правило, имеют небольшую длину, не превышающую 2—3 диаметров, не имеет особого смысла осуществлять местный зональный нагрев, так как при небольших расстояниях между индукторами

¹ Разработана инженерами Пукки Л. П. и Дальским Г. Н.

тепло все равно распространяется по всей длине заготовки. В этом случае нагрев заготовок под резкой осуществляется в длинных сплошных индукторах. Таким образом, значительно упрощается работа на установках, так как не требуется осуществлять перестановку индукторов. Если диаметр нагреваемых заготовок больше 60 мм, нагрев может осуществляться как на промышленной, так и на повышенных частотах.

Нагрев током промышленной частоты. Как показано на табл. 1, стальные заготовки диаметром больше 150 мм можно нагревать до ковочной температуры током промышленной частоты. Промышленная частота может быть использована также при нагреве стальных заготовок, если диаметр их больше 50 мм, до температуры, не превышающей точку магнитных превращений, а также для нагрева заготовок из цветных металлов — меди, алюминия.

При нагреве на промышленной частоте не требуется устанавливать специальных высокочастотных мотор-генераторов. На преобразование частот не расходуется дополнительная энергия. Однако несмотря на эти обстоятельства установка для нагрева заготовок на промышленной частоте пока используются достаточно широко только при нагреве цветных металлов.

Благодаря значительным электродинамическим усилиям в индукторах, питаемых током 50 гц, при больших мощностях установок возникает вибрация. Это обстоятельство сильно затрудняет создание надежных конструкций индукторов для нагрева до высоких температур.

Промышленностью не выпускаются устройства, позволяющие плавно или ступенями регулировать на частоте 50 гц мощность, подводимую к заготовке. Поэтому питание этой частотой при нагреве стали используется главным образом в устройствах небольшой удельной мощности для нагрева однотипных деталей, если требуется часто изменять режим нагрева.

Наиболее широко промышленная частота применяется при нагреве гильз, колец и т. п. деталей, которые могут быть использованы замкнутые магнитопроводы (см. п. 2).

В промышленности используются установки двух типов: однофазные и трехфазные. Принципиальной раз-

ницы между устройствами обоих типов нет. В том случае, если требуемая производительность может быть получена при нагреве деталей по одной, используются однофазные устройства. При необходимости одновременно нагревать несколько деталей, используются трехфазные устройства.

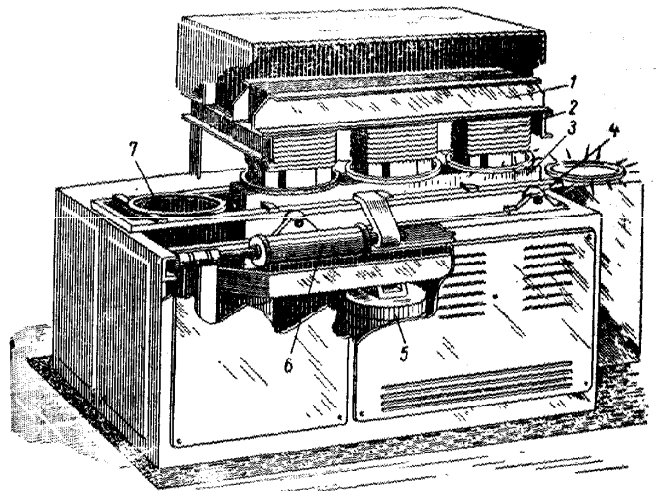


Рис. 35. Установка для нагрева под калибровку венцов маховика автомобильного двигателя:

- 1 — трехсердцевой магнитопровод с обмотками 2; 2 — обмотка; 3 — замыкающее ядро; 4 — транспортер, перемещающий венцы при опущенном ядре 3; 5 — цилиндр, поднимающий ядро 3; 6 — цилиндр, перемещающий транспортер 4; 7 — венец, подаваемый для нагрева.

Мощность рассматриваемых устройств обычно невелика, поэтому симметричность загрузки всех трех фаз при выборе схемы устройства не имеет существенного значения.

На рис. 35 показана трехфазная установка для нагрева под калибровку венца маховика автомобильного двигателя¹. Установка состоит из неподвижного Ш-образного магнитопровода с обмотками на трех его

¹ Разработана инж. Андреевым В. К., НИИ ТВЧ.

стержнях, подвижного замыкающего ярма, расположенного под магнитопроводом, а также шагового транспортера для перемещения заготовок.

Замыкающее ярмо и шаговый транспортер перемещаются пневматическими цилиндрами.

Процесс нагрева венца продолжается 60 сек. При этом венец поочередно устанавливается на каждый из трех стержней магнитопровода и находится на них по 20 сек. Перемещает венцы шаговый транспортер. Установка венцов на стержни осуществляется при подъеме замыкающего ярма. В процессе нагрева три венца удерживаются на ярме в приподнятом положении. Венец подлежащий нагреву, подается на приемный стол в левой части устройства. По истечении определенного времени установка отключается. Замыкающее ярмо опускается вместе с тремя лежащими на нем венцами вниз. После этого шаговый транспортер смещает на один шаг вправо все четыре венца — вновь поданные для нагрева и три, находящиеся против стержней магнитопровода.

При этом один из венцов, достигший заданной температуры, выдается из нагревателя. После этого замыкающее ярмо поднимает три венца вверх, одевает их на сердечники магнитопровода, и процесс нагрева продолжается дальше.

13. ИНДУКЦИОННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ В ПРОКАТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В прокатном производстве индукционный нагрев применяется в настоящее время в следующих технологических операциях.

1. *Подогрев заготовок, поверхность которых охлаждается во время первых операций процесса прокатки.* При нагреве внешними источниками тепла, как, например, в печах сопротивления, газовых или мазутных, интенсивность передачи тепла в заготовку тем больше, чем больше разность температур между поверхностью, излучающей тепло, и поверхностью заготовки. При росте температуры поверхности заготовки скорость передачи тепла резко снижается. Поэтому пламенные печи для подогрева заготовок, несколько остывших во время первых операций прокатки, имеют значительную длину. Можно уменьшить длину печей, если поднять температу-

ру. Однако при этом увеличивается количество окислы, образующейся на поверхности заготовки. Индукционные нагреватели для нагрева поверхности заготовок имеют длину в 3—5 раз меньшую, чем печи. В них совершенно не образуется окислы.

2. *Нагрев заготовок к станам периодического проката.* Станы, служащие для создания профильных заготовок, называются периодическими. Станы периодического проката отличаются обычно высокой производительностью. Для работы их весьма важно иметь равномерный нагрев заготовок по длине и минимальную окислы на их поверхности.

Индукционный нагрев позволил легко удовлетворить все вышеуказанные требования. Поэтому большинство станов периодического проката в нашей стране оборудовано индукционными нагревателями. Замена пламенных печей индукционными нагревателями позволила в отдельных случаях повысить производительность станов в два раза. В два раза повысилась стойкость инструмента.

Обычно станы периодического проката обрабатывают заготовки в небольшом диапазоне длин и диаметров. Нагревательные устройства их требуются редко перестраивать. Если диаметр заготовки и производительность почти не меняются, можно легко подобрать и поддерживать оптимальный режим нагрева. В связи с этим именно на индукционных нагревателях к станам периодического проката получен минимальный расход электроэнергии на тонну нагреваемого металла.

3. *Рекристаллизационный отжиг прутков после прокатки.* Применение индукционного нагрева в данном случае позволило значительно упростить и ускорить процесс рекристаллизации. Ранее этот процесс осуществлялся в пламенных печах и продолжался 20 часов. Для уменьшения обезуглероживания поверхности прутки помещались в стальные трубы. Торцы труб заваривались. Несмотря на это 1% прутков приходилось шлифовать для снятия обезуглероженного слоя. Большинство операций осуществлялось вручную или при ручном управлении.

При индукционном нагреве рекристаллизацию удается провести за несколько секунд. Установки для рекристаллизации полностью автоматизированы.

4. **Термообработка проката.** В последние годы проведены экспериментальные работы по упрочнению проката различного профиля при индукционном нагреве. При термообработке арматурной стали, используемой при производстве железобетона, удалось повысить ее прочность на 25—30%.

Термообработка газопроводных труб позволит уменьшить толщину их стенок. Таким образом, можно предполагать, что широкое внедрение индукционной термообработки проката позволит значительно уменьшить расход стали в производстве различных металлических и железобетонных конструкций.

Некоторые из нагревателей, используемых в прокатном производстве, уже описаны в первых изданиях Библиотечки высокочастотника-термиста. Здесь мы приводим описание только новых конструкций, построенных за последние годы.

Промежуточный подогрев труб в линии трубопрокатного агрегата 30—102. Нагрев заготовок до температуры 1200°С перед первой операцией прокатки — прошивкой осуществляется в газовых печах. После прошивного и непрерывного стана у полученных трубных заготовок длиной 20 м, диаметром 108 мм с толщиной стенки от 3 до 8 мм подрезаются концы.

Во время прохождения упомянутых операций в зависимости от случайных колебаний, их продолжительности трубная заготовка охлаждается до температуры 700—400°С.

Для осуществления следующих операций — калибровки или редуцирования, заготовки должны быть подогреты до 900—1000°С. Подогрев осуществляется в одном из ручьев двухручьевого индукционного нагревателя (рис. 36)¹. Один ручей его расположен в линии калибровочного, а второй — в линии редуцирующего станков. В каждом ручье в шкафах, установленных на общей раме, смонтированы 16 индукторов. Перед первым, а также между восьмым и девятым индуктором расположены ролики, ведущие заготовку синхронно со скоростью первых клетей станков. Между остальными индукторами расположены холостые поддерживающие

ролики. В подвале под индукторами располагаются восемь конденсаторных батарей, по одной батарее на каждую пару индукторов.

Так как редуцируемый и калибровочный станы работают поочередно, конденсаторные батареи с помощью рубильников подключаются к индукторам того или иного ручья. Каждая пара индукторов вместе с подключенной к ним конденсаторной батареей образуют колебательный контур, питаемый от генератора мощностью 1500 квт 2500 гц. При полной нагрузке нагревателя,

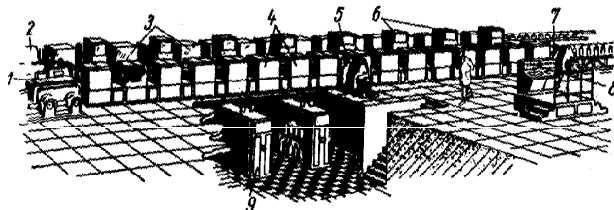


Рис. 36. Двухручьевого нагреватель в линии трубопрокатного агрегата 30—102:

1 — калибровочный стан; 2 — редуцирующий стан; 3 — индукторы в ручье редуцирующего стана; 4 — индукторы в ручье калибровочного стана; 5 — ролики, перемещающие трубную заготовку в нагревателе; 6 — шкафы автоматического управления процессом нагрева; 7 — ролики, задающие трубную заготовку в нагревателе; 8 — пульт управления нагревателем; 9 — батарея конденсаторов.

когда идут трубы с максимальной толщиной стенки и с минимальной начальной температурой 400°С, одновременно должны работать восемь высокочастотных генераторов мощностью 1500 квт. Максимальная мощность, потребляемая нагревателем, составляет 12 000 квт. Генераторы и аппаратура управления их работой расположены в отдельном помещении — машинном зале. Всего здесь установлено девять генераторов, один из них резервный.

Вдоль каждого ручья между индукторами установлены фотопирометры. Эти пирометры, измеряя температуру трубы на входе в соответствующие индукторы, изменяют мощность, отдаваемую питающим их генератором, таким образом, чтобы температура трубной заготовки по выходе ее из последнего индуктора всегда лежала в заданных пределах.

¹ Нагреватель разработали инженеры Шамов А. Н., Бодажков В. А., Болтин В. Г., Смирнов В. М. и Шуманский Ф. И.

Двухчастотный нагреватель заготовок к стану 120
 Стан и нагреватель к нему построены в 1958 г. Электро-
 стальским заводом тяжелого машиностроения¹. На
 стане прокатываются заготовки диаметром 60, 90
 120 мм, длиной 1600—2000 мм. Переналадка его осуще-
 ствляется очень редко. Поэтому применение двухчастот-
 ного нагрева в данном случае вполне оправдано.

Применяются два способа двухчастотного нагрева
 заготовок:

1) вначале заготовка помещается в индуктор, питае-
 мый током промышленной частоты. После нагрева до
 750—800°С она передается во второй индуктор и догре-
 вается до заданной температуры;

2) нагрев заготовки осуществляется в одном индук-
 торе, который сначала подсоединяется к сети 50 гц,
 потом к источнику тока высокой частоты.

Каждый способ имеет свои преимущества и недо-
 статки. При первом способе нагрева упрощается сило-
 вая электрическая схема установки. При втором — тре-
 буются более простые механизмы для транспортирова-
 ния заготовок.

В нагревателе к стану 120 для упрощения механиз-
 мов принят второй способ нагрева.

Нагреватель (рис. 37) состоит из прямолинейной
 приводного рольганга, транспортирующего заготовки,
 четырех двухчастотных индукторов. Индукторы распо-
 ложены параллельно рольгангу по два с каждой сто-
 роны от него.

Под индукторами в подвале смонтированы 2 бата-
 реи конденсаторов 50 гц и 2 батареи конденсаторов
 2500 гц.

Питание индукторов нагревателя осуществляется
 током частотой 1000 гц от двух генераторов мощностью
 500 квт 1000 гц; током частотой 50 гц от двух трансфор-
 маторов мощностью 1000 квт.

Через каждые две минуты по рольгангу к нагре-
 телю подаются заготовки.

С помощью специальных механизмов, установленны-
 у рольганга, заготовки подаются по очереди в один из

четырех индукторов. После подачи заготовки индуктор
 подключается к сети 50 гц. Через две минуты заготовка
 подается в следующий индуктор. Этот индуктор также
 подключается к сети 50 гц. После истечения следующих

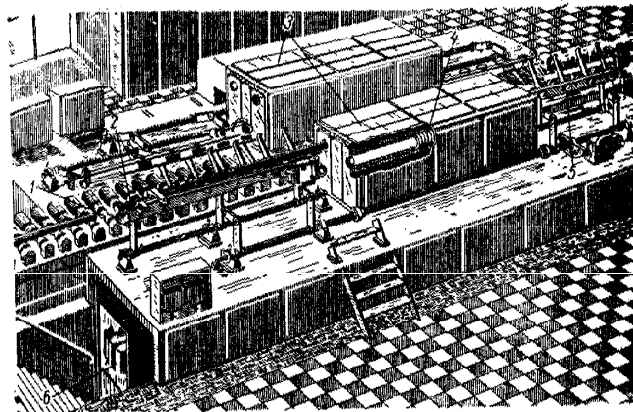


Рис. 37. Двухчастотный нагреватель к стану 120:
 1 — рольганг, подающий заготовки к нагревателю; 2 — механизмы, рас-
 пределяющие заготовки по индукторам; 3 — корпуса, в которых установ-
 лены индукторы; 4 — двухчастотный индуктор; 5 — механизмы, извле-
 кающие заготовки из индукторов и возвращающие их на рольганг 1 для
 транспортировки к стану 120; 6 — батарея конденсаторов.

двух минут заготовка поступает в третий индуктор. По-
 следний подключается к сети 50 гц. В этот же момент
 первый индуктор отключается от сети 50 гц и подклю-
 чается к генератору 1000 гц. Затем, когда заготовка по-
 ступает в четвертый индуктор, он подключается к сети
 50 гц, а второй индуктор переключается на питание то-
 ком частотой 1000 гц.

Таким образом, во время работы нагревателя два ин-
 дуктора всегда подключены к сети 50 гц, а два к гене-
 раторам 1000 гц. Каждая заготовка 4 мин нагревается
 током 50 гц и 4 мин током 1000 гц. При подаче в индук-
 тор новых заготовок нагретые заготовки выталкиваются
 из них и поступают снова на центральный рольганг для
 подачи к прокатному стану. Производительность на-
 гривателя 6000 кг/ч. Расход электроэнергии 420 квт·ч
 на тонну нагреваемых заготовок.

¹ Проект нагревателя разработан инженерами Трофим-
 вым В. С., Бодажковым В. А., Болтиным В. Г., Авдеевым К. Я.,
 Пукки Л. П.

Установка для рекристаллизационного отжига стального проката¹. Рекристаллизационному отжигу при температуре 720—750° С для снятия наклепа после прокатки и волочения подвергаются стальные прутки диаметром от 10 до 50 мм и длиной от 4 до 10 м.

Для проведения рекристаллизации при индукционном нагреве построены автоматизированные устройства. Схема одного из них приведена на рис. 38. Пачки прутков весом 2—3 т укладываются на наклонный цепной транспортер. При перемещении цепей прутки распределяются на них в один ряд, поступают на наклонный лоток и скатываются до отсекающего механизма. Последний пропускает прутки по одному на непрерывно вращающиеся магнитные ролики. По роликам прутки перемещаются вдоль оси и проходят сквозь четыре индуктора, расположенных друг за другом в одну линию. Длина индуктора 1000 мм.

Чтобы избежать проскальзывания прутков между индукторами, установлены поддерживающие и прижимные ролики. При выходе из последнего индуктора нагретый пруток поступает на качающиеся ролики. В тот момент, когда пруток полностью выходит из индуктора, качающиеся ролики опускаются. Пруток сбрасывается в приемное устройство для охлаждения на воздухе. Под индукторами расположена батарея конденсаторов.

Установка получает питание от генератора 250 квт 2500 гц и имеет производительность до 1500 кг/ч. Для вращения роликов, подающих прутки сквозь индукторы используется регулируемый привод. Скорость перемещения прутков в зависимости от диаметра прутков изменяется от 2 до 40 см/сек. Таким образом, процесс рекристаллизации продолжается не более 3—5 мин.

14. РАЗЛИЧНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Установка для сушки изоляций якорей электрических машин. Ранее сушка изоляции электрических машин после пропитки их водноэмульсионными лаками обычно осуществлялась в шкафах, обогреваемых печами сопротивления. Благодаря медленной передаче

¹ Разработан инж. Белоусовым В. Н., Щуккелем Ю. Ф. Давидкевич И. П. НИИ ТВЧ.

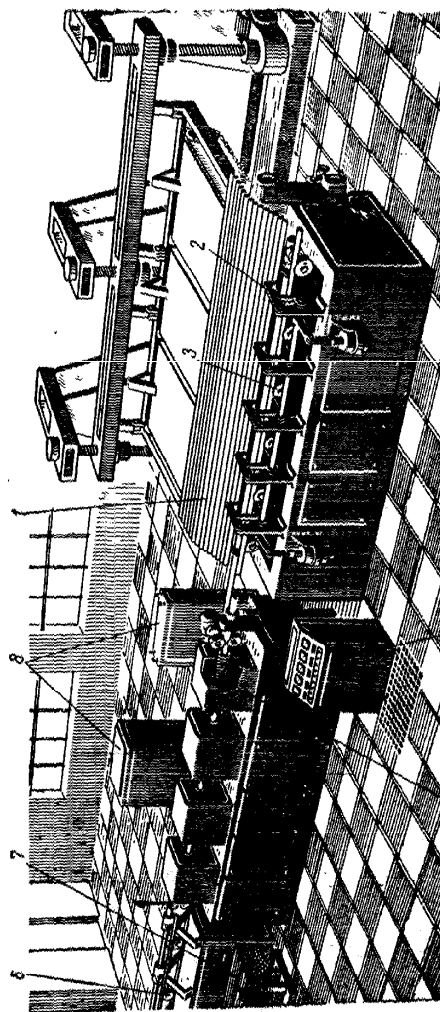


Рис. 38. Установка для рекристаллизационного отжига стального проката: 1 — магazin для заготовок; 2 — отсекающий, пропускающий заготовки по одной на ролик; 3 — ролик, подающий заготовку в индуктор; 4 — пункт управления установкой; 5 — индуктор; 6 — наклонно вращающиеся ролики, сбрасывающие заготовки в приемное устройство; 7, 7' — приемное устройство для охлаждения заготовок; 8 — шкафы управления.

тепла якорям от окружающего воздуха, а также теплопроводностью к центру, процесс сушки занимал много времени. Например, якоря автомобильных стартеров и генераторов проходили сушку в течение 13—15 ч.

Были попытки осуществить процесс сушки путем пропускания тока непосредственно по обмоткам якорей и дополнительного обогрева их инфракрасным облучением. Однако этот процесс оказался малопродуктивным и неудобным. В 1960—1963 гг. построены и пущены в эксплуатацию несколько установок для сушки якорей при индукционном нагреве током частотой 2500 гц. При таком способе нагрева процесс сушки идет много быстрее, так как тепло генерируется непосредственно в железе якоря, быстро проникает внутрь и передается в обмотку.

Время сушки сокращается в несколько раз и составляет для роторов автомобильных генераторов и стартеров 25—30 мин. Во время сушки ротор нагревается до 170—180° С.

В настоящее время находятся в промышленной эксплуатации установки двух типов:

1) установка, в которую одновременно на специальной подвеске загружаются несколько десятков роторов. При установке на подвеске оси роторов располагаются вертикально. Индуктор образован двумя концентрическими спиралями из медных трубок, из которых одна находится в другой. В промежутках между спиралями помещаются роторы, подлежащие сушке. Индуктор помещен в кожух, который после установки подвески с якорями закрывается крышкой. После этого включается нагрев. Установки такого, так называемого садового типа и используются для сушки роторов при серийном производстве;

2) в поточно-массовом производстве используются конвейерные сушильные установки (рис. 39)¹.

Роторы с помощью специальных подвесок закрепляются на цепи Галля. Эта цепь огибает несколько звездочек, расположенных у обоих концов установки. При движении цепи роторы несколько раз перемещаются от одного конца установки к другому и обратно.

¹ Установка разработана и построена на заводе АТЭ-1 под руководством инж. Пукки Л. П., Дорофеевой Н. И. и Пастуховой А. Я.

Во время этого движения роторы находятся в электромагнитном поле щелевых индукторов. Установка и снятие роторов осуществляется вручную рабочим, стоящим у одного из концов устройства. Здесь же расположен приводной механизм, который перемещает

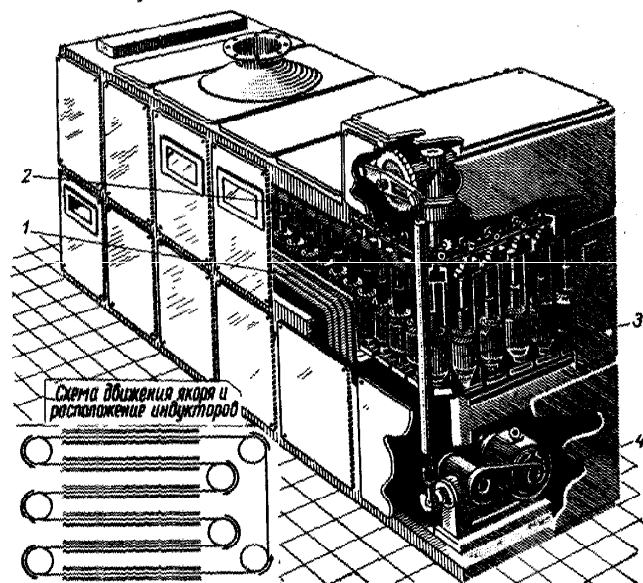


Рис. 39. Устройство для сушки изоляции якорей электрических машин:

1 — щелевой индуктор; 2 — транспортирующая цепь; 3 — якорь; 4 — механизм привода цепи.

цепь с роторами. Скорость перемещения может быть изменена в зависимости от требуемого режима сушки.

В нижней части под индукторами расположены конденсаторная батарея и система охлаждения индукторов и конденсаторов.

Установка получает питание от генератора мощностью 100 квт 2500 гц. Производительность при сушке роторов автомобильных генераторов и стартеров до 500 шт/ч.

Станок для разрыва труб на мерные длины. В настоящее время на большинстве трубоэлектросварочных станков разрезка труб, изготавливаемых из стальной ленты, осуществляется механическими трубоотрезными станками. Отрезка производится без нарушения процесса сварки во время движения трубы.

Трубоотрезные станки помещаются в линии стана за сварочным узлом. Подвижная каретка станка вместе с установленной на ней головкой с режущими дисками в процессе резания перемещается вместе с трубой. После окончания резки головка быстро возвращается в исходное положение, чтобы начать отрезку следующего куска трубы. Этот процесс имеет два существенных недостатка: необходимость частой смены изношенных дисков и ограниченную скорость резания.

Малая скорость резания часто лимитирует производительность трубоэлектросварочных станков, а также не позволяет отрезать трубы малой длины. При большой скорости сварки труб подвижная режущая головка проходит большой путь вместе с трубой. Она не успевает вернуться в исходное положение, чтобы начать отрезку следующего куска трубы, так как ускорение и скорость головки ограничены ее массой и мощностью приводных механизмов, которую нельзя безгранично увеличивать.

В 1960—1963 гг. разработан новый способ разделения труб на мерные отрезки. На трубе индукционным способом нагревается узкая кольцевая полоска. При растяжении трубы она легко разделяется в нагретой зоне. Для использования разработанного способа в трубоэлектросварочных станках построены специальные трубоотрезные станки (рис. 40)¹.

Подвижная головка перемещается по специальной станине вдоль оси трубоэлектросварочного стана. На головке смонтированы узкий высокочастотный индуктор, способный нагревать на трубе полосу шириной всего 10—12 мм, и питающий его трансформатор. С обеих сторон от индуктора установлены два кулачковых патрона, с помощью которых головка зажимает трубу. На головке расположен также пневматический цилиндр для растяжения участка трубы, находящегося между указанными кулачковыми зажимами.

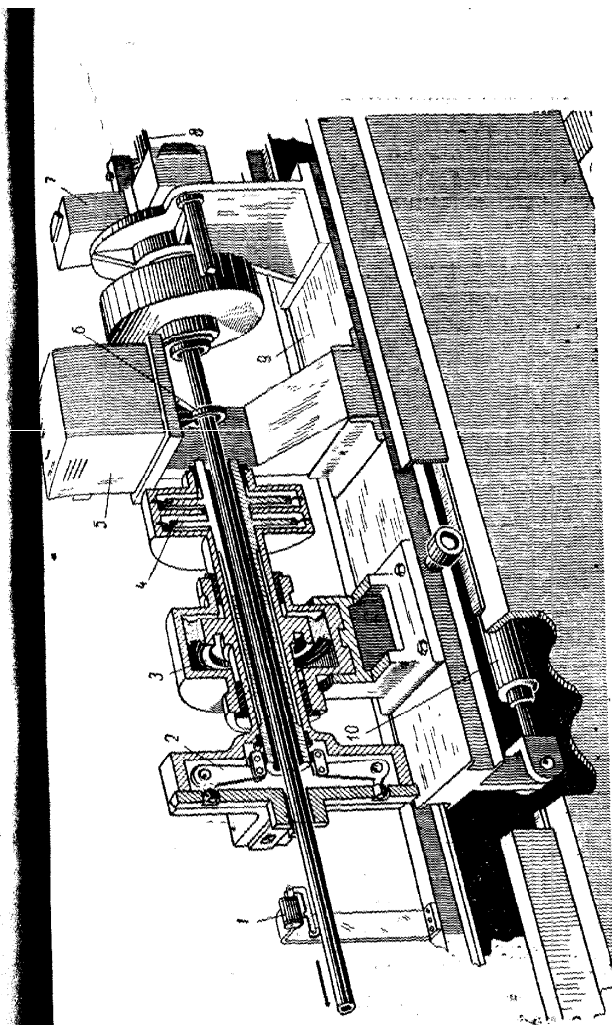


Рис. 40. Станок для разрыва труб при индукционном нагреве:
1 — кулачковый выключатель, включающий зажимы 2, цилиндр 4 и цилиндр 10; 3 — зажимной патрон левый;
4 — пневматический цилиндр; 5 — высокочастотный трансформатор; 6 — индуктор, режущий трубу; 7 — индуктор зажимного патрона; 8 — труба; 9 — каретка; 10 — направляющая для перемещающейся каретки.

¹ Конструкция разработана инж. Громовым Н. Н. НИИ ТВЧ.

Труборазрывной станок работает следующим образом: в тот момент, когда подвижная головка находится на станине в крайнем положении против направления движения трубы, передний конец трубы, воздействуя на концевой выключатель, приводит головку в движение в направлении хода трубы. Одновременно с этим труба зажимается кулачковыми патронами. Включается нагрев, а также цилиндр, растягивающий трубу. Индуктор в течение нескольких секунд нагревает узкое кольцо на трубе до $1200-1300^{\circ}\text{C}$, и труба разрывается.

Применение индукционного нагрева позволяет значительно сократить время, необходимое на разделение труб, а вместе с тем и увеличить производительность труборазрывных станков. Мощность высокочастотной установки, питающей труборазрывной станок для труб диаметром $20-102\text{ мм}$, составляет 100 кВт , частота тока 2500 гц . Кроме труборазрывных станков индукционный нагрев применяется также и в трубоотрезных станках, на которых трубы отрезаются пилами. Индукционный подогрев облегчает работу режущего инструмента — в данном случае пилы, а также значительно ускоряет процесс резки.

Нагрев полосовой трансформаторной стали для сушки защитного покрытия. Применение индукционного нагрева позволяет упростить процесс нанесения защитного покрытия при производстве полосовой трансформаторной стали. Полосовая трансформаторная сталь после прокатки свертывается в рулон и подается в колпаковые печи для обжига при температуре 1000°C . Для предотвращения сваривания между собой соседних витков рулона на полосу перед отжигом наносится защитное покрытие. Это покрытие образуется из водной суспензии гидрата окиси магния и хлористого натрия, распыляемой с помощью сжатого воздуха. Чтобы целостность покрытия не нарушалась при прохождении полосы по направляющим роликам и при свертывании ее в рулон, полоса должна быть сразу высушена. В процессе производства стальная полоса перемещается в агрегатах в агрегат и проходит различные участки технологического пути — то в горизонтальной, то в вертикальной плоскости. Для равномерности защитного покрытия оно должно наноситься при вертикальном расположении поверхности ленты.

Поэтому для нанесения и сушки защитного покрытия установлена специальная башня (рис. 41)¹. Полоса поступает на нижний ролик башни в горизонтальной плоскости и, обогнув этот ролик, направляется вверх. Над

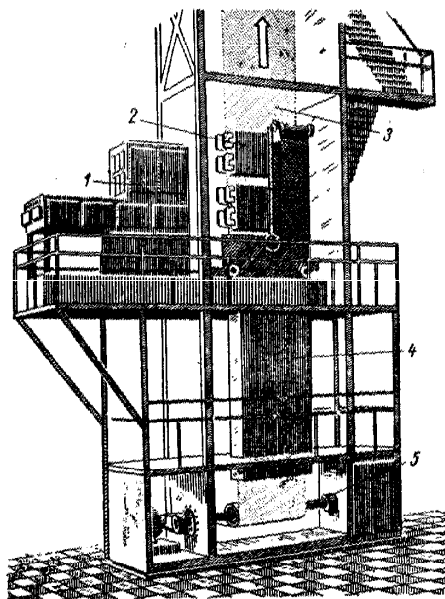


Рис. 41. Установка нанесения и сушки защитного покрытия при производстве полосовой трансформаторной стали:

1 — корпус, в котором установлены конденсаторы и понижающий трансформатор; 2 — индуктор; 3 — ленточный нагреватель; 4 — камера, в которой наносится защитное покрытие; 5 — ролик, направляющий стальную полосу вверх.

роликом расположена камера нанесения защитного покрытия. Затем лента поступает в индукторы для нагрева и сушки нанесенного покрытия. Сушка должна быть завершена раньше, чем полоса достигнет верхнего ролика

¹ Устройство для нагрева полосы разработано сотрудниками НИИ ТВЧ Шуккелем Ю. Ф., Пейсаховичем В. А., и Соловьевым Н. П.

башни, обогнув который, снова направляется вниз для намотки в рулон. Применение индукционного нагрева в данном случае позволяет осуществить процесс сушки при сравнительно небольшой высоте башни.

При нагреве внешним источником тепла длина сушильной камеры становится столь большой, что башню необходимой высоты вообще невозможно практически разместить в цеху. Поэтому ранее до применения индукционного нагрева ленту приходилось разрезать на отдельные листы, а затем наносить защитное покрытие на листы вручную.

Нагрев полосы для сушки осуществляется поперечным магнитным полем (см. п. 2) на частоте 2500 гц. При прохождении сквозь индуктор полоса нагревается до 200—300° С. Установка рассчитана на нагрев полос толщиной 0,1—0,5 мм и шириной от 500 до 1020 мм. Производительность ее до 25 т ленты в час. За это время испаряется до 500 кг влаги. Мощность генераторной подстанции, питающей установку, 600 квт.

15. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ЗА РУБЕЖОМ

За рубежом в кузнечном и прокатном производствах индукционный нагрев находит все более широкое применение. Так, например, в Польской Народной Республике нагрев кузнечных заготовок на заводе, производящем грузовые автомобили, производится только индукционным способом. В Англии построено несколько кузнечных заводов с индукционным нагревом заготовок. Суммарная мощность нагревателей в одном из этих цехов превышает 20 000 квт. В Германской Демократической Республике и в ФРГ несколько фирм изготавливают различные индукционные нагреватели для кузнечного и прокатного производств.

Большинство нагревателей, которые используются за рубежом, отличаются от принятых у нас главным образом конструктивным оформлением. Эта разница связана с особенностями производства и комплектования. За границей больше используются конденсаторы с соволовым заполнением, а также различные жаростойкие бетоны, керамические изоляционные материалы. В зарубежной литературе и фирменных каталогах приводится описание большого количества различных нагревателей. Здесь мы рассмотрим лишь некоторые из них.

90

Нагреватель фирмы «АЕГ Элотерм» (ФРГ). Этот нагреватель предназначен для нагрева заготовок подшипниковых колец. Он выпускается в четырех модификациях с производительностью от 300 до 1700 кг нагретого металла в час. Заготовки, подлежащие нагреву, засыпаются в вибрационный бункер, установленный в левом конце нагревателя (рис. 42). Отсюда по наклонному желобу они поступают на четыре горизонтальные трубчатые направляющие, проходящие сквозь индуктор. Две крайние из них закреплены неподвижно. Средние направляющие совершают возвратно-поступательное движение вдоль оси индуктора.

При этом они перемещают заготовки по неподвижным направляющим к правому концу индуктора. Здесь заготовки попадают на конец качающегося рычага (рис. 43). При повороте последнего нагретая заготовка извлекается из индуктора. Для передачи заготовок из нагревателя в ковочный агрегат установлен автоматический манипулятор (рис. 42).

Нагреватель фирмы «Асек» (Бельгия). Фирмой «Асек» выпускаются индукционные нагреватели различного типа для нагрева мерных заготовок, прутков, концов заготовок и т. п. На рис. 44 показан нагреватель этой фирмы, предназначенный для нагрева заготовок в атмосфере нейтрального газа. Этот нагреватель построен по схеме, рассмотренной ранее при описании рис. 21.

Нагреватель получает питание от генератора мощностью 300 квт 1000 гц. Производительность его 750 кг нагретого металла в час.

Нагреватель той же фирмы «Асек», предназначенный для концевой нагрева прутков, имеющих длину от 210 до 660 мм, показан на рис. 45.

На общем корпусе установлены три индуктора, три наклонных магазина для заготовок и три механизма подачи их в индукторы. В высокой части корпуса расположены конденсаторные батареи, а также приборы для наблюдения за режимами нагрева и аппаратура схемы автоматического управления нагревом.

Заготовки укладываются в магазины (рис. 46). Нижняя из заготовок захватывается за конец механизма подачи и проталкивается в индуктор. После окончания нагрева упомянутый механизм извлекает заготовку из

91

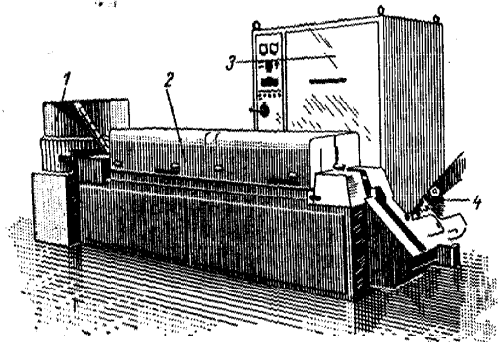


Рис. 42. Общий вид нагревателя фирмы «АЕГ» для нагрева заготовок подшипниковых колец:
1 — вибрационный бункер; 2 — нагреватель; 3 — шкаф с конденсаторами и схемой автоматического управления; 4 — манипулятор, передающий заготовки в ковочный агрегат.

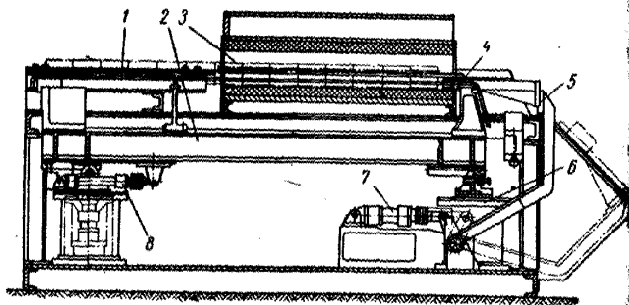


Рис. 43. Схема нагревателя фирмы «АЕГ» (рис. 42):
1 — неподвижные направляющие, поддерживающие заготовки; 2 — рама, на которой закреплены подвижные направляющие; 3 — индуктор; 4 — подвижные направляющие, перемещающие заготовки; 5 — рычаг для выдачи заготовок; 6 — цилиндр, поднимающий раму 2; 7 — цилиндр, управляющий рычагом 5; 8 — цилиндр, перемещающий раму 2 в горизонтальном направлении.

индуктора и сбрасывает ее вниз, в щель, расположенную по оси индуктора, под механизмом подачи. Внутри корпуса находится наклонный лоток, по которому заготовки выкатываются из нагревателя, как показано на рис. 45.

Одновременно могут работать один, два или три индуктора. При работе двух или трех индукторов заго-

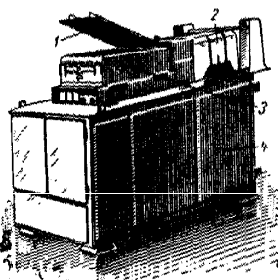


Рис. 44. Нагреватель фирмы «Асек» для нагрева заготовок в атмосфере нейтрального газа:

1 — магазин для заготовок; 2 — индуктор; 3 — корпус, в котором установлен толкатель, подающий заготовки; 4 — батарея конденсаторов.

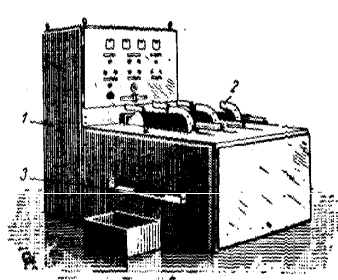


Рис. 45. Нагреватель фирмы «Асек» для нагрева концов заготовок:

1 — корпус нагревателя с конденсаторами, приборами и схемой автоматического управления; 2 — магазин для заготовок; 3 — лоток для выдачи нагретых заготовок.

товки в них подаются по очереди через равные интервалы времени. Этот нагреватель выпускается в двух модификациях на 80 и 32 квт. Первый для нагрева заготовок диаметром 25—30 мм с производительностью 150—250 шт/ч. Второй для заготовок диаметром 14—17 мм с производительностью до 250 шт/ч. Частота тока в обоих случаях 8000 гц.

Нагреватель английской фирмы «Левин». Этот нагреватель предназначен для нагрева заготовок диаметром 175—200 мм, длиной до 850 мм (рис. 47). Заготовки отрезаются на пилах, поэтому торцы их перпендикулярны оси. Индуктор расположен в верхней выступающей над столом части нагревателя. Ось индуктора — вертикальна. Заготовки подаются транспортером на поворотную платформу, установленную на столе. Во время транспортировки ось заготовок расположена в горизон-

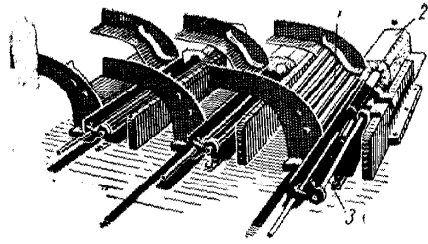


Рис. 46. Магазины и индукторы нагревателя фирмы «Асек»:
1 — магазин с заготовками; 2 — индуктор; 3 — механизм для подачи заготовок в индуктор.

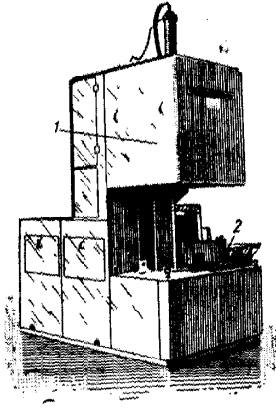


Рис. 47. Нагреватель с вертикальным индуктором фирмы «Левин»:

1 — корпус, в котором расположен индуктор; 2 — поворотная платформа для перевода заготовок из горизонтального положения в вертикальное и подъема их в индуктор.

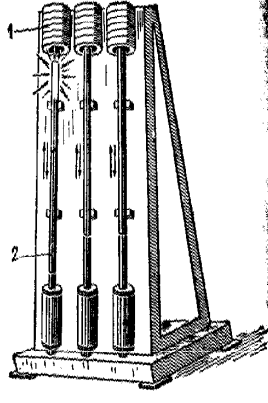


Рис. 48. Схема нагревателя фирмы «АЕГ» для нагрева концов штанг:

1 — индуктор; 2 — подъемный стол для ввода концов штанг в индуктор.

тальной плоскости. Затем поворотом платформы они устанавливаются вертикально под индуктором и с помощью подъемной рамы вводятся в него. Таким образом, заготовка может быть установлена точно по оси индуктора. Во время ввода в индуктор она не оказывает никаких механических воздействий на его футеровку. Благодаря этому футеровка лучше сохраняется. При вертикальном расположении оси индуктора футеровка меньше выкрашивается под действием силы тяжести.

Для нагрева концов штанг фирмой «АЕГ Элотерм» используется индукционный нагреватель, схематически показанный на рис. 48. Три индуктора установлены на наклонной плоскости.

Под индукторами расположены подвижные столы с опорными площадками. Расстояние от опорных площадок до индуктора может изменяться в соответствии с длиной нагреваемых штанг. Штанга, конец которой должен быть нагрет, устанавливается нижним концом на опорную площадку одного из столов, а верхним концом на призму, расположенную под индуктором. Затем стол поднимается и верхний конец штанги вводится в индуктор. После окончания нагрева стол автоматически опускается.

При работе всех трех индукторов нагревателя штанги вводятся в них поочередно. Установка и снятие штанг осуществляется вручную с помощью пневматического подъемника, перемещающегося по горизонтальной балке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яйков С. А. Ускоренный изотермический индукционный нагрев кузнечных заготовок. Машгиз, 1962. 96 с.
2. Слухоцкий А. Е., Рыский С. Е. Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей. Машгиз, 1954. 315 с.
3. Шамов А. Н., Бодажков В. А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Машгиз, 1963. 216 с.
4. Богданов В. Н., Рыский С. Е., Шамов А. Н. Индукционный нагрев в кузнечном производстве. Машгиз, 1956. 196 с.
5. Демчук И. С. Индукционный нагрев металлов в судостроении. Л., Судпромгиз, 1963. 130 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	1
Введение	2
I. Индукционный нагрев металла	
1. Основы индукционного нагрева	3
2. Выбор частоты тока	4
3. Время нагрева	5
4. Принципиальная схема индукционного нагревательного устройства	6
5. Расчет индукционного нагревательного устройства	7
6. Расчет установленной мощности высокочастотных генераторов	8
II. Схемы основных типов нагревателей	
7. Выбор конструкции индуктора и схемы нагревателя	9
8. Способы транспортирования заготовок сквозь индуктор	10
9. Методические нагреватели для мерных заготовок	11
10. Периодические нагреватели для мерных заготовок	12
11. Устройства для концевой и местного нагрева заготовок	13
III. Промышленные установки для индукционного нагрева	
12. Индукционные нагреватели в кузнечном производстве	14
13. Индукционные нагреватели в прокатном производстве	15
14. Различное применение индукционного нагрева	16
15. Индукционный нагрев за рубежом	17
Литература	18

Редактор издательства *инж. М. П. Юркевич*

Обложка художника *Я. В. Тауберцеля*

Технический редактор *Т. П. Малашкина*. Корректор *И. Г. Клейнер*

Сдано в производство 11/XI 1964. Подписано к печати 13/II 1965 г. М.
Формат бумаги 84×108^{1/2}. Печ. листов 4,92. Уч.-изд. листов 4,8.
Темпла: 1355 г. № 243. Тираж 5000 экз. Цена 17 к. Заказ 2135

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома Государственного комитета Совета Министров СССР по печати. Ленинград, ул. Салтыкова-Щедрина, 54

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

БИБЛИОТЕЧКА ВЫСОКОЧАСТОТНИКА-ТЕРМИСТА

ПЕРЕЧЕНЬ ВЫПУСКОВ

1. А. А. ФОГЕЛЬ. Промышленное применение токов высокой частоты.
2. Н. П. ГЛУХАНОВ. Физические основы высокочастотного нагрева.
3. Г. Ф. ГОЛОВИН, А. Д. ДЕМИЧЕВ и С. В. ШАШКИН. Высокочастотная закалка.
4. Г. Ф. ГОЛОВИН, Н. В. ЗИМИН. Термическая обработка при индукционном нагреве.
5. Е. П. ЕВАНГУЛОВА. Контроль качества поверхностной закалки.
6. А. Е. СЛУХОЦКИЙ. Индукторы.
7. Вс. В. ВОЛОГДИН. Трансформаторы для высокочастотного нагрева.
8. М. А. СПИЦЫН. Машинные генераторы для высокочастотного нагрева.
9. А. С. ВАСИЛЬЕВ. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева.
10. А. Н. ШАМОВ. Питание высокочастотных нагревательных устройств от машинных генераторов.
11. В. Н. БОГДАНОВ. Высокочастотная сварка металлов.
12. И. Н. БОГДАНОВ, С. Е. РЫСКИН. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности.
13. Ал. В. ВОЛОГДИН. Пайка и наплавка при индукционном нагреве.
14. А. А. ШЕКАЛОВ, Я. И. ШТРЕЙС и Б. В. БЛИНОВ. Плавка в малых индукционных печах.
15. И. Л. БРИЦЫН. Нагрев в электрическом поле высокой частоты.
16. П. М. СУДАКОВ. Приборы и измерения при высокочастотном нагреве.
17. А. В. БАМУНЭР. Автоматическое регулирование процессов высокочастотного нагрева.