

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МАМИ»

П.А.Петров, Е.В. Крутина, Ю.Г. Калпин,

**НАГРЕВ
И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
КУЗНЕЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**
Конспект лекций

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150400 — «Технологические машины и оборудование» и специальности 150201 — «Машины и технологии обработки металлов давлением».

Москва 2010

УДК 621.73

Петров П.А., Крутина Е.В., Калпин Ю.Г.

Нагрев и нагревательные устройства в кузнечном производстве:
Учебное пособие для вузов. – М.: МГТУ «МАМИ», 2010.– 110 с.

Рецензенты: заведующий кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением», МГИУ, профессор, д.т.н. Субич В.Н.
заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры СПД МГТУ «Станкин», д.т.н. Артэс А.Э.
профессор кафедры «Кузовостроение и обработка давлением» МГТУ «МАМИ», д.т.н. Филиппов Ю.К.

В учебном пособии, представленном в форме конспекта лекций, рассмотрены современные технологии нагрева металла под обработку давлением. Приведены конструкции и описание работы печей. Освещены вопросы режимов нагрева. Рассмотрены электрические виды нагрева металла и нагрев в пламенных печах. Особое внимание уделено расчету параметров нагрева.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 150201 «Машины и технологии обработки металлов давлением», бакалавров направления 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование». Издание может быть полезно для магистров, аспирантов.

1 Общие сведения о нагреве металлов и сплавов

Целью нагрева металла при деформации является повышение его пластичности, понижение сопротивления деформированию и уменьшение необходимой силы деформирования, а также улучшение прочностных свойств штамповки (поковки) по сравнению с исходной заготовкой. Последнее обеспечивается сочетанием определенной температуры нагрева металла с необходимой степенью деформации в конце процесса штамповки.

От способа и режима нагрева зависит качество штамповки (поковки), расход металла и топлива, стойкость штампов, производительность и себестоимость штамповок (поковок). В настоящее время применяют два способа нагрева – пламенный и электрический. К электрическому нагреву относятся нагрев в электрических печах сопротивления и соляных ваннах, электроконтактный нагрев и индукционный нагрев.

При ковке обычно используют пламенные печи. При горячей штамповке преимущественно используют электрический нагрев (электрические печи сопротивления, индукторы).

1.1 Явления, происходящие в металле при нагреве

Нагрев металла может сопровождаться следующими физическими явлениями: изменением теплопроводности, температурным расширением, фазовыми (структурными) превращениями, возникновением температурных напряжений, образованием окалина, обезуглероживанием поверхности заготовки, перегревом и пережогом.

1. Теплопроводность. Теплота с поверхности металла передается глубинным слоям теплопроводностью. Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности (который иногда называют просто теплопроводностью). Коэффициент теплопроводности – это число джоулей, передаваемое через 1 м^2 поверхности при температурном перепаде в 1 К на длине 1 м в секунду $[\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})]$. Чем больше теплопроводность, тем быстрее теплота отводится с поверхности и передается внутрь заготовки. Чем меньше теплопроводность, тем больше температурный перепад между поверхностными и глубинными слоями заготовки.

Теплопроводность различных металлов различна. Она зависит от содержания в стали углерода, легирующих элементов и температуры нагрева. Чем больше в стали содержится углерода и легирующих элементов, тем меньше ее теплопроводность. С повышением температуры теплопроводность уменьшается.

2. Температурное расширение. При нагревании все тела расширяются. Величина, определяющая степень расширения тела при нагреве, называется коэффициентом линейного расширения. Величина коэффициента линейного расширения стали зависит от ее состава и

температуры нагрева. Значения коэффициента линейного расширения для некоторых металлов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициент линейного расширения некоторых сплавов

Материал	Среднее значение $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$, в интервале температур, °С					
	20 – 100	20 – 200	20 – 300	20 – 400	20 – 500	20 – 600
Сталь 20Х	11,3	11,6	12,5	13,2	13,7	–
Сталь 40Х	13,4	13,8	–	14,8	–	–
Сталь 20ХФ	12,0	12,5	–	13,0	13,7	–
Сталь 40ХФА	11,0	12,0	–	16,5	–	–
Сталь 30ХМ	12,3	12,5	12,9	13,9	–	–
Сталь 40ХН	11,8	12,3	–	16,5	–	–
АК 4-1	19,6	22,4	23,9	24,8	–	–
АМг 6	23,7	25,7	27,1	29,5	–	–
АК 8	22,5	24,7	26,3	–	–	–
ВТ 6	8,3	8,6	8,7	8,8	9,0	9,1
ВТ 8	8,41	8,96	10,1	10,1	–	–
ВТ 20	8	8,2	8,5	8,8	8,9	8,7

3. Фазовые (структурные) превращения. В процессе нагрева или охлаждения в стали при определенных температурах происходят фазовые и структурные превращения: α -железо переходит в γ -железо; эвтектоидная смесь α -железа и цементита (перлит) переходит в твердый раствор (аустенит), и обратно. При этом изменяется внутреннее строение металла, в частности тип кристаллической ячейки. Это, в свою очередь, приводит к изменению свойств стали.

Как известно, все металлы и сплавы имеют кристаллическое строение, что характеризуется закономерным и периодическим расположением атомов в пространстве. В силу того, что процесс кристаллизации при затвердевании жидкого (расплавленного) металла идет одновременно в очень большом числе центров кристаллизации, технический металл (в производстве только такие и используются) представляет собой не единый кристалл, а совокупность кристаллитов (зерен). Каждое из зерен имеет закономерное расположение атомов в пространстве и отличается от соседних формой, размерами и расположением.

Температуру фазовых превращений и структуру стали при различных температурах можно определить по диаграмме состояния железо – углерод.

Наиболее пластичной структурой является структура аустенита. При наличии двухфазной структуры пластичность снижается.

Исходя из температуры фазовых превращений и характера изменения механических свойств нагреваемого материала, мы можем определить верхний и нижний предел температурного интервалаковки и штамповки. Например, низкоуглеродистые и углеродистые стали при температурах 1100 – 1200°С имеют чисто аустенитную (однофазную) структуру, характеризующуюся высокой пластичностью. Поэтому температуру 1200°С можно принять за верхний предел температурного интервалаковки для углеродистых сталей. У высокоуглеродистой стали при 1100°С структура двухфазная: аустенит и цементит, последний образует хрупкую сетку по границам зерен. Для повышения пластичности стали цементитную сетку надо разбить с тем, чтобы цементит образовал отдельные зерна в металле поковки. При этом твердость и прочность металла останутся высокими. Верхний предел температурковки для высокоуглеродистой стали целесообразно принять 1100°С, а ковку проводить осторожно, с учетом того, что пластичность снижена из-за наличия двухфазной структуры.

4. Температурные напряжения. Теплота, расширение металла и фазовые (структурные) превращения распространяются с поверхности внутрь нагреваемой заготовки в течение определенного времени. Со стороны наружных расширяющихся слоев внутренние, непрогретые, слои, испытывают напряжения растяжения, а наружные со стороны внутренних – напряжения сжатия.

Известно, что переход α -железа в γ -железо связан со значительным уменьшением объема. Поэтому наружные слои раньше внутренних слоев уменьшаются в объеме, что связано с характером распределения теплоты при нагреве холодной заготовки. Это, в свою очередь, приводит к смене знака напряжений: наружные слои испытывают напряжения растяжения, а внутренние – сжатия. Возникают деформации не только упругие, но и пластические.

Напряжения, возникающие вследствие неравномерного нагрева или фазовых превращений, называются температурными или термическими напряжениями. Если температурные напряжения и деформации превзойдут некоторое критическое значение для данного материала, то произойдет его разрушение.

В нагревательные печи обычно поступает сталь со значительной пластичностью. При нагреве такой стали температурные напряжения не превосходят предел прочности материала. Такую сталь можно нагревать с большой скоростью, не опасаясь ее разрушения.

Опасными для качества нагрева стали являются не только температурные напряжения, но и остаточные напряжения, полученные в процессе обработки, предшествующей нагреву (например, охлаждение после прокатки). Эти остаточные напряжения складываются с температурными напряжениями, и суммарные напряжения могут вызвать разрушение металла.

Эта опасность наиболее велика при нагреве заготовок до температуры, меньшей 600 – 650°C, когда пластичность металла еще мала.

5. Образование окалины. При нагреве поверхность стали окисляется и покрывается слоем окалины.

При горении топлива в печи образуются различные газы, которые по характеру своего воздействия на металл разделяются на три группы: окислительные (кислород – O_2 , углекислота – CO_2 , водяные пары – H_2O , сернистый ангидрид – SO_2); восстановительные (окись углерода или угарный газ – CO , метан – CH_4 , водород – H_2); нейтральные (азот – N_2). Кислород, входящий в состав газов первой группы, химически взаимодействуя с железом нагреваемых заготовок, образует окислы железа различной степени окисления, или так называемую окалину.

Окисление металла при нагреве есть процесс двухсторонней диффузии и химических реакций взаимодействия окисляющих газов (O_2 , CO_2 , $(H_2O)_{пар}$) с железом, легирующими элементами и примесями с поверхности образовавшегося слоя окалины внутрь через этот слой и в обратном направлении.

Слой окалины представляет собой смесь окислов железа и его примесей различной степени окисления. Главными составляющими окалины являются (рис. 1.):

- 1) FeO – закись железа, или вюстит, устойчивая при температуре выше 570 °С и плавящаяся при 1377°С (внутренний слой);
- 2) Fe_3O_4 – закись и окись железа, или магнетит, устойчивая при всех температурах вплоть до точки плавления 1580°С (средний слой);
- 3) Fe_2O_3 – окись железа, или гематит, устойчивая при всех температурах вплоть до точки плавления 1565°С (наружный слой).

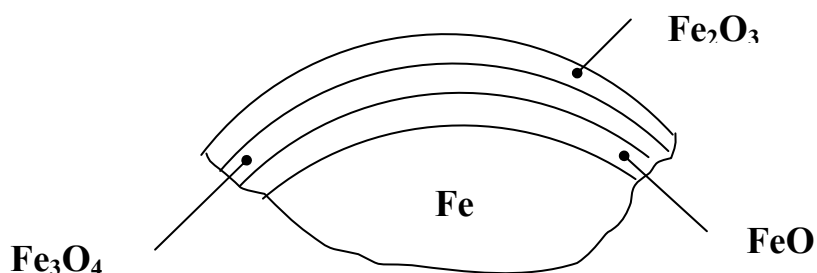


Рисунок 1. Главные составляющие окалины

Наружный слой очень тонкий. Второй и третий – богаты легирующими элементами. Чем больше FeO/Fe_2O_3 , тем сильнее прилипает окалина к металлу. Наиболее прочно держится окалина, образованная при пониженных температурах (900 – 1000°С).

Окалина, или угар металла, может достигать до 2,5-5% от первоначальной массы заготовок за один нагрев и является потерей металла, удорожающей себестоимость поковок. Окалина плохо очищается от поверхности нагретой заготовки и при деформации вдавливается в тело

поковок, что требует повышенного припуска на обработку резанием. Кроме того, окалина, обладая большой твердостью, ускоряет износ штампов.

Количественные показатели потерь железа от окисления (угара):

- 1) угар по массе (%) – количество металла, окисленного при нагреве, отнесенное к первоначальной массе;
- 2) поверхностный угар (г/см^2) – количество окисленного металла, отнесенное к поверхности нагреваемого слитка или заготовки;
- 3) скорость окисления ($\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$) – отношение угара ко времени нагрева;
- 4) толщина окалины (см).

На процесс окисления влияют следующие факторы: температура, время, атмосфера печи и химический состав нагреваемого металла. Рассмотрим влияние каждого из перечисленных факторов.

Температура нагрева металла. При комнатной температуре металл окисляется в виде ржавления; при нагреве до 200 – 300 °С появляются цвета побежалости; дальнейшее повышение температуры увеличивает интенсивность окисления и особо сильное окисление идет при температуре 1275 – 1375 °С, когда окалина начинает оплаиваться.

Время нагрева. Чем больше времени металл находится при высокой температуре, тем толщина окалины больше. Толщину окалины S (см) можно определить по формуле:

$$S = \frac{\alpha}{\rho \varphi_{Fe}}, \quad \alpha = 6,3\sqrt{\tau} e^{-9000/t},$$

где α – поверхностный угар, г/см^2 ; ρ – плотность окалины, $\rho=3,9-4,0 \text{ г/см}^3$; φ – среднее содержание железа в окалине, $\varphi_{Fe}=0,715-0,765 \%$; τ – время, мин; t – температура, °С.

Приведем некоторые значения поверхностного угара при нагреве крупных стальных слитков перед ковкой в зависимости от продолжительности нагрева.

Таблица 2

Диаметр, мм	Масса, т	Время нагрева, ч	Поверхностный угар, г/см^2	Толщина окалины, мм
900	8	10 – 11	1,22 – 1,28	4,25 – 4,45
1000	12	12	1,34	4,65
1100	15	15 – 19	1,5 – 1,7	5,2 – 5,85
1200	25	18 – 21	1,64 – 1,8	5,7 – 6,25

Печная атмосфера, т.е. соотношение окислительных (O_2 , CO_2 , $(\text{H}_2\text{O})_{\text{пар}}$) и восстановительных (CO , H_2 , CH_4) газов. В обычных печах нагрева имеет место в основном окислительная атмосфера. Чем больше в печи окислительных газов, тем выше окисление. Количество указанных газов

зависит от коэффициента избытка воздуха α (отношения действительного количества воздуха к теоретически необходимому для полного сжигания топлива). При $\alpha=0,5$ окисление практически отсутствует, т.к. создается восстановительная атмосфера, содержащая 16,5 % CO и H₂. Однако и температура печи при этом не достигает даже 1000°C. Обычно α составляет от 1,05 до 1,1. Наличие в печных газах серы в виде сернистого ангидрида SO₂ или сероводорода H₂S усиливает окисление и повышает содержание серы в поверхностном слое металла, что негативно отражается на качестве нагретого материала.

Химический состав металла. С повышением содержания в стали углерода (C) окисление уменьшается. Чем больше в стали содержится хрома (Cr), никеля (Ni), кремния (Si), ванадия (V), алюминия (Al), тем плотнее слой окалина. При нагреве жароупорных сталей окалина особенно плотная. Это, с одной стороны, предохраняет металл от дальнейшего окисления, с другой, – крайне затрудняет очистку поверхности заготовки от образовавшейся окалина.

6. Обезуглероживание поверхности заготовки. В процессе нагрева происходит также обезуглероживание поверхностного слоя заготовки, понижающее механические свойства поковок. Сущность процесса заключается во встречной диффузии в поверхностном слое металла (под слоем окалина) обезуглероживающего газа, проникающего под окалину, (H₂O, CO₂, H₂, O₂) и углерода или карбида железа Fe₃C и выгорании углерода.

Глубина обезуглероженного слоя достигает 0,5 – 1,0 мм и, чем выше температура нагрева, тем толще обезуглероженный слой. На процесс обезуглероживания влияет состав газовой среды в печи; температура нагрева – с повышением температуры глубина обезуглероживания увеличивается; содержание углерода в стали – чем больше в стали углерода, тем больше толщина обезуглероженного слоя; химический состав стали – обезуглероживанию способствуют алюминий, кобальт и вольфрам; задерживают – хром и марганец; не оказывают существенного влияния кремний, никель и ванадий; состояние поверхности: образующаяся на металле окалина оказывает тормозящее воздействие на обезуглероживание, т.е. чем толще слой окалина, тем меньше обезуглероживание.

7. Перегрев и пережог. При нагреве стали наблюдается рост зерна. С повышением температуры нагрева и продолжительности нахождения заготовок в печи рост зерен увеличивается. Металл становится крупнозернистым, менее пластичным и более хрупким. Такое состояние называется перегревом. Перегретый металл может быть исправлен отжигом, т.е. медленным нагревом до температуры несколько выше точки конца фазовых превращений и последующим медленным охлаждением. Крупнозернистая структура при перегреве также может быть исправлена интенсивной деформацией.

При температурах выше верхней границы температурного интервалаковки для данной марки стали находится зона пережога. При пережоге кислород диффундирует внутрь металла и окисляет границы зерен, которые при этом оплавляются, так как окислы железа имеют меньшую температуру плавления, чем сам металл. Оплавление границ приводит к ослаблению связи между зернами, а в результате и к разрушению металла при обработке давлением. Пережог – неисправимый брак.

1.2 Режимы нагрева металла под ковку и штамповку и температурный интервалковки и штамповки

К режимам нагрева металла относятся температура, скорость и продолжительность нагрева.

Под температурой нагрева подразумевают конечную температуру поверхности заготовки, с которой она выдается из печи. Ковка и штамповка требуют такой температуры нагрева, при которой значительно снижается сопротивление деформированию и металл становится достаточно пластичным (для стали – 850 – 1300 °С).

Верхний предел температурного интервалаковки и штамповки должен быть ниже температуры перегрева и пережога металла, нижний обусловлен резким упрочнением при дальнейшем уменьшении температуры. Не всегда целесообразно металл нагревать до верхнего предела температурного интервалаковки и штамповки. Повышение температуры нагрева металла приводит, с одной стороны, к уменьшению сопротивления деформированию, а с другой стороны к интенсивному росту зерна и слоя окалины. Поэтому существует оптимальный интервал температуры нагрева, который определяется допустимой температурой в концековки и штамповки с учетом охлаждения металла и тепловыделения в результате пластической деформации.

Скорость нагрева – это изменение в единицу времени температуры поверхности, центра или других точек сечения заготовки. Скорость нагрева зависит от температурного градиента, т.е. $\frac{\partial T}{\partial x}$. Однако чем больше $\frac{\partial T}{\partial x}$, тем больше температурные напряжения. Для стали температурные напряжения опасны в интервале температур от 0 °С до температуры фазовых превращений. За пределами температуры фазовых превращений сталь становится пластичной и температурные напряжения не приводят к ее разрушению. Следовательно, скорость нагрева можно существенно увеличить.

Основным фактором, позволяющим регулировать скорость нагрева, является температура рабочего пространства печи, с повышением которой увеличивается $\frac{\partial T}{\partial x}$ и скорость нагрева. На практике температура рабочего

пространства принимается на 50 – 150 °С выше конечной температуры нагрева металла. Превышение температуры рабочего пространства печи над температурой нагрева заготовки называется температурным напором.

Продолжительность нагрева определяется временем нахождения заготовки в печи для достижения требуемой по заданному режиму температуры и равномерности прогрева по сечению и длине. Продолжительность нагрева зависит от следующих факторов:

1) температуры рабочего пространства печи, которая определяет достижимую температуру нагрева, и от температурного напора;

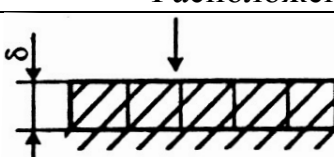
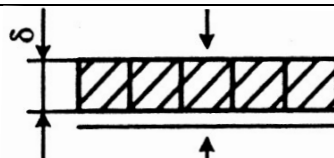
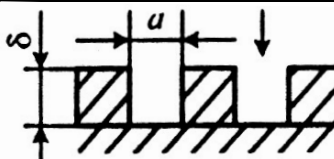
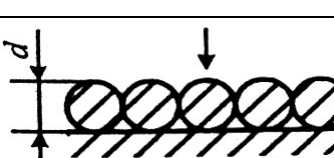
2) марки материала, которые определяют допустимую температуру нагрева;

3) поперечных размеров и формы сечения заготовки;

4) способа укладки заготовок на поду печи (рисунок 2); этот фактор характеризуется коэффициентом α , определяющим допустимую и достижимую скорость, а следовательно и продолжительность нагрева; на практике в кузнечных печах стальные заготовки круглого поперечного сечения укладывают вплотную, а квадратного – на расстоянии 1/2 толщины;

5) длины заготовки: чем меньше длина, тем быстрее нагрев (сказывается влияние торцов заготовок). Время нагрева заготовок с отношением длины к толщине более трех, т.е. $\frac{l}{d} > 3$, не зависит от длины

заготовки. При $\frac{l}{d} < 3$ следует учитывать нагрев со стороны торцов;

Расположение заготовок		μ, S												
	Односторонний нагрев	$\mu=1,0, S=\delta$												
	Двусторонний нагрев (на водоохлаждаемых трубах)	$\mu=0,55\div 0,6; S=\mu \delta$												
	Односторонний нагрев, монолитный под	<table border="1" data-bbox="989 1612 1420 1724"> <tr> <td>a/δ</td> <td>0</td> <td>0,5</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>μ</td> <td>1</td> <td>0,6</td> <td>0,55</td> <td>0,5</td> <td>0,4</td> </tr> </table>	a/δ	0	0,5	1	2	∞	μ	1	0,6	0,55	0,5	0,4
a/δ	0	0,5	1	2	∞									
μ	1	0,6	0,55	0,5	0,4									
	Односторонний нагрев, монолитный под	$\mu=0,75\div 0,8; S=\mu d$												

	<p>Односторонний нагрев, монолитный под</p>	$S = \mu d$ <table border="1" data-bbox="986 246 1439 353"> <thead> <tr> <th>a/d</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>>2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>μ</td> <td>0,8-1</td> <td>0,5-0,6</td> <td>0,5</td> </tr> </tbody> </table>	a/d	1	2	>2	μ	0,8-1	0,5-0,6	0,5
a/d	1	2	>2							
μ	0,8-1	0,5-0,6	0,5							
	<p>Четырехсторонний нагрев, плоские вертикальные заготовки при $b/a \leq 1,8$; $d = 1,128 \sqrt{ab}$</p>	$\mu = 0,5; S = 0,5d$								
	<p>Плоские вертикальные заготовки при $b/a > 1,8$</p>	$\mu = 0,5; S = 0,5a$								
	<p>Круглые вертикальные заготовки</p>	$\mu = 0,5; S = 0,5 d$								
	<p>Односторонний нагрев: F – площадь поперечного сечения изделия; B – ширина ряда</p>	$S = \frac{\Sigma F}{B}$								
	<p>Двусторонний нагрев: F – площадь поперечного сечения изделия; B – ширина ряда</p>	$S = \frac{\Sigma F}{2B}$								

Рисунок 2. Способы укладки заготовок на поду печи

б) состояния поверхности заготовки: оценивают по степени черноты поверхности; заготовки могут быть полированными, обточенными, покрытыми окалиной; соответственно, у них степень черноты $\varepsilon = 0,1; 0,35; 0,9$; при нагреве заготовок со светлой поверхностью на них в начале появляются цвета побежалости, что увеличивает степень черноты, а за тем она покрывается слоем окалины; высокая степень черноты приводит к

увеличению скорости поглощения теплоты заготовкой; однако образовавшаяся окалина создает тепловую изоляцию и препятствует теплопередаче, поэтому этим фактором в расчетах можно пренебречь;

7) теплоты экзотермических реакций; при сгорании железа выделяется 6850 кДж/кг теплоты; если учесть, что в окалину переходит 1 – 2% стали, то в общем тепловом балансе эта теплота составит малую величину; кроме того, окалина обладает меньшей теплопроводностью, чем металл, что снижает передачу теплоты, поэтому теплотой экзотермических реакций в расчетах можно пренебречь.

Таким образом, режимы нагрева включают в себя:

- 1) конечную температуру нагрева металла и соответственно температурный напор;
- 2) количество интервалов нагрева;
- 3) температуру и продолжительность каждого интервала, а также продолжительность выдержки;
- 4) полную продолжительность нагрева;
- 5) температуру печи и количество потребной теплоты в момент или в месте посадки или на протяжении всего процесса нагрева.

Режим нагрева устанавливается в зависимости от:

- 1) физических свойств нагреваемого металла;
- 2) размеров и формы заготовок;
- 3) начальной температуры металла;
- 4) типа и конструкции печи.

При нагреве металла под обработку давлением применяют следующие режимы.

1. Одноступенчатый. Он характеризуется постоянной температурой печи; продолжительность нагрева определяется разностью температур печи и поверхностью нагреваемого металла в конце нагрева; разность температур по сечению заготовок не регулируется; применяется для нагрева мелких и средних заготовок в камерных печах.

2. Двухступенчатый. Он характеризуется двумя периодами нагрева – нагрев и выдержка для выравнивания температуры по сечению заготовки; температура печи может быть как постоянной, так и меняться; разность температур по сечению заготовки может регулироваться; выдержка осуществляется при постоянной температуре; применяется для нагрева средних и крупных заготовок в камерных и полуметодических печах.

3. Трех – и четырехступенчатый (рисунок 3). Они включают периоды медленного и ускоренного нагрева и выдержки (режим методического нагрева).

Первый период - пока не будет пройден температурный интервал фазовых превращений, нагрев осуществляется посредством постепенного

повышения температуры печи. Этот период составляет 60-70% всей продолжительности нагрева.

Второй период - от критических температур до конечной нагрев следует вести с максимально возможной скоростью. Сталь становится пластичной и отпадает вероятность образования больших температурных напряжений. Если же нагрев до конечной температуры будет вестись медленно, то это приведет к росту зерна, увеличению окисления поверхности заготовки и обезуглероживания.

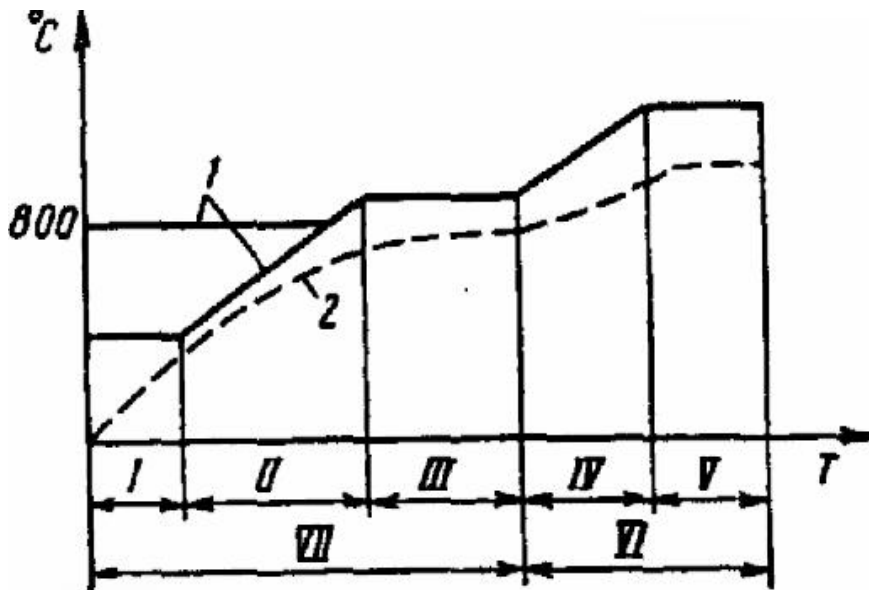


Рисунок 3. Режим методического нагрева: 1 — температура печи; 2 — температура поверхности слитка;

I — время выдержки при температуре посадки; II — медленный нагрев; III — время выдержки при температуре 800°C ; IV — нагрев до окончательной температуры; V — время выдержки для выравнивания температуры слоев перед ковкой; VI — 40% всего времени нагрева; VII — 60% всего времени нагрева

1.3 Охлаждение поковок

Качество поковки после обработки давлением зависит также от режима охлаждения. Скорость охлаждения обуславливает величину температурных (термических) напряжений, которые при быстром охлаждении приводят обычно к образованию наружных трещин: чем быстрее происходит процесс охлаждения поверхностных слоев, тем больше перепад температур и тем больше по величине температурные напряжения; если эти напряжения превысят некоторое предельное для данного металла значение, то могут возникнуть наружные трещины. При быстром охлаждении есть опасность поверхностной закалки легированных сталей, последствия которой трудно устранить даже при отжиге.

Охлаждение поковок может проводиться: 1) на воздухе; 2) на стеллажах; 3) в штабелях; 4) в ящиках с песком; 5) в необогреваемых колодцах; 6) в отопливаемых колодцах; 7) вместе с печью.

Выбирать тот или иной способ охлаждения следует с учетом массы поковки и марки и свойств материала. Чем больше легирована сталь и чем больше размеры поковки, тем медленнее должно быть охлаждение. Малогабаритные поковки из низкоуглеродистых и низколегированных сталей охлаждаются без особых предосторожностей. Поковки из углеродистой конструкционной стали диаметром до 300 мм охлаждаются на воздухе и в штабелях. Поковки из углеродистой и легированной стали диаметром более 50 мм охлаждаются в ящиках с песком или окалиной и в закрытой яме. Поковки из углеродистой и легированной стали диаметром более 150 мм – вместе с печью.

Время охлаждения поковок при ковке и после нее играет большую роль при выборе числа нагревов и подогревов при ковке и корректировке температурного интервалаковки и штамповки. Время охлаждения определяет возможную продолжительность процессаковки в интервале заданных температур. Скорость охлаждения, подобно скорости нагрева, зависит от массы поковки, температуры окружающей среды, теплопередачи в окружающую среду и от других факторов. Так как теплопередача при ковке больше, чем при охлаждении на воздухе вследствие плотного контакта металла заготовки и инструмента, то скорость охлаждения на воздухе значительно меньше, чем во время контакта заготовки с инструментом.

1.4 Расчет продолжительности нагрева заготовок

Для приближенных расчетов продолжительности нагрева заготовки больших сечений – от $\varnothing 100$ мм и выше – в пламенных печах с температурой 1300°C можно пользоваться формулой Н.Н. Доброхотова:

$$\tau = \alpha k d \sqrt{d}, \text{ ч},$$

где α – коэффициент, учитывающий способ размещения заготовок на поду; k – коэффициент, принимаемый для конструкционной углеродистой и низколегированной сталей равным 10, а для высокоуглеродистой и высоколегированных сталей равным 20; d – диаметр или толщина нагреваемой заготовки, м.

Продолжительность нагрева заготовок большого сечения конструкционной углеродистой и низколегированной сталей от 0 до 850°C равна продолжительности нагрева от 850 до 1200°C (двухступенчатый нагрев), т.е.

$$\tau_1 = \tau_2 = 5\alpha d \sqrt{d}.$$

Для высокоуглеродистых и высоколегированных сталей продолжительность нагрева от 0 до 850°C равна

$$\tau_1 = 13.3\alpha d \sqrt{d}$$

и от 850 до 1200°C

$$\tau_2 = 6.7\alpha d \sqrt{d} .$$

2 Классификация способов нагрева

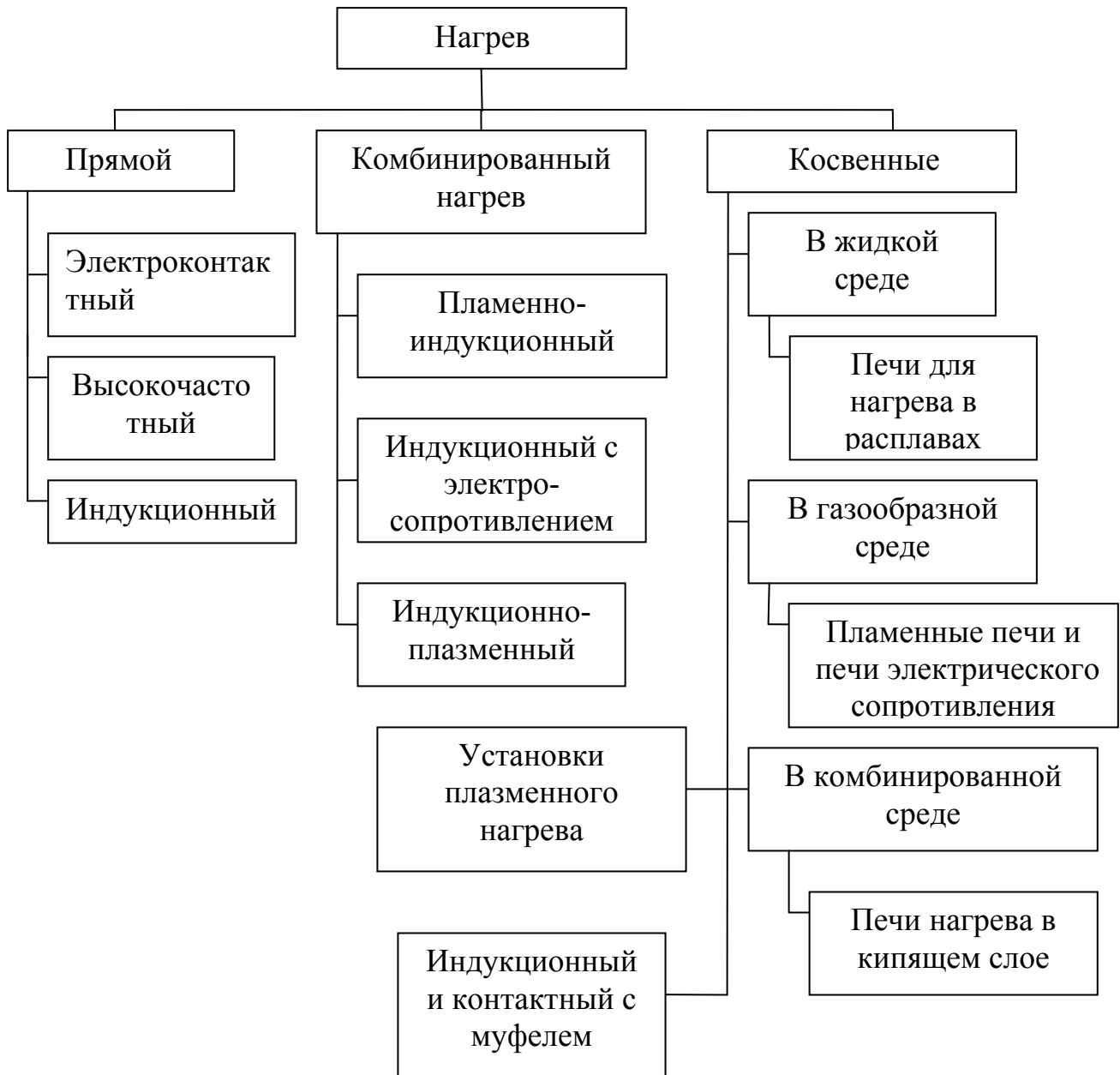
Существует два принципа нагрева – косвенный и прямой нагрев. Под косвенным нагревом понимается нагрев без внутренних источников теплоты. Если теплота передается нагреваемому объекту путем соприкосновения его поверхности с какой-либо средой (газообразной, жидкой или твердой), то принцип нагрева будет косвенным. При этом среда имеет более высокую температуру нагрева.

Под прямым нагревом понимается нагрев с внутренними источниками теплоты. Теплота создается в теле объекта тем или иным образом, температура окружающей среды остается ниже температуры объекта.

Нагревательное устройство – общее понятие, под которым можно понимать и печь, и какой-либо нагреватель как самостоятельный, так и встроенный в деформирующую машину (пресс).

Нагревательная установка – это комплекс, состоящий из источника питания и нагревателя (относится к индукционному, пламенному способам нагрева).

Печь – нагревательное устройство, работающее по принципу косвенного нагрева, в котором теплота передается нагреваемому объекту теплопроводностью, излучением, конвекцией.



3 Индукционный нагрев

3.1 Физические основы индукционного нагрева

Индукционный нагрев основывается на явлении электромагнитной индукции и теплового действия тока.

При прохождении по проводнику переменного электрического тока проводник излучает электромагнитную энергию. Вокруг проводника образуется электромагнитное поле, меняющееся во времени по величине и направлению. Образованное в проводнике собственное электрическое поле

действует навстречу электрическому полю источника тока. Если заготовку поместить в переменное магнитное поле проводника с током, то в ней появится собственное электромагнитное поле. Это приведет к тому, что в заготовке потечет переменный электрический ток в обратном направлении по отношению к току в проводнике. Он, в свою очередь, вызывает в проводнике ток того же направления, что и ток, вызываемый внешним источником.

Проводник, по которому течет переменный электрический ток от источника электроэнергии, называется индуктирующим проводом. Индуктирующий провод должен повторять контур нагреваемого объекта. Для нагрева под объемную штамповку индуктирующий провод чаще всего делают в виде спирали из медной полый трубки, по которой пропускается охлаждающая жидкость (вода). Подобная конструкция индуктирующего провода называется индуктором.

Каждый металл обладает определенным электрическим сопротивлением. Благодаря этому, при прохождении переменного тока по заготовке выделяется теплота, которая нагревает заготовку.

Явление поверхностного эффекта связано с неравномерным распределением переменного электрического тока и плотности тока по сечению индуктирующего провода и по сечению заготовки. Наибольшая плотность тока наблюдается на поверхности проводника, наименьшая – на его оси. Явление поверхностного эффекта можно объяснить следующим образом. Представим, что проводник с током состоит из бесконечно тонких нитей, по которым течет ток. Нить тока, совпадающая с осью проводника, сцеплена с полным магнитным потоком, проходящим как внутри проводника, так и вне него. Нить тока, лежащая на поверхности проводника, сцеплена только с внешним магнитным потоком. Напряженность переменного электрического поля, возникающего вследствие электромагнитной индукции, на оси проводника будет больше, чем на его поверхности. Тогда суммарная напряженность электрического поля источника и проводника оказывается малой на оси проводника и большей на его поверхности, т.к. поля имеют противоположные направления. Следовательно, ток и плотность тока уменьшаются от поверхности проводника к его оси.

Степень неравномерности распределения тока по сечению проводника тем больше, чем больше радиус проводника и частота тока. Изменение плотности тока от поверхности к центру происходит согласно зависимости

$$\delta_x = \delta_0 e^{-\frac{x}{\Delta}}, \quad (3.1)$$

где δ_x – плотность тока на расстоянии x от поверхности проводника, δ_0 – действующее значение плотности тока на поверхности проводника, Δ – глубина проникновения электрического тока.

Глубина проникновения тока – это расстояние от поверхности, на котором плотность тока уменьшается в e раз по сравнению с плотностью тока на поверхности проводника:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (3.2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; μ – магнитная проницаемость материала проводника, Гн/м; f – частота тока, Гц.

Частными случаями поверхностного эффекта являются эффект близости и кольцевой эффект.

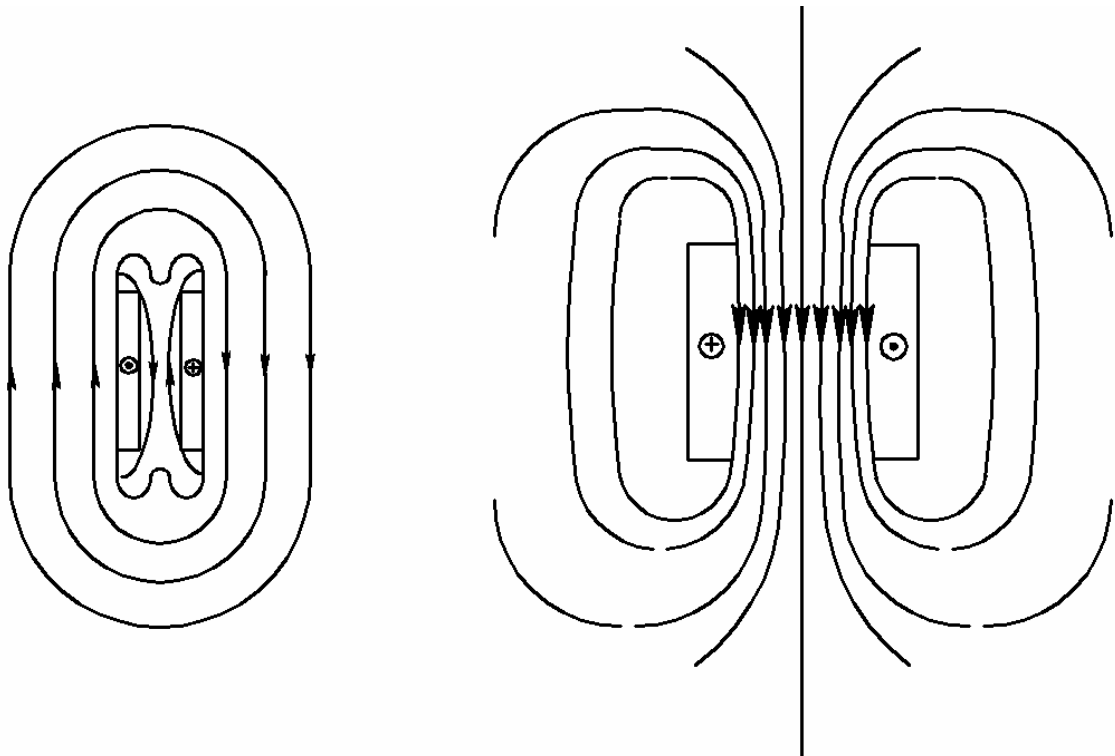


Рисунок 4. Эффект близости: а) токи в проводниках одинаково направлены; б) токи в проводниках разнонаправлены.

Эффект близости заключается в концентрации тока в определенных участках проводников за счет взаимодействия электромагнитных полей системы проводников. Явление эффекта близости можно рассмотреть на примере двух проводников, расположенных близко друг к другу (рисунок 4). При одинаковом направлении тока в параллельных проводниках плотность тока больше на их внешних поверхностях, а при разном направлении – на внутренних.

Кольцевой эффект проявляется в проводниках, выполненных в виде кольца или спирали. Плотность тока на внутренней поверхности кольцевого проводника будет больше, чем на наружной поверхности.

При индукционном нагреве электромагнитная энергия проникает внутрь тела на глубину, равную глубине проникновения тока, и превращается в тепловую. Вследствие явления теплопроводности тепловая энергия перераспределяется от мест с высокой температурой к местам с низкой температурой. Скорость передачи теплоты внутри тела зависит от свойств материала, т.е. от коэффициента теплопроводности.

Время нагрева заготовки можно определить по графикам на рисунке 5. Время будет зависеть от диаметра заготовки и частоты нагрева. Например, при диаметре заготовки 200 мм целесообразно воспользоваться индуктором с частотой тока 50 Гц, время нагрева составит 20 мин.

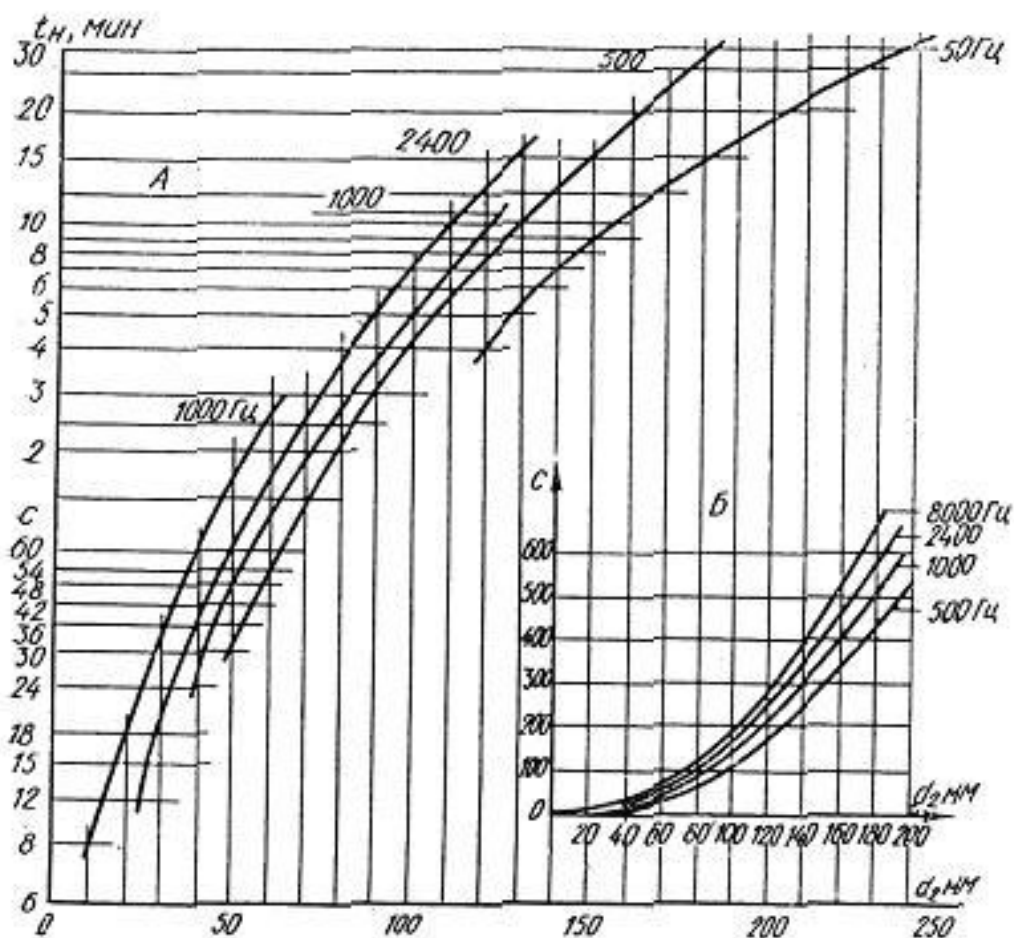


Рисунок 5. График продолжительности нагрева в зависимости от диаметра стальных цилиндрических заготовок и частоты тока: А – обычный; Б – ускоренный нагрев

3.2 Преимущества и недостатки индукционного нагрева

Преимущества.

1. Большая скорость нагрева, сокращение времени нагрева по сравнению с пламенным нагревом.
2. Значительное уменьшение окалинообразования, которое составляет в среднем $0,5 \div 0,8$ % от массы нагреваемого металла.
3. Значительно уменьшается обезуглероживание сталей, которое при

нагреве до 1100–1200 °С практически отсутствует.

4. Снижение окалинообразования уменьшает износ штампов, за счет чего повышается точность поковок и работоспособность штампа.

5. Индукционный нагрев входит в режим гораздо быстрее, чем пламенная печь. Разогрев в индукторе составляет несколько минут.

6. При индукционном нагреве можно получать желаемое распределение температурных полей по сечению и длине нагреваемой заготовки.

7. Компактность, а, следовательно, возможность встраивания нагрева в зону штампового пространства, что снижает тепловые потери, неизбежные при транспортировке заготовок от нагревательного устройства к штампу.

8. Улучшение условий труда в кузнечно-штамповочных цехах.

Основные недостатки.

1. Значительные капитальные затраты на основное оборудование.

2. Диапазон размеров заготовок, нагреваемых в пламенных печах, значительно шире, чем в индукционных нагревателях, использующих одну частоту тока.

3. Большая сложность, а в некоторых случаях невозможность, нагрева заготовок фасонного профиля сечения при относительно приемлемом КПД системы индуктор – заготовка.

3.3 Устройство индукционной установки и основные виды индукционных нагревательных установок

Индукционная установка – это совокупность индуктора, конденсаторной батареи, преобразователя частоты, системы перемещения заготовки, электрической аппаратуры. Принципиальная схема индукционной установки приведена на рисунке 6.

Индукционные нагревательные устройства подразделяются на следующие группы: в зависимости от применяемого преобразователя частоты – с питанием от машинного генератора, с питанием от тиристорного преобразователя, промышленной частоты (без преобразователя); в зависимости от числа параллельно установленных индукторов – одноручьевые (один индуктор) и двухручевые (два индуктора). Из-за усложнения ремонта и обслуживания увеличение числа ручьев более двух в одном нагревателе нецелесообразно. При необходимости иметь более двух ручьев следует увеличить число индукционных установок.

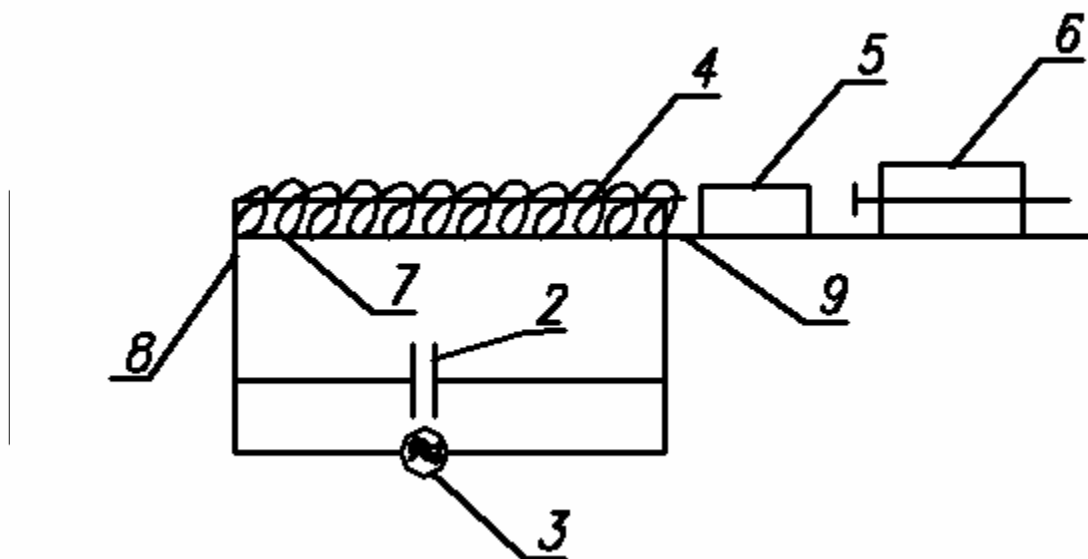


Рисунок 6. Принципиальная схема индукционной установки: 1 – индуктор; 2 – конденсаторная батарея; 3 – преобразователь тока повышенной частоты в ток высокой частоты; 4 – нагреваемые заготовки; 5 – подающиеся заготовки; 6 – толкатель; 7 – направляющие заготовок

3.4 Виды индукторов

Индукторы служат для концентрации переменного электрического поля в нагреваемых заготовках. Индуктор состоит из индуктирующего провода, тепловой изоляции и системы охлаждения. Его основной задачей является достижение равномерного нагрева заготовки по всему сечению с перепадом температуры, не превышающим 100 – 150 °С.

В зависимости от вида нагреваемых заготовок индукторы могут быть (рисунок 7):

- 1) цилиндрическими – для цилиндрических заготовок (рисунок 7 а);
- 2) квадратными – для заготовок квадратного поперечного сечения (рисунок 7 б);
- 3) овальными – для плоских заготовок или цилиндрических и квадратных заготовок уложенных в ряд (рисунок 7 в, г);
- 4) щелевыми – для нагрева концов непрерывно или периодически перемещающихся цилиндрических или квадратных заготовок, уложенных в ряд (рисунок 7 д).

По принципу действия индукторы могут быть периодическими и методическими. В первом заготовки нагреваются по одной штуке. При этом каждый раз при загрузке выгрузке заготовок индуктор выключается.

В методическом индукторе размещается несколько заготовок. Перемещение заготовок внутри индуктора осуществляется толкателями. По мере прогрета заготовки выталкиваются по одной и заменяются холодными.

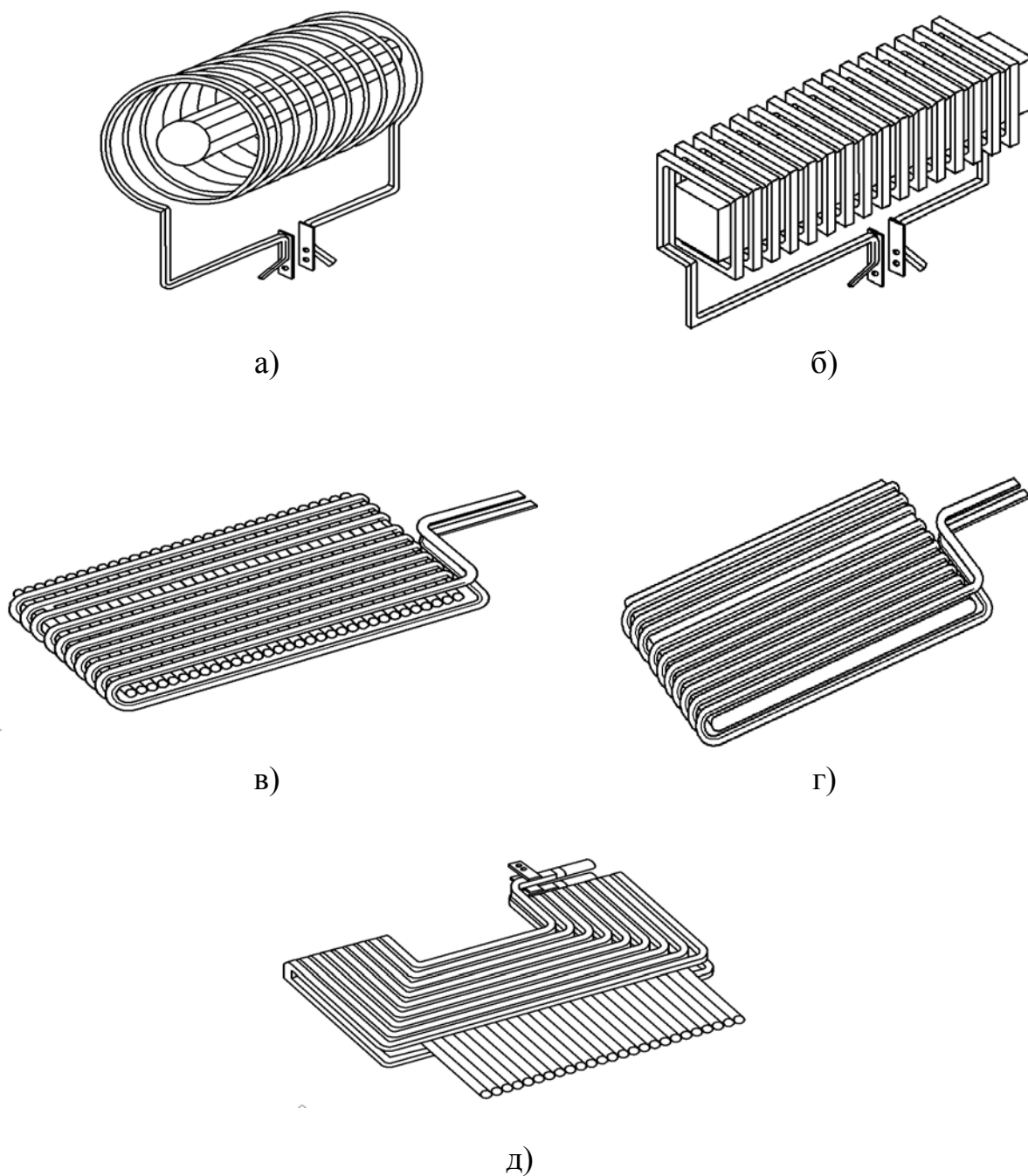


Рисунок 7. Основные схемы индукторов, применяемых для нагрева кузнечных заготовок: а) цилиндрический; б) квадратный; в) и г) овальный; д) щелевой

Таким образом, в процессе нагрева каждая заготовка перемещается через определенные равные промежутки времени и проходит весь индуктор. При этом режим нагрева характеризуется непрерывным ростом температуры поверхности заготовки до самого конца нагрева, когда они выталкиваются из индуктора.

Для нагрева заготовок переменного сечения применяются индукторы периодического действия. При этом необходимо обеспечить на каждом участке выделение различной энергии при одном и том же времени

нагрева. Для этого индуктор выполняют с переменным шагом витков. Например, на участке с наибольшим диаметром шаг витков наименьший.

3.5 Разновидности режимов нагрева

3.5.1 Обычный индукционный нагрев

Под обычным индукционным нагревом понимается такой вид нагрева, при котором температура поверхности и сердцевины, постепенно поднимаясь, достигают одновременно заданного значения. Это возможно при постоянной частоте и переменной мощности, которую подбирают специальным образом. Основные преимущества такого вида нагрева.

1. Теплота выделяется непосредственно в самой заготовке, а именно в слое, толщина которого достигает 30 – 35% величины ее радиуса.
 2. В активно нагреваемый слой передается бóльшая мощность, что вызывает быстрый нагрев заготовки.
 3. Бóльшая производительность установки, что связано с большой скоростью нагрева.
 4. Уменьшаются до минимума потери металла на окалину.
 5. Уменьшается обезуглероженный слой.
 6. Увеличивается срок службы штампа за счет уменьшения окалины.
 7. Повышается пластичность металла заготовки.
- Недостатки.
1. Необходимость преобразования промышленной частоты тока в повышенную частоту, что требует дополнительных затрат электроэнергии.
 2. Большой расход охлаждающей воды.

3.5.2 Ускоренный изотермический нагрев

Данный режим нагрева характеризуется тем, что в начальный период нагрева температура на поверхности заготовки возрастает, вплоть до ее конечного значения с максимальной скоростью. На второй стадии происходит интенсивный нагрев средних слоев при постоянной температуре поверхности.

Ускоренный изотермический нагрев при методическом способе нагрева получают, разбивая индуктор по длине на несколько секций, в каждой из которых помещается целое число заготовок; шаг навивки индуктирующего провода в каждой следующей секции выбирается бóльшим, чем в предыдущей. Секции включены последовательно, поэтому в них протекает одинаковый ток. Таким образом, по мере перемещения заготовки по индуктору удельная мощность, передаваемая в нее, уменьшается.

Для получения параметров обмотки индуктора на отдельных участках вводится такое понятие, как удельный ток индуктора, т.е. ток, приходящийся на 1 см длины индуктора. Эта величина называется также настилом тока.

Настил тока имеет максимальное значение в первой секции индуктора, затем спадает по определенному закону. С уменьшением настила тока уменьшается удельная мощность, передаваемая в нагреваемую заготовку.

Преимущества данного режима нагрева.

1. Скорость нагрева повышается в 2 – 3 раза по сравнению с обычным нагревом.
2. Уменьшаются размеры индуктора и нагревательного устройства.
3. Повышается полный КПД индуктора.
4. Возможность нагрева заготовок большего диаметра на данной частоте тока, что связано с повышением термического КПД индуктора.

3.5.3 Нагрев токами промышленной частоты

Главные преимущества применения промышленной частоты для индукционного нагрева состоят в снижении расхода электроэнергии (не затрачивается энергия на преобразование частоты), отсутствии дорогостоящих высокочастотных преобразователей и уменьшении времени нагрева. Например, расход электроэнергии при нагреве на повышенной частоте составляет в среднем 500 кВт·ч/т, промышленной частоте – 340 кВт·ч/т.

Оптимальными условиями нагрева стальных заготовок на промышленной частоте является температура 1200 °С при диаметре заготовки 330 мм.

Недостатки.

1. Большая масса индуктора (в несколько раз больше, чем на повышенной частоте).
2. Возможные пробои между витками.

В практике промышленная частота применяется для нагрева алюминия и меди перед выдавливанием.

3.5.4 Двухчастотный нагрев

Используется для увеличения КПД индукционного нагрева.

Предусматривает последовательный нагрев заготовок из ферромагнитных материалов на двух частотах: промышленной (до температуры 600 – 700 °С) для обеспечения большей глубины проникновения тока в холодный материал и повышенной (до температуры 1200 – 1300 °С).

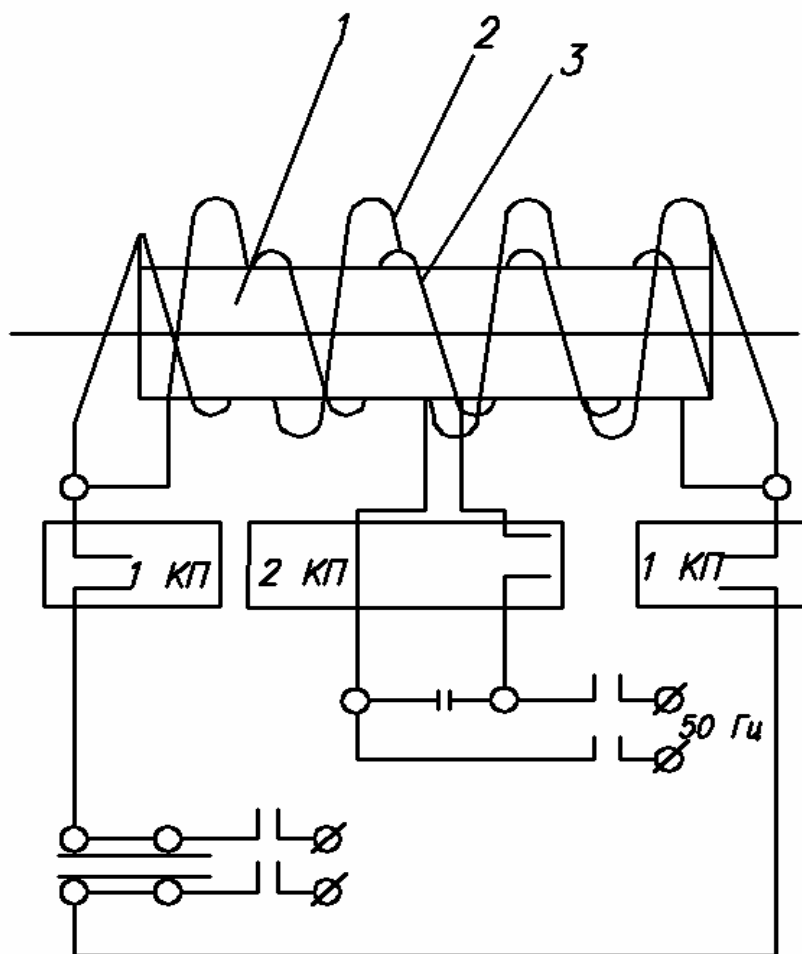


Рисунок 8. Двухчастотный индуктор: 1кп – контакторы повышенной частоты; 2кп – контакторы промышленной частоты; 1 – заготовка; 2 – индуктирующий провод промышленной частоты; 3 – индуктирующий провод повышенной частоты

Конструкция двухчастотного индуктора показана на рисунке 8.

Индуктор включает в себя наружные и внутренние витки, по которым проходит ток промышленной и повышенной частоты, контакторы повышенной и промышленной частоты и источники электрического тока промышленной и повышенной частоты.

Двухчастотный нагрев целесообразно применять для заготовок диаметром более 80 мм в нагревателях производительностью свыше 3 тонн в час.

3.5.5 Безокислительный и малоокислительный индукционный нагрев

Для уменьшения окалинообразования нагрев можно проводить в атмосфере, содержащей минимум кислорода. При нагреве в среде нейтрального газа окалинообразование снижается в 15 – 20 раз. Подобные же результаты получаются при нагреве в так называемой застойной

атмосфере, т.е. без доступа воздуха в рабочее пространство нагревателя. Схема нагревателя для нагрева заготовок в застойной атмосфере приводится на рисунке 9.

Чтобы исключить свободную циркуляцию воздуха внутри индуктора, к его торцам герметично прикреплены вертикальные камеры, через которые осуществляется загрузка и выгрузка заготовок. Имеющийся в индукторе кислород быстро выгорает, и нагрев происходит в атмосфере, не содержащей кислорода. Такой нагрев называется малоокислительным.

Схема индукционной установки для безокислительного нагрева в защитной атмосфере (аргоне) показана на рисунке 10. Отличительной особенностью данной схемы от предыдущей является иное расположение камер загрузки и выгрузки заготовок.

Камеры крепятся к торцам индуктора с помощью прокладок.

Пневматическим толкателем, заготовки последовательно подаются таким образом, что диафрагменное отверстие во входной камере всегда закрыто проталкиваемой заготовкой. Выходная камера выполнена с двумя задвижками, которые открываются только при выходе нагретой заготовки из индуктора.

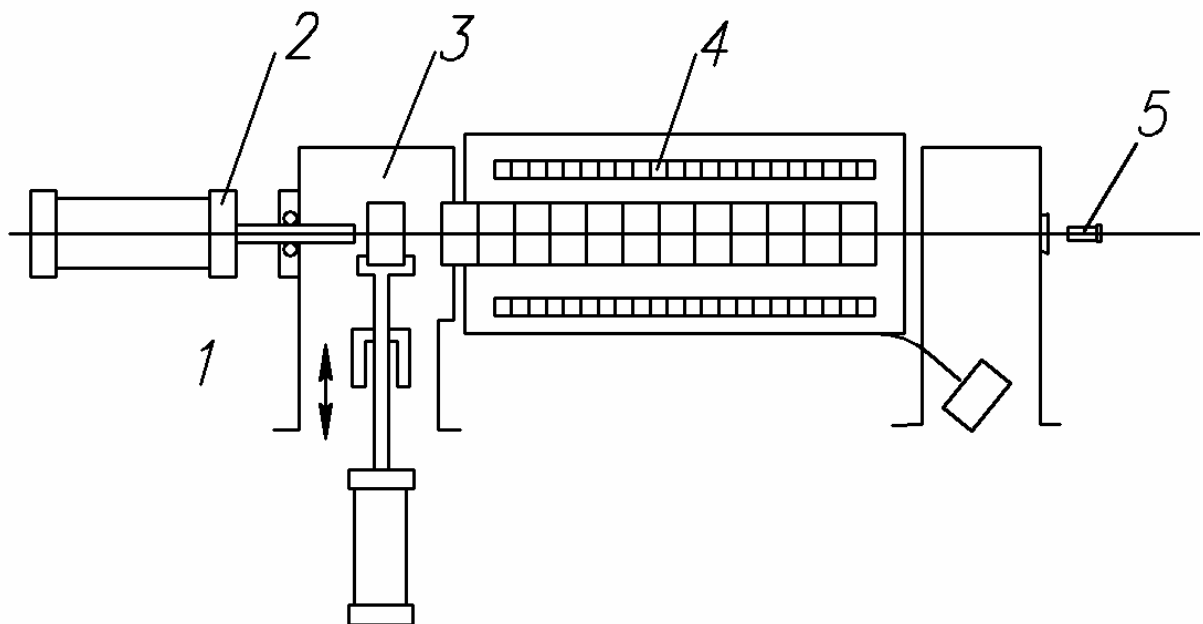


Рисунок 9. Нагреватель для малоокислительного нагрева: 1 – подъемник заготовок; 2 – толкатель; 3 – камера; 4 – индуктор; 5 – пирометр

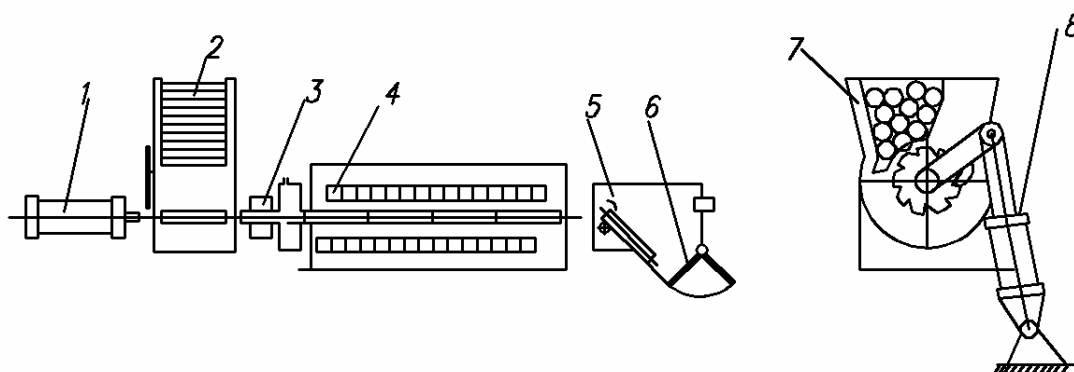


Рисунок 10. Нагреватель для безокислительного нагрева заготовок в защитной атмосфере: 1 – толкатель; 2 – магазин; 3 – уплотнительная камера; 4 – индуктор; 5 – камера выдачи заготовок; 6 – заслонка; 7 – барабан; 8 – цилиндр поворота барабана

Недостатком данного способа нагрева является то, что при транспортировке нагретых заготовок от нагревателя к прессу они окисляются.

3.5.6 Пламенно-индукционный нагрев

При пламенно-индукционном нагреве заготовки до температуры 800 – 850⁰С нагревается в пламенной печи. После этого проводится нагрев до ковочной температуры в индукторе. Применение пламенно-индукционного нагрева позволяет использовать преимущества как индукционного (высокая скорость нагрева после температур структурных превращений), так и пламенного (низкий уровень капиталовложений и стоимости теплоносителя) способов нагрева.

В индукционный нагреватель поступает заготовка, прогретая на значительную глубину до температуры структурных превращений. Поэтому глубина проникновения тока сразу достигает максимальных значений. Температура по всему сечению заготовки повышается одновременно и практически равномерно. При наличии в зоне пламенного нагрева восстановительной атмосферы продукты неполного сжигания будут заполнять индуктор и защищать находящийся в нем металл от окисления. По сравнению с пламенными печами безокислительного нагрева в пламенно-индукционных установках обеспечивается не только безокислительный, но и необезуглероживающий нагрев, а также безынерционность высокотемпературной части установки. Это, в свою очередь, исключает возможность окисления и обезуглероживания в период остановок. По сравнению с индукционным нагревом сокращаются примерно в два раза капитальные затраты и расход электроэнергии.

3.6 Расчет индуктора

Ниже приводится пример расчета индуктора.

Исходными данными для расчета являются:

- марка материала – сталь 45;
- размер заготовки (диаметр и длина) – $d_{\text{заг}}=10$ см, $l_{\text{заг}}=12$ см;
- темп штамповки $t_{\text{ш}}=20$ с;
- температура нагрева поверхности заготовки $T_{\text{к}}=1200^{\circ}\text{C}$;
- перепад температуры по сечению заготовки в конце нагрева $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$.

При расчете индуктора определяются размеры и число витков индуктора, размеры трубки (сечения), мощность, необходимая для обеспечения заданной производительности, и реактивная мощность конденсаторной батареи.

Частота тока определяется по формуле:

$$f = \frac{49\rho}{2\pi R_0^2 \mu} = 807,6 \text{ Гц} \approx 1000 \text{ Гц}$$

где μ – магнитная проницаемость среды, $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; ρ – удельное электрическое сопротивление металла, $\rho = 130 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; R_0 – радиус нагреваемой заготовки, м.

Напряжение генератора $U_{\text{г}}$ определяется в зависимости от частоты тока по справочным таблицам. В данном случае $U_{\text{г}}=750$ В.

Время нагрева $z_{\text{н}}$ – в зависимости от размеров нагреваемых заготовок по таблице 3.

Таблица 3.

$f, \text{ Гц}$	Диаметр заготовки, мм								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
	Время нагрева, с								
500	–	22	72	162	295	467	681	936	1232
1000	–	30	96	202	300	538	767	1038	1349
2500	–	43	123	243	403	605	818	1131	–
4000	–	50	134	259	425	632	880	–	–
8000	10	58	148	278	449	660	–	–	–

В нашем случае $z_{\text{н}}=300$ с.

Удельное сопротивление меди при температуре 50°C $\rho_1 = 1,9 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Глубина проникновения тока (в см) при найденной частоте:

- в медь при температуре 50°C

$$\Delta_1 = \frac{7}{\sqrt{f}} = 0,22,$$

- в сталь при температуре 1200°C

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

Внутренний диаметр спирали индуктора (в см):

$$d_{\text{и}} = d_{\text{заг}} + (2,5 \div 5,0) = 10 + 5 = 15.$$

Число одновременно нагреваемых заготовок:

$$n = \frac{z_{\text{н}}}{t_{\text{ш}}} = 15 \text{ шт.}$$

Длина индуктора (в см):

$$l_{\text{н}} = nl_{\text{заг}} + \Delta l = 15 \cdot 12 + 2 \cdot 15 = 210,$$

где Δl – дополнительная величина, необходимая для устранения краевого эффекта, $\Delta l = (1 \div 2)d_{\text{и}}$.

Полезная мощность (в кВт), необходимая для нагрева заготовки:

$$P_{\text{н}} = \frac{GncT}{z_{\text{н}}} = 310,$$

где G – масса заготовки, кг; c – удельная теплоемкость стали, $c=0,71$ кДж/(кг·К).

Составляющие сопротивления индуктора и заготовки:

1) активное сопротивление индуктора

$$R_1 = \rho_1 \frac{\pi d_{\text{и}}}{l_{\text{и}} \Delta_1} = 1,94 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

2) реактивное сопротивление индуктора

$$X_1 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{d_{\text{и}}^2}{l_{\text{и}}} = 66 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

3) приведенное активное сопротивление заготовки

$$R_2 = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{A d_{\text{заг}}^2}{n l_{\text{заг}}} = 10,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

4) приведенное реактивное сопротивление заготовки

$$X_2' = 6,2 \cdot 10^{-8} f \frac{(1-B) d_{\text{заг}}^2}{n l_{\text{заг}}} = 20,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где A и B – функции параметра $p = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{d_{\text{заг}}}{\Delta_2}$ – определяются по графику на рисунке 11; $A=0,3$, $B=0,4$, $p=3,7$;

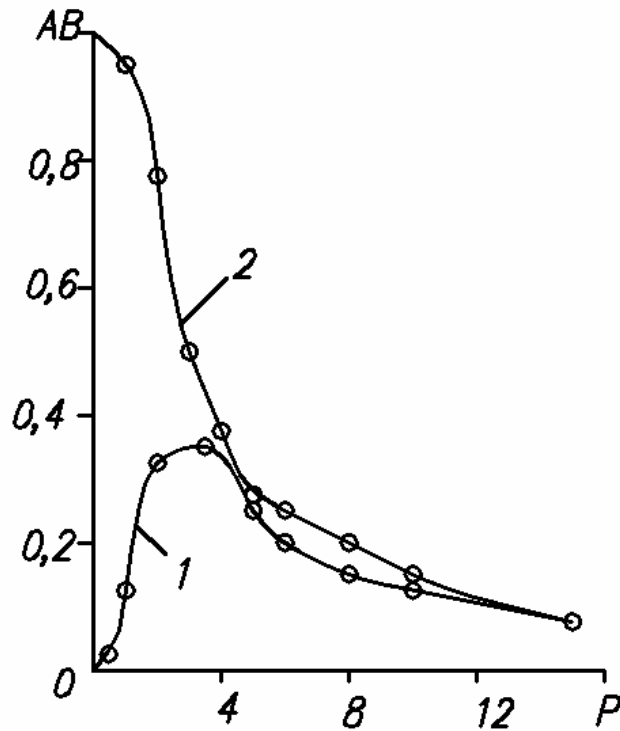


Рисунок 11. Значение функции $A(1)$ и $B(2)$.

5) эквивалентные активные и реактивные сопротивления индуктора, отнесенные к одному витку индуктора,

$$R_3 = R_1 + R_2 = 12,24 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$X_3 = X_1 - X_2 = 45,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

(если активные сопротивления индуктора и заготовки складываются, то реактивные – одно вычитается из другого, так как магнитные поля индуктора и заготовки противоположны друг другу);

б) полное сопротивление индуктора, отнесенное к одному витку,

$$Z = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} = 47,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Коэффициент мощности индуктора

$$\cos \varphi = \frac{R_2}{Z} = 0,26.$$

Электрический КПД индуктора

$$\eta_3 = \frac{R_2}{R_3} = 0,84.$$

Термический КПД η_T принимается равным 0,9.

Полный КПД

$$\eta = \eta_3 \eta_T = 0,76.$$

Мощность, подводимая к индуктору,

$$P_{\text{и}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta} = 410 \text{ кВт.}$$

Число витков индуктора

$$W = \frac{U_{\text{г}}}{Z} \sqrt{\frac{R_{\text{э}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{и}}}} = 87 \text{ витков.}$$

Ток индуктора

$$I_{\text{и}} = \frac{U_{\text{г}}}{W^2 Z} = 2080 \text{ А.}$$

Ток генератора

$$I_{\text{г}} = I_{\text{и}} \cos \varphi = 540 \text{ А.}$$

Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$P_{\text{с}} = P_{\text{и}} \sin \varphi = 1600 \text{ кВАр.}$$

Число банок конденсаторной батареи

$$N_{\text{с}} = \frac{P_{\text{с}}}{P'_{\text{с}}} = 12 \text{ шт,}$$

где $P'_{\text{с}}$ – реактивная мощность одной банки конденсатора, принимаемая в $100 \div 150$ кВАр.

Размеры трубки индуктора:

- ширина трубки a (мм)

$$a = 0,8 \frac{l_{\text{и}}}{W + 1} = 19 \text{ мм,}$$

- толщина стенки трубки b (в мм)

-

$$b = 1,35 \Delta_1 = 3 \text{ мм,}$$

- площадь внутреннего сечения трубки S (в мм^2)

$$S = \frac{P_{\text{и}}(1 - \eta)}{4,18 \nu (T_1 - T_0)} = 900,$$

где $T_0 = 20$ °С и $T_1 = 60$ °С – температура входящей и выходящей воды; ν – скорость движения воды в трубе, принимаемая равной $1,5 \div 2$ м/с²;

- высота трубки индуктора h (в мм)

$$h = \frac{S}{a - 2b} + 2b = 75;$$

(если высота трубки получается чрезмерно большой, то следует либо понизить напряжение и изменить число витков, либо разбить индуктор на несколько параллельно охлаждаемых ветвей).

Плотность тока в индукторе

$$\delta = \frac{I_{\text{и}}}{a \Delta_1} = 50 \text{ А/мм}$$

(при водяном охлаждении не должна превышать 150 А/мм^2).

Практически в одном индукторе осуществляют нагрев заготовок различных размеров. Поэтому для каждого размера заготовки необходимо выполнить проверочный расчет полного КПД индуктора. Индуктор считается приемлемым для практического применения, если КПД его не меньше 50%.

3.7 Оборудование, применяемое для индукционного нагрева

Оборудование, применяемое для индукционного нагрева, чрезвычайно разнообразно. Некоторые установки имеют высоту до 10 м и занимают площадь около 20 м^2 .

Индукционные нагреватели соответствуют ГОСТ 16370-80, техника безопасности – по ГОСТ 12.2.007.10-75. Главными характеристиками индукционных нагревателей являются выходная мощность и рабочая частота. Более высокие мощность и частота позволяют получить минимальную глубину проникновения тока. Большая мощность и низкая частота позволяют производить глубокий нагрев массивных деталей.

Малогабаритные индукционные нагреватели подразделяются на среднечастотные (обозначаются – СЧ) с частотами 1 – 20 кГц (предназначены в основном для плавки металлов и глубокого нагрева заготовок при кузнечнопрессовой обработке), высокочастотные (обозначаются – ВЧ) с частотами 20 – 100 кГц (предназначены для термообработки деталей на глубину несколько мм), сверхвысокочастотные (обозначаются – СВЧ) с частотами 100 кГц – 1,1 МГц (предназначены для быстрого нагрева тонкостенных деталей и поверхностной термообработки крупных деталей на глубину около 1 мм).

Наличие двух трансформаторных блоков в сочетании с одним генератором позволяет организовать два рабочих места и повысить производительность за счет рационального использования базового генератора.

Использование в индукционных нагревателях MOSFET-транзисторов и транзисторных IGBT-модулей открывает ранее недоступные возможности. Небольшие габариты и вес позволяют легко встраивать индукционные нагреватели в существующие и новые производственные линии. Малогабаритные индукционные нагреватели являются новейшим достижением в области энергосберегающих технологий. КПД большинства индукционных нагревателей составляет более 90%.

Для нормальной работы индукционного ТВЧ нагревателя необходимо эффективное охлаждение его силовых элементов и индуктора с помощью дистиллированной воды. Простой вариант охлаждения можно реализовать с помощью бака с дистиллированной водой и центробежного насоса соответствующей мощности. Для более мощных моделей ТВЧ нагревателей предпочтительно применение градирни. Наилучшими охладителями по праву

считаются промышленные чиллеры – холодильники для воды с воздушным или водяным охлаждением хладагента.

Технические данные нагревателей приведены в таблице 4.

Таблица 4

Параметры	КИН13-250/2,4Н	КИН14-250/4Н	КИН15-250/10Н	КИН19-500/1Н	КИН18-500/2,4Н	КИН20-500/4Н	КИН21-500/10Н
Мощность средней частоты, кВт	250	250	250	500	500	500	500
Частота рабочая, кГц	2,4	4	10	1	2,4	4	10
Размеры заготовок, - диаметр, мм - длина, мм	25 – 60 70–250	20 – 60 70–250	25 – 45 70–250	60 – 130 100– 400	25–80 70–400	20–80 70–400	25–45 70–400
Температура нагрева заготовок, °С	1200						
Производительность макс., кг/ч, при нагреве заготовок диаметром, мм:							
- 20	–	–	650	–	–	–	1300
- 30	730	650	–	–	–	1300	–
- 45	–	–	–	–	1350	–	–
- 60	–	–	–	1330	–	–	–
Расход охлаждающей воды (не менее), м ³ /ч	4,0	4,2	4,2	7,6	6,6	7	7
Расход сжатого воздуха м ³ /ч	6,5			8,0			
Удельный расход электроэнергии средней частоты, кВт ч/кг, не более	0,325	0,355	0,355	0,345	0,335	0,355	0,355

(обозначения, примененные в таблице: например КИН13-250/2,4: КИН – кузнечный индукционный нагреватель; потребляемая мощность 250 кВт; номинальная частота – 2,4 кГц; Н – вид нагрева непрерывный)

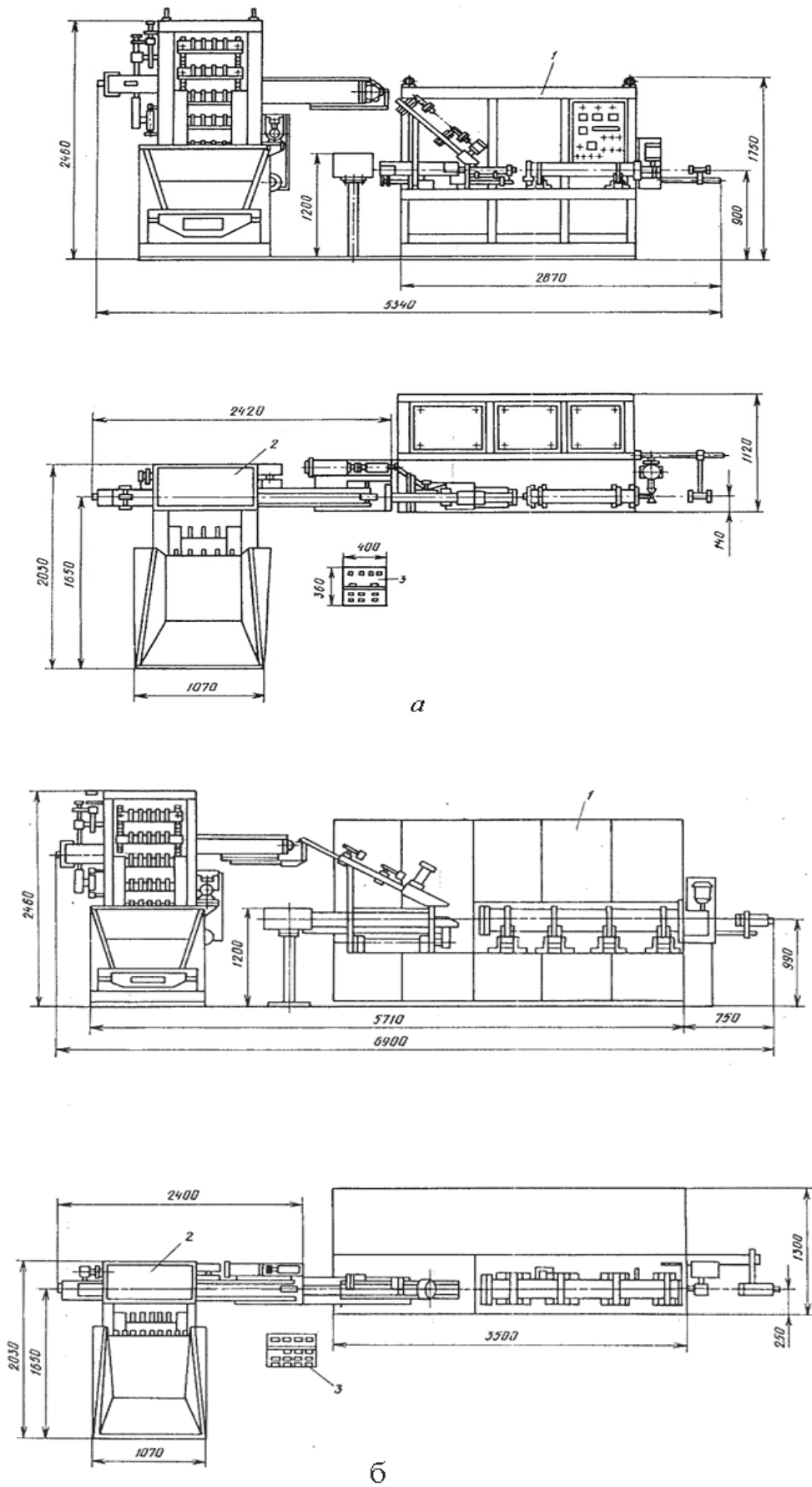


Рисунок 12. Схема автоматической линии для индукционного нагрева заготовок под штамповку мощностью 250 кВт (а) и 500 кВт (б): 1 – нагреватель индукционный; 2 – автоматизированное загрузочное устройство; 3 – пульт управления

Современные индукционные нагреватели обеспечивают нагрев заготовок в автоматическом режиме. На рисунке 12 показаны общий вид автоматической линии, которая состоит из загрузочного бункерного устройства, шкафа индукционного нагревателя с индуктором и пульта управления.

Бункерное устройство предназначено для ориентирования заготовок и подачи их к устройству загрузки индуктора. К индуктору заготовки могут подаваться непрерывно с постоянной скоростью или поштучно с заданной периодичностью.

Шкаф управления содержит пусковую аппаратуру и программирует контроллер, соединенный с дисплеем на пульте управления.

Система управления позволяет:

- задавать температурный режим нагрева заготовок и установить критерии отклонения от этого режима;
- изменять время цикла;
- устанавливать рабочее напряжение на индукторе и поддерживать его величину;
- контролировать наличие заготовок в бункере, подачу заготовок в индуктор, температуру нагрева медной катушки и заготовок, подачу воды и ее температуру, подачу сжатого воздуха;
- отключать нагреватель при возникновении отклонений от заданного режима;
- осуществлять запуск индукционного нагревателя, полностью загруженного холодными или частично нагретыми заготовками, после перерывов в работе

3.7.1 Индуктор для нагрева цилиндрических заготовок

Индуктор для нагрева цилиндрических заготовок делается в виде однослойной спирали, навитой из медной трубки и охлаждаемой в процессе работы водой (рисунок 13).

Для лучшего использования меди сечение трубки делается прямоугольным. Для изолирования витков друг от друга трубка обматывается сначала лакотканью, а затем — киперной лентой и пропитывается шеллаком.

Внутри спирали индуктора помещается гильза из миканита, изолирующая индуктор от помещенной в него заготовки. В качестве тепловой изоляции поверх миканита помещаются керамические вкладыши.

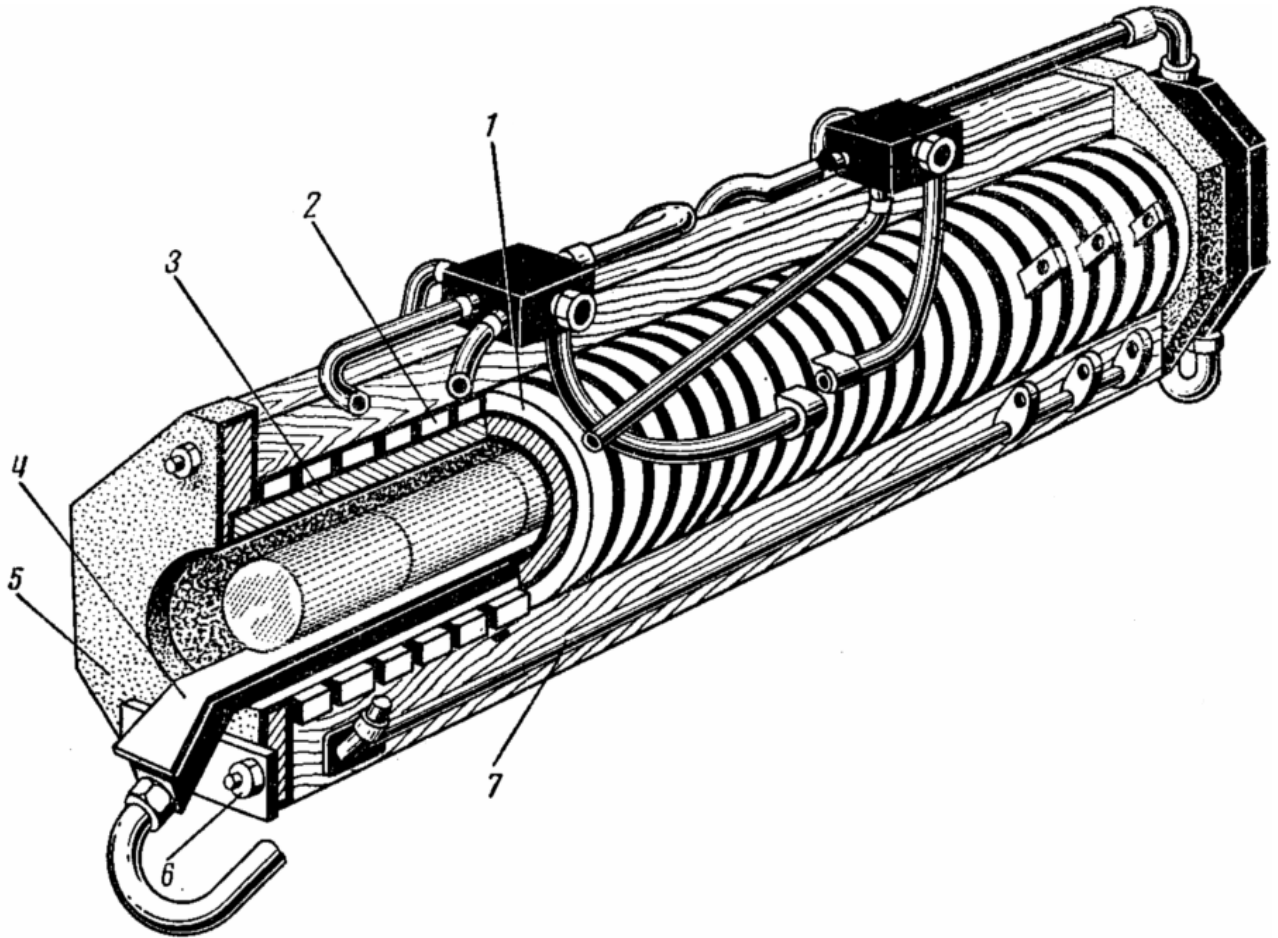


Рисунок 13. Индуктор для нагрева цилиндрических заготовок: 1 – спираль из профилированной медной трубки; 2 – электрическая изоляция; 3 – тепловая изоляция из керамических вкладок; 4 – полые направляющие из жароупорной стали; 5 – асбоцементные плиты; 6 – латунные шпильки; 7 – деревянные брусья для крепления витков индуктора

Внутри спирали также помещаются полые, охлаждаемые водой, направляющие из жароупорной стали, служащие также для крепления тепловой и электрической изоляции. С торцовых сторон индуктора помещаются асбоцементные плиты с отверстиями против внутреннего окна индуктора. Между плитами, поверх спирали, помещаются два или три деревянных бруса. Латунными шпильками, проходящими вдоль спирали индуктора сквозь асбоцементные плиты и деревянные брусья, все детали индуктора скрепляются в жесткую конструкцию. Жесткость конструкции также можно обеспечить, залив спираль из медной трубки бетоном. Но такая конструкция исключает возможность ремонта.

3.7.2 Индукционные нагреватели для концов мерных заготовок

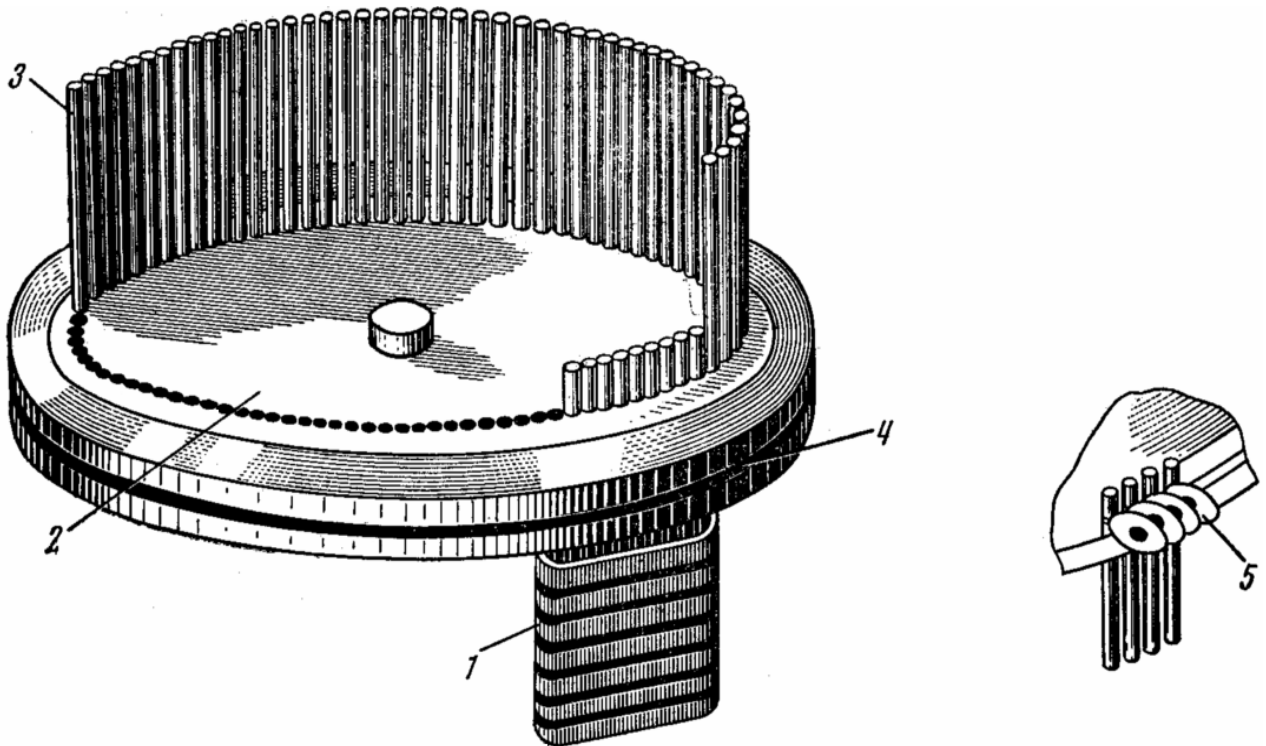


Рисунок 14. Кинематическая схема индукционного нагревателя для концов мерных заготовок: 1 – овалный индуктор; 2 – диск; 3 – заготовки; 4 –ограничительное кольцо; 5 – замки

В нагревателе для заготовок диаметром от 10 до 20 мм заготовки загружаются в отверстие диска и упираются нижними концами в ограничительное кольцо (рисунок 14). Перемещение заготовок производится поворотом диска на некоторый угол после команды, получаемой от реле времени. В том месте, где расположен индуктор, ограничительное кольцо имеет разрыв, через который заготовки опускаются своими концами в индуктор.

При движении через индуктор заготовки удерживаются на определенном уровне с помощью замков. В крайнем положении заготовки в индукторе, когда конец ее нагрет до требуемой температуры, замок открывается, заготовка выталкивается из индуктора и через лоток попадает к штамповочному механизму.

Нагрев концов заготовок в таких нагревателях может быть использован при высадке тарелочек клапанов и головок болтов, при горячей обработке концов инструмента и при других операциях.

3.8 Измерение температуры при индукционном нагреве

Измерить и записать температуры заготовки в процессе ее нагрева можно несколькими способами: 1) на шлейфном осциллографе при условии правильного выбора его типа и шлейфов; 2) с применением пирометрических милливольтметров (гальванометров); 3) термоэлектрическим методом с помощью термопар. В лабораторных условиях пользуются всеми тремя методами, в промышленности предпочтение отдается третьему способу.

Термоэлектрический метод измерения температур обладает высокой точностью. Погрешности вызываются неправильным подбором сопротивления внешней цепи, изменением температуры среды, окружающей измерительный прибор и соединительные провода, воздействием магнитных полей и др. Для измерения температур выше 1000°C наибольшее распространение получили термопары из благородных металлов – платино-платинородиевые (платинородий – 90 % платины, 10 % родия) – и неблагородных металлов – хромель-алюмелевые (хромель – 89% хрома; 9,8% никеля; 1 % железа; 0,2 % марганца; алюмель – 94% никеля; 0,5% железа; 2 % алюминия; 2,5 % марганца; 1 % кремния). Платино-родиевыми термопарами измеряют температуры до 1800°C.

3.9 Требования, предъявляемые к футеровке индукторов

Футеровка — важный и ответственный элемент индуктора, влияющий на его работоспособность и технико-экономические показатели. Футеровка снижает тепловые потери с поверхности нагреваемых заготовок и предохраняет электрическую изоляцию индуктора от обгорания и разрушения.

В зависимости от рабочей температуры индуктора футеровка может быть однослойной и многослойной. Так, при рабочей температуре до 500 °С, как это имеет место при нагреве под штамповку алюминиевых и магниевых сплавов, в качестве футеровки могут служить асбоцементные трубы или листовой асбест, свернутый в трубу и пропитанный жидким стеклом. В этом случае обычно футеровка состоит из одного слоя. Иногда между спиралью индуктора и слоем асбеста помещают второй слой в виде тонколистового стекломиканита. При нагреве медных и титановых сплавов до температуры 800 – 1000°C, а также сталей и сплавов до 1100 – 1250°C к футеровке и к ее материалам предъявляют более серьезные требования. В этом случае футеровка в зависимости от ее материала может быть также одно-, двух- и трехслойной. При нагреве металлов до температуры свыше 1000 °С футеровка должна включать основную часть – огнеупорную и, кроме нее, – теплоизоляционную. В качестве огнеупорного элемента футеровки

обычно применяют шамот или жароупорный бетон, а в качестве теплоизоляционного – асбест, миканит, стекломиканит и т. п.

К футеровке в целом и к ее составляющим при нагреве сталей предъявляют различные требования, в том числе взаимно противоположные. При нагреве металлов выше 800°C вплоть до температуры 1200 – 1300°C футеровка индуктора должна удовлетворять следующим требованиям: возможно меньшая толщина; низкая теплопроводность достаточная механическая прочность; высокая огнеупорность; хорошая стойкость против растрескивания при резких изменениях температуры; возможно меньшая электропроводность; низкая гигроскопичность; высокая шлакоустойчивость.

Футеровка должна обладать возможно меньшей теплопроводностью, чтобы снизить тепловые потери с поверхности заготовки. Если футеровка состоит из нескольких слоев, то теплопроводность всей футеровки в целом характеризуется так называемым эквивалентным коэффициентом

$$\text{теплопроводности } \lambda_3 = \frac{\ln \frac{d_{i+1}}{d_1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}},$$

где λ_3 — эквивалентный коэффициент теплопроводности футеровки, Вт/(м·К); d_3 – диаметр слоя, м; λ_i – средний коэффициент теплопроводности слоя при данной температуре, Вт/(м·К).

Таблица 5

Материал	Плотность γ , г/см ³	Расчетная формула коэффициента теплопроводности, Вт/(м·К)	Удельное электросопротивление $\rho \cdot 10^5$, Ом·м, при температуре, °С	
			800	1200
Шамот	1,8 – 2,1	$0,853 + 0,58 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	7 – 15	1,0 – 1,5
Динас	1,8 – 2,1	$0,93 + 0,7 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	800	9 – 14
Карборунд	1,0	$20,9 - 10,44 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	200	40
Асбестовый картон	1,0 – 1,2	$0,157 + 1,39 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	–	–
Бетон с заполнителем (глинозем, глина)	1,8 – 1,9	$0,427 + 1,28 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	–	–
Слюда	2,6 – 3,2	0,46 – 0,58	20 – 50	–
Примечание t_{cp} – средняя температура в сечении изделия				

В таблице 5 приведены значения теплофизических свойств некоторых основных материалов, применяемых для футеровки индукторов.

Широко применяемые в печном хозяйстве огнеупорные материалы обладают сравнительно высоким коэффициентом теплопроводности, значение которого при температурах выше 1000°C достигает $1,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и более. Снижение коэффициента теплопроводности огнеупора достигается повышением его пористости. Однако повышение пористости обычных огнеупорных материалов приводит к резкому снижению их механической прочности. В связи с этим желательно создание специальных пористых шлаков, которые могут удовлетворять требованиям, предъявляемым к материалу по огнеупорности и теплопроводности.

Для наиболее часто применяемых материалов футеровки, таких как шамот, максимально допустимая рабочая температура зависит от класса шамота. Например, для шамота класса «А» максимальная рабочая температура составляет $1300 - 1400^{\circ}\text{C}$, для класса «Б» – $1250 - 1300^{\circ}\text{C}$, для класса «В» – $1200 - 1250^{\circ}\text{C}$. Максимальная рабочая температура жароупорных бетонов достигает 1780°C . Таким образом, с точки зрения огнеупорности и шамот, и, тем более, жароупорный бетон являются достаточно приемлемыми материалами для огнеупорной части футеровки.

Материал основного элемента футеровки должен при прочих требованиях к нему обладать возможно меньшей усадкой. Промышленная эксплуатация индукторов со втулками из жаростойкого бетона показывает, что они выдерживают без разрушения 2 – 3-месячную эксплуатацию при температурах на их поверхности $1150 - 1170^{\circ}\text{C}$ и частых теплосменах. Шамотные втулки выходят из строя из-за растрескивания через 20 – 30 дней.

Материалы футеровки должны быть хорошими диэлектриками для того, чтобы в них не наводились токи, не возникали лишние электрические потери и не происходило замыкания витков спирали индуктора. Соблюдение этого требования особенно важно при использовании спирали без специальной изоляционной обмотки.

Высокая гигроскопичность материалов футеровки исключительно вредна, так как может способствовать замыканию витков спирали индуктора, особенно в местах повреждений ее изоляции или в случаях применения неизолированной спирали, и, кроме того, вызывать дополнительные внутренние напряжения в футеровке при резком ее высыхании за счет парообразования в порах. Отпотевание спирали индуктора практически неизбежно при работе в зимнее время, когда в неработающий индуктор впускается холодная вода. Часто растрескиванию основного огнеупорного элемента футеровки способствует слой асбеста, помещаемый поверх него. Асбест, являясь материалом гигроскопичным, впитывает влагу при отпотевании спирали и передает ее огнеупорному элементу. Практика показывает, что иногда можно обходиться без слоя асбеста, обертывая огнеупорные втулки непосредственно листовым стекломиканитом.

Материал основной части футеровки не должен химически реагировать с окалиной, образующейся при нагреве заготовок, так как в противном случае на футеровке образуются наросты, которые препятствуют перемещению заготовок и тем самым создают аварийную ситуацию.

4 Электроконтактный нагрев

4.1 Сущность электроконтактного нагрева

Переменный электрический ток в несколько тысяч ампер промышленной частоты и напряжением от 2 до 22 В подводится к медным зажимным контактам, в которых закрепляется металлическая заготовка. Ток пропускается через заготовку, нагревая ее до заданной температуры. Нагрев происходит за счет выделения теплоты в самом металле, благодаря сопротивлению нагреваемой заготовки прохождению тока. Сила тока обычно не превышает 2000 – 3000 А. Схема электроконтактного нагрева приведена на рисунке 15.

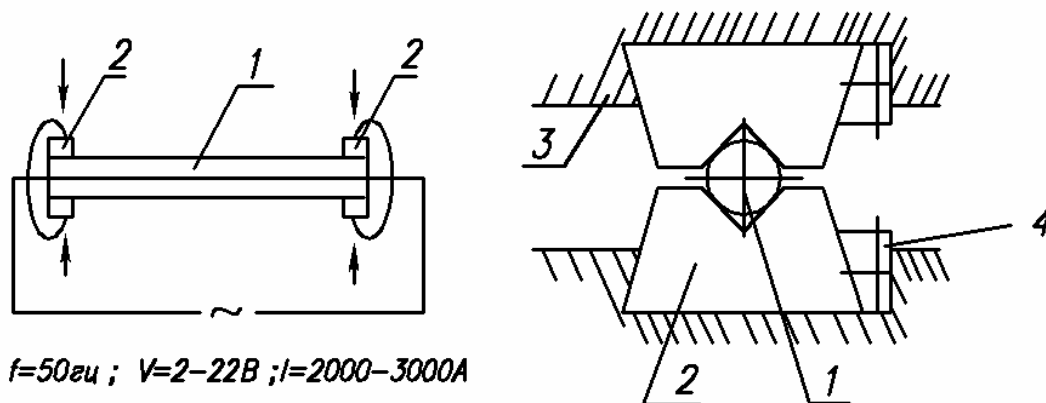


Рисунок 15. Схема электроконтактного нагрева: 1 – заготовка; 2 – медные контакты; 3 – охлаждаемые контактодержатели; 4 – прижим

Основными требованиями, предъявляемым к контактному нагреву, являются обеспечение равномерного распределения температуры по длине заготовки, отсутствие местного перегрева заготовки и стойкость контактов. Обычно электроконтактный нагрев проводится открыто, и поэтому происходит процесс окалинообразования, но он значительно менее интенсивен, чем при пламенном нагреве, так как электроконтактный нагрев осуществляется с большой скоростью.

Контактным способом можно нагревать заготовки как по всей длине,

так и частично, а также заготовки с переменным сечением по длине. При контактном нагреве невозможен методический нагрев заготовок. Темп нагрева не обеспечивает возможной производительности штамповочных механизмов. Поэтому к одному штамповочному механизму приходится устанавливать многоместный нагреватель.

Область применения электроконтактного нагрева ограничивается нагревом заготовок небольших сечений ($\varnothing 70 - 100$ мм). При больших сечениях требуется ток большой силы. При этом возникают трудности в его подведении и создании надлежащей величины усилия прижима контактов; возможно также и оплавление зажатых в контактах концов заготовок.

4.2 КПД установки для электроконтактного нагрева

КПД установок для электроконтактного нагрева достаточно высок и составляет 68 – 75%. КПД зависит от конструктивного исполнения установки и от степени ее использования при эксплуатации:

$$\eta = \frac{R_a}{R_a + R_b},$$

где R_a и R_b – активные сопротивления нагреваемой заготовки и вторичной цепи силового трансформатора.

Для повышения КПД необходимо уменьшать R_b , то есть следует максимально укоротить путь для прохождения вторичного тока от трансформатора к нагреваемой заготовке. При этом также достигается экономия меди. Кроме того, необходимо максимально уменьшить площадь, охватываемую вторичным контуром, т.к. его индуктивное сопротивление почти пропорционально этой площади. Наиболее удачная компоновка установки для электроконтактного нагрева получается тогда, когда трансформатор располагается непосредственно под контактными головками (рисунок 16). В этом случае пути вторичного тока будут наикратчайшими, а площадь, охватываемая вторичным контуром, – наименьшая.

КПД при эксплуатации электроконтактной установки можно повысить и за счет увеличения R_a . Это достигается при нагреве длинных заготовок.

Рациональными пределами применения заготовок для нагрева в электроконтактных установках являются значения $\frac{l}{d^2} = 1,0 - 5,5$. От отношения $\frac{l}{d^2}$ зависит также удельный расход электроэнергии, который в среднем составляет 325 кВт·ч на тонну нагреваемого металла.

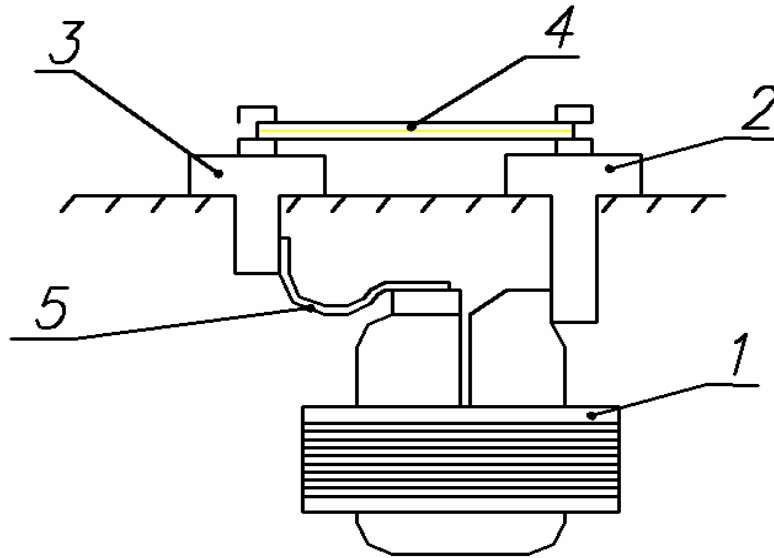


Рисунок 16. Схема установки для электроконтактного нагрева: 1 – трансформатор, 2 – неподвижная контактная зажимная головка, 3 – подвижная контактная зажимная головка, 4 – нагреваемая заготовка, 5 – переходная шина из медной фольги

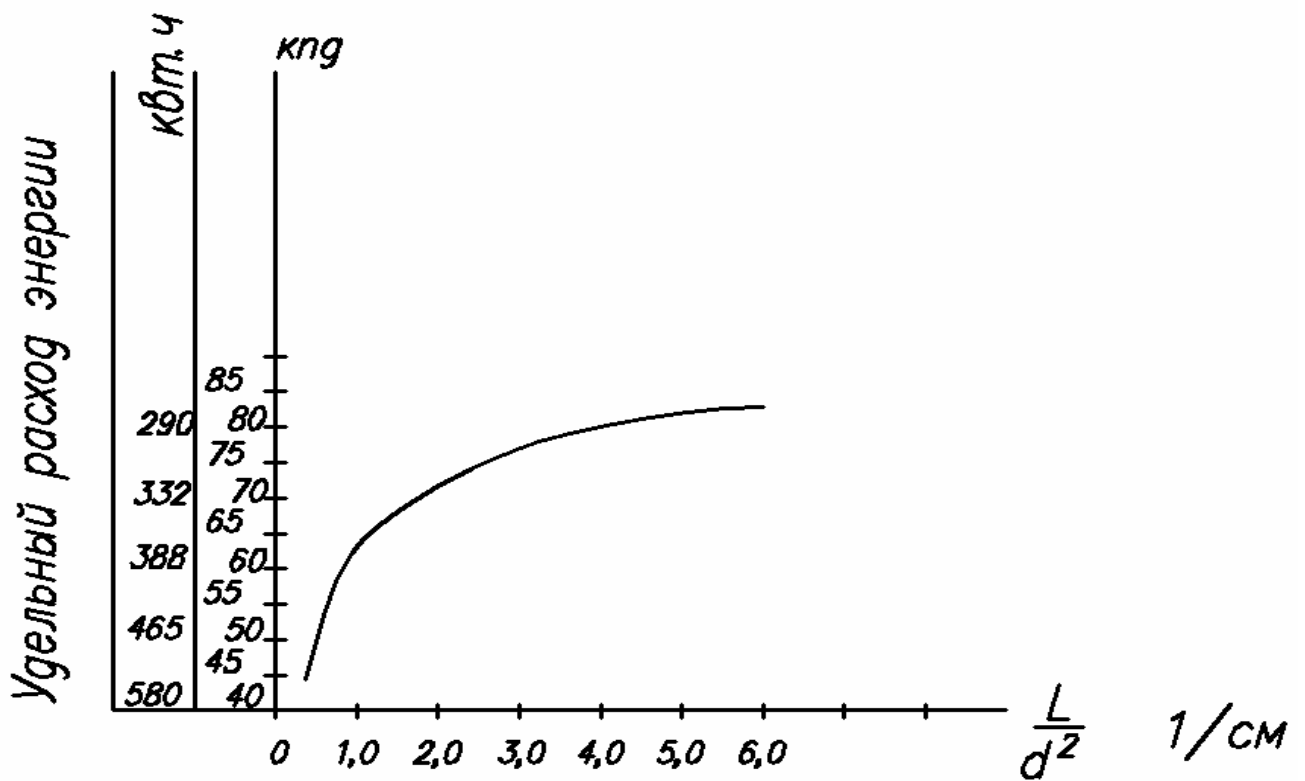


Рисунок 17. Зависимость КПД электроконтактной установки от величины l/d^2

4.3 Основные схемы нагрева в электроконтактных установках

В зависимости от числа зон нагрева электроконтактные установки подразделяются на:

1) однозональные: с нагревом заготовок на всю длину, с нагревом участка, с нагревом конца, с непрерывным нагревом длинных заготовок на всю длину;

2) двухзональные.

В зависимости от числа одновременно нагреваемых заготовок установки подразделяются на:

1) автономные (не связанные жестко со штамповочным оборудованием);

2) встроенные в штамповочное оборудование (горяче-высадочные автоматы).

4.4 Контактное давление и распределение температуры в заготовке

На скорость и качество нагрева существенное влияние оказывает контактное давление. С повышением контактного давления происходит смятие неровностей поверхности контактов, увеличивается количество точек соприкосновения контактов с заготовкой. Это приводит к уменьшению переходного сопротивления и отпадает вероятность пережога металла под контактами. В результате можно повысить силу тока, соответственно увеличить скорость нагрева. С другой стороны, уменьшение тепловыделения под контактами (контактодержатели охлаждаются водой) ведет к недогреву концов заготовки.

Сила контактного давления назначается в зависимости от диаметра заготовок. Так для $\varnothing 20 \div 50$ мм она должна быть 10 кН, а для $\varnothing 50 \div 70$ – 50 кН. По длине заготовка нагревается неравномерно. Перед контактами наблюдается повышенная температура, а на концах заготовки – понижения. Это происходит по двум причинам:

1) плотность тока под контактами и около них выше, чем в других частях заготовки;

2) наличие большого переходного сопротивления, особенно в первый период нагрева.

Однако вследствие охлаждения контактодержателей часть теплоты от концов заготовок отбирается. Температура заготовки непосредственно под контактами падает, а на расстоянии 5 – 15 мм от контактов создается некоторый местный нагрев (рисунок 18).

Для выравнивания температуры один конец заготовки, не идущий в клещи штамповщику, зажимается в контакты на длину, равную $0,5d$, или даже меньше.

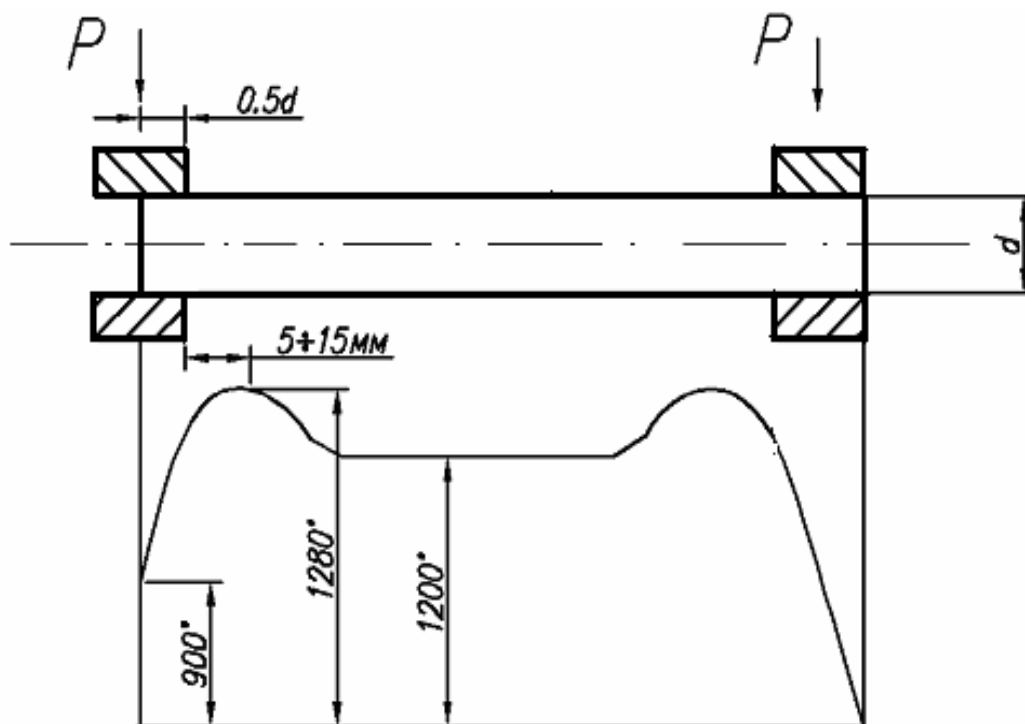


Рисунок 18. Распределение температуры по длине заготовки при электроконтактном нагреве

4.5 Определение времени нагрева заготовок

Количество выделенной теплоты зависит от силы тока и сопротивления заготовки. Основным фактором, позволяющим регулировать скорость нагрева, является сила тока, с повышением которой будет увеличиваться интенсивность нагрева, т.е. количество теплоты выделенное, в заготовке в единицу времени и отнесенное к единице ее длины.

Время нагрева заготовок

$$\tau = \frac{G_{100}c(T_k - T_n)}{4 \div 6}, \text{ с,}$$

где G_{100} – масса 100 мм длины нагреваемой заготовки, кг; c – средняя удельная теплоемкость металла при T_k , кДж/(кг·К); T_k и T_n – конечная и начальная температура заготовки, °С;

Для приближенных расчетов можно принимать: $T_k=1200^\circ\text{C}$; $T_n=15 - 20^\circ\text{C}$; для стали $c=0,7$ кДж/(кг·К) при температуре $T_k=1200^\circ\text{C}$.

4.6 Устройство однопозиционной электроконтактной установки К-16

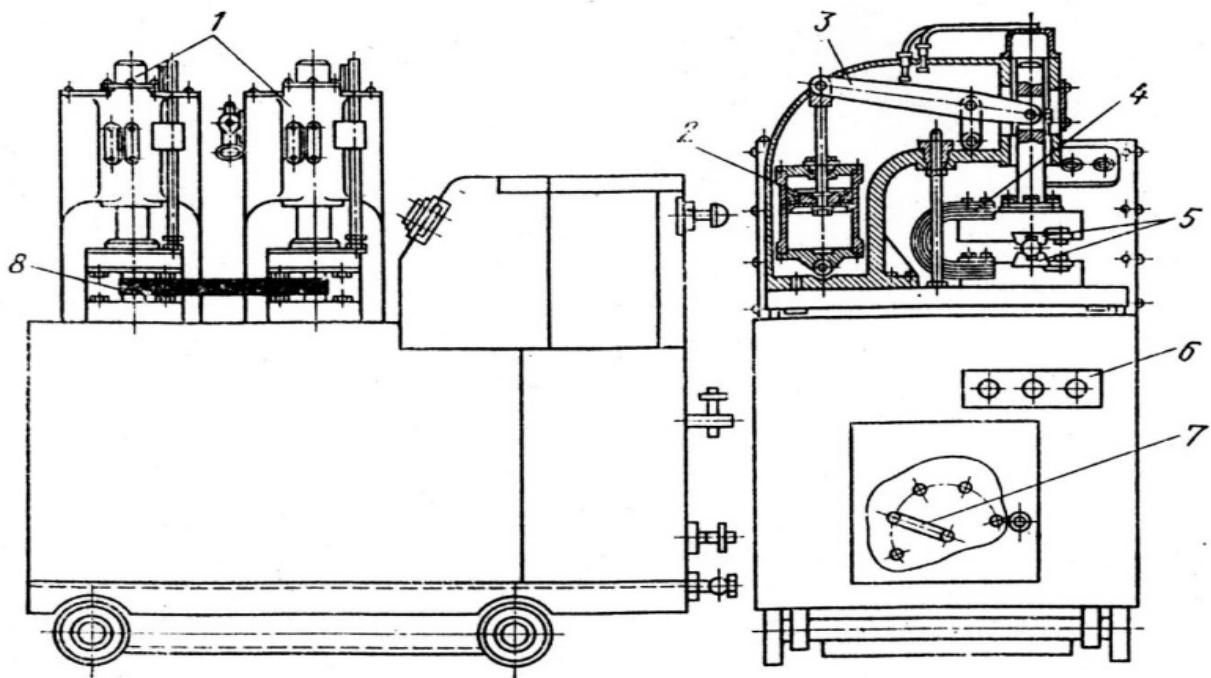


Рисунок 19. Электроконтактная нагревательная установка К-16: 1 – зажимные головки, 2 – пневмоцилиндр, 3 – рычаг, 4 – шинопровод, 5 – зажимные контакты; 6 – пульт управления; 7 – трансформатор; 8 – заготовка

4.7 Преимущества и недостатки электроконтактного нагрева

Преимущества перед индукционным нагревом:

- 1) возможность нагревать большой диапазон заготовок по длине и диаметру в одной установке;
- 2) бóльшая маневренность при переналадке нагрева с одного размера заготовки на другой;
- 3) не требуется преобразователя тока повышенной и высокой частоты;
- 4) КПД установки выше;
- 5) меньшая стоимость самой установки;
- 6) меньшая занимаемая площадь на рабочем участке и в целом в цехе.

Преимущества перед пламенным нагревом:

- 1) теплота возникает непосредственно в поверхностных слоях заготовки, что уменьшает вероятность появления больших температурных напряжений;
- 2) скорость нагрева в 10 – 15 раз выше;
- 3) бóльшая производительность;
- 4) компактность установки;
- 5) окисление и обезуглероживание в несколько раз меньше;
- 6) КПД выше.

Недостатки электроконтактного нагрева:

- 1) меньшая возможность механизации технологического процесса;
- 2) ограниченная возможность нагрева коротких заготовок;
- 3) возможный недогрев концов заготовок.

5 Нагрев металла в электрических печах сопротивления

5.1 Особенности нагрева металла в электрических печах сопротивления

В электрических печах сопротивления (ЭПС) нагрев металла проводится в рабочей камере с нагревательными элементами, изготовленными из жаростойких материалов, обладающих большим сопротивлением прохождению тока, которые, в свою очередь, нагреваются током промышленной частоты. Нагрев происходит путем излучения теплоты от нагревательных элементов на металл. Кладка печи также воспринимает лучистую энергию от нагревательных элементов и, будучи нагрета до более высокой температуры, чем металл, излучает на него лучистую энергию. Теплота с поверхности заготовок во внутренние слои передается теплопроводностью. Нагрев путем конвекции составляет малую долю.

Электрические печи сопротивления делят по способу загрузки на: периодического действия (садочные) и непрерывного действия (методические). При этом могут быть низкотемпературные (600 – 700⁰С), среднетемпературные (700 – 1250⁰С) и высокотемпературные (выше 1250⁰С) печи.

Мощность электропечей сопротивления колеблется от долей киловатта до нескольких мегаватт. Печи мощностью более 20 кВт обычно выполняют трехфазными и подключают к сетям с напряжением 120, 380, 660 В непосредственно или через печные трансформаторы. Коэффициент мощности печей сопротивления близок к единице, распределение нагрузки по фазам в трехфазных печах равномерное.

Применяемое в ЭПС электрическое оборудование подразделяется на силовое, аппаратуру управления, измерительную и пирометрическую. К силовому оборудованию относятся трансформаторы, понижающие и регулировочные автотрансформаторы, блоки питания, приводящие в действие механизмы электроприводов, силовая коммутационная и защитная аппаратура, рубильники, контакторы, магнитные пускатели, автоматические выключатели и плавкие предохранители. Большинство печей выполняют на напряжение питающей сети: они не нуждаются в трансформаторах и автотрансформаторах. Применение понижающих печных трансформаторов позволяет увеличить рабочие токи и применять для изготовления нагревателей проводники большего сечения, что повышает их прочность и надежность.

Все промышленные печи сопротивления работают в режиме автоматического регулирования температуры, что позволяет приводить в соответствие мощность печи с требуемым температурным режимом, а это, в свою очередь, ведет к снижению удельного расхода электроэнергии по сравнению с ручным регулированием. Регулирование рабочей температуры в электрических печах сопротивления проводится изменением поступающей в печь мощности.

Схемы ЭПС периодического действия представлены на рисунке 20. Электropечи периодического действия предназначаются для обработки часто меняющейся номенклатуры изделий. Основные элементы электropечи сопротивления показаны на рисунке 21.

Так как теплообмен в рабочем пространстве электрической печи сопротивления почти аналогичен теплообмену в пламенной печи, все явления происходящие в металле при нагреве аналогичны: тепловое расширение металла, структурные превращения. Возникновение температурных напряжений, окисление, обезуглероживание, перегрев, пережог и пр.

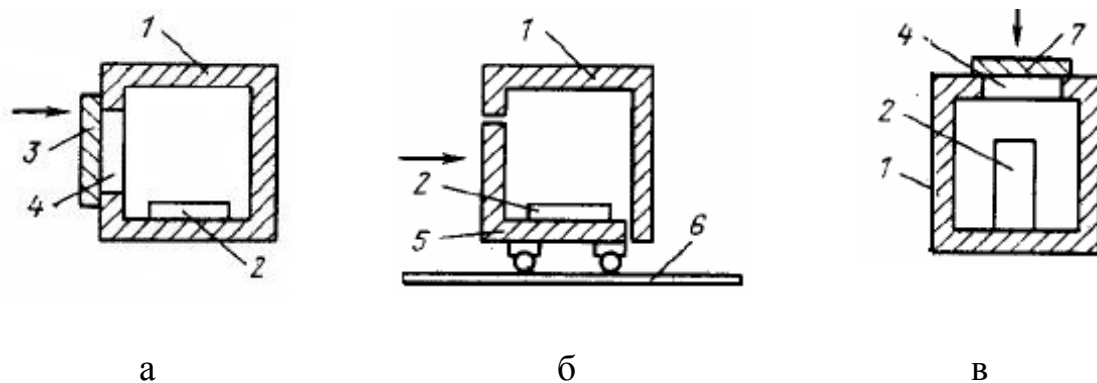


Рисунок 20. Схема печей периодического действия: а – камерная с загрузкой через окно; б – камерная с выдвижным подом; в – шахтная; 1 – каркас печи с футеровкой; 2 – нагреваемые тела (загрузка); 3 – дверца; 4 – загрузочный проем (окно); 5 – выдвижной под; 6 – рельс; 7 – крышка; стрелкой показано направление движения загрузки

Футеровка, состоящая из 3-х слоев различных материалов (3, 4, 5) должна обеспечить наименьшие потери теплоты. Наружная поверхность стенки печи не должна нагреваться до температуры выше 40 – 60 °С.

Рекомендуется кожух окрашивать алюминиевой краской, что уменьшает теплоотдачу на 2 – 3%.

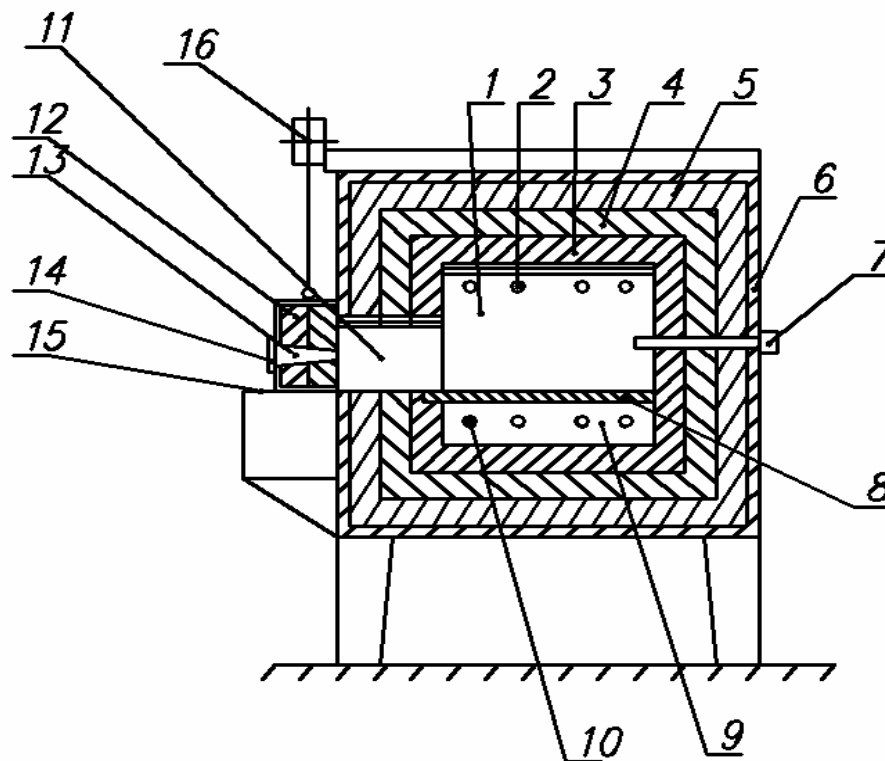


Рисунок 21. Конструкция электрической печи сопротивления:

1 – рабочее пространство; 2 – нагревательные элементы; 3 – огнеупорный слой; 4 – шамотный легковес; 5 – тепловая изоляция (зольная засыпка); 6 – кожух-каркас; 7 – термопара; 8 – карборундовая плита, на которую укладываются заготовки; 9 – подподовая камера, обеспечивающая прогрев плиты 8 и соответственно нижний подогрев заготовок; 10 – нагревательные элементы нижнего подогрева заготовок; 11 – загрузочно-разгрузочное рабочее окно; 12 – заслонка, скользящая по направляющим, закрепленным на каркасе; 13 – смотровое окно; 14 – крышка; 15 – лоток; 16 – механизм подъема заслонки, связанный с педалью и противовесом

5.2 Нагревательные элементы

Применяется два типа нагревательных элементов: неметаллические и металлические.

К неметаллическим относятся карборундовые (силитовые), угольные, графитовые, криптол (угольная крупа) и др.

В высокотемпературных печах используются неметаллические нагреватели: карборундовые и из дисилицида молибдена. Карборунд получают путем плавления при температуре 2000 – 2200°C смеси из чистого кварцевого песка, кокса, древесных опилок и поваренной соли. Опилки придают пористость, а поваренная соль способствует удалению вредных примесей типа Al_2O_3 , Fe_2O_3 и пр.

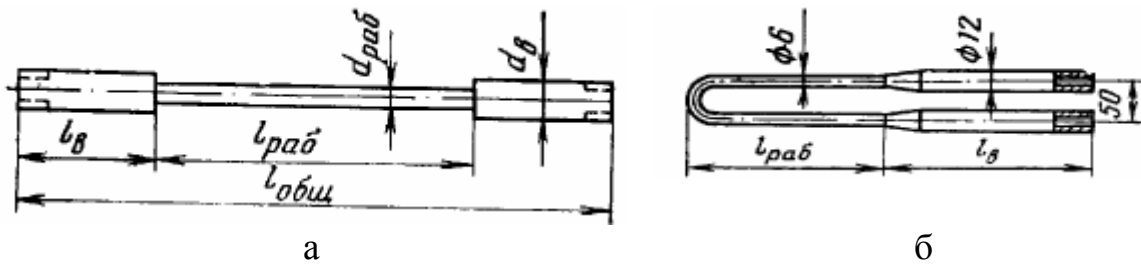


Рисунок 22. Эскизы неметаллических нагревателей: а – карборундовый, б – из дисилицида молибдена

Для печей с защитной атмосферой и вакуумных используются угольные и графитовые нагреватели. Нагреватели в этом случае выполняются в виде стержней, труб и пластин.

Наиболее распространенным сплавом для изготовления металлических нагревателей является нихром. Это хромоникелевые и железохромоникелевые сплавы состава 15 – 25% Cr, 75 – 80% Ni, 1,5 – 3% Mn; 2% Mo. Рабочая температура нихромовых сплавов 1000 – 1050 °С.

В высокотемпературных вакуумных печах и печах с защитной атмосферой применяются нагреватели из молибдена и вольфрама. Нагреватели из молибдена в вакууме могут работать до 1700°С, а в защитной атмосфере – до 2200°С. Температура применения в вакууме ниже, что объясняется испарением молибдена. Нагреватели из вольфрама могут работать до 3000°С. В отдельных случаях применяются нагреватели из ниобия и тантала.

Чем больше диаметр спирали и чем гуще ее шаг, тем легче разместить в печи нагреватели, но с увеличением диаметра уменьшается прочность спирали, увеличивается склонность ее витков лечь друг на друга. С другой стороны, с увеличением густоты намотки увеличивается экранирующее действие обращенной к изделиям части ее витков на остальные и, следовательно, ухудшается использование ее поверхности. Практика установила вполне определенные, рекомендуемые, соотношения между диаметром проволоки, шагом и диаметром спирали для проволоки от 3 до 7 мм диаметром: $h \geq 2d$ и $D = (6-8)d$ для нихрома и $D = (4-6)d$ – для менее прочных железохромоалюминиевых сплавов. Здесь t – шаг спирали, D – диаметр спирали, d – диаметр проволоки.

Нагревательные элементы большинства промышленных печей выполняются либо из ленты, либо из проволоки (рисунок 22,23). Обычно для изготовления нагревателей промышленных печей применяется проволока диаметром от 3 до 7 мм. Однако для печей с рабочей температурой 1000°С и выше следует брать проволоку диаметром менее 5 мм. Соотношения между шагом спирали и ее диаметром и диаметром проволоки выбирают таким образом, чтобы облегчить размещение нагревателей в печи, обеспечить

достаточную их жесткость и в то же время не затруднить чересчур теплоотдачу от них к изделиям.

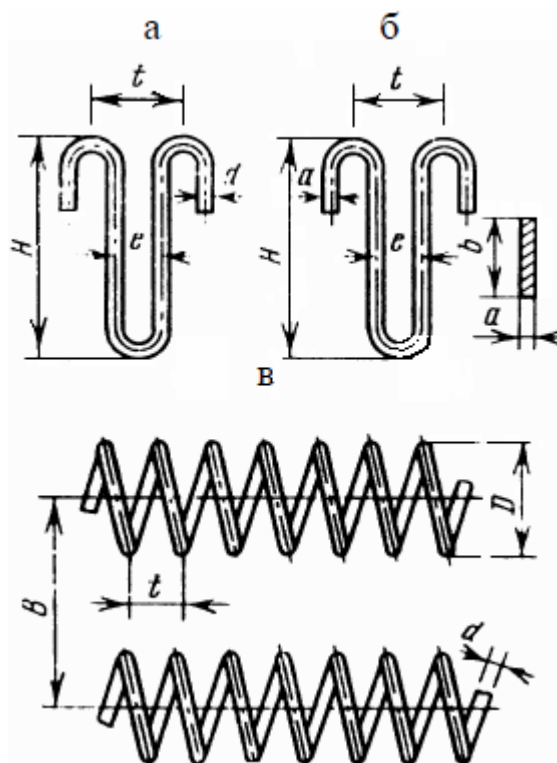


Рисунок 23. Эскизы проволочных и ленточных нагревателей: а – проволочный зигзагообразный, б – то же ленточный, в – спиральный

5.3 Краткая характеристика электропечи сопротивления периодического действия

5.3.1 Электропечь камерная с карбидокремниевыми нагревателями

Электропечь сопротивления камерная СНО-4.8.2,5/13-И2, представленная на рисунке 24 предназначена для нагрева деталей под закалку, для термообработки высоколегированных и быстрорежущих сталей, отжига стальной проволоки, ленты и керамики.

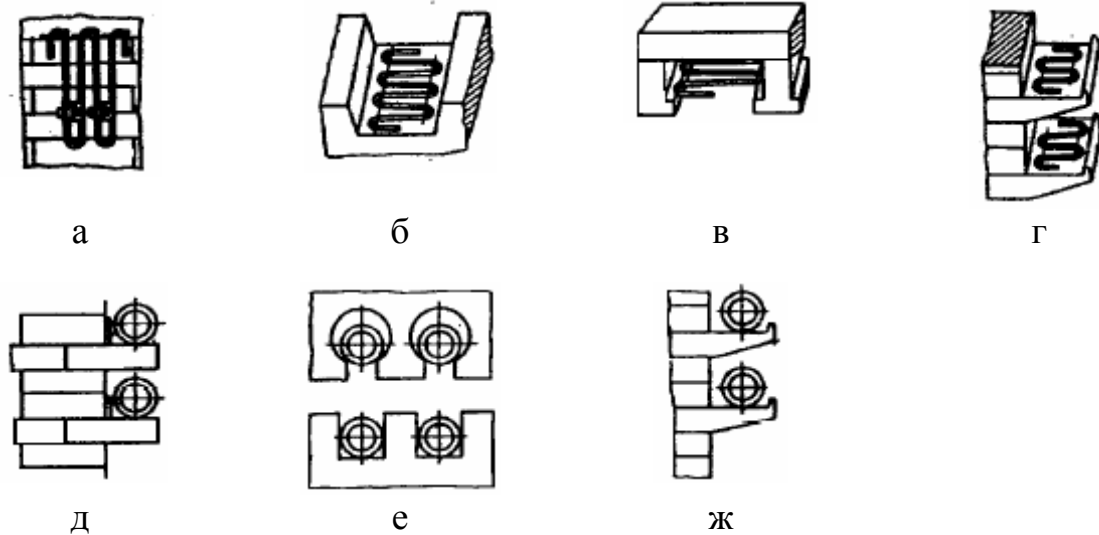


Рисунок 24. Способы применения проволочных нагревателей: а – зигзагообразный нагреватель на боковой стенке на металлических крючках; б – зигзагообразный нагреватель в поду; в – то же в своде; г – то же на керамических полочках; д – проволочная спираль на выступающих кирпичах боковой стены с привязкой к крючкам; е – проволочная спираль в сводовых камнях и в пазах пода; ж – проволочная спираль на керамических полочках

Климатическое исполнение печей регулируется ГОСТом 15150-69. Модификационные обозначения, принятые в названии: С – нагрев сопротивлением; Н – камерная; О – окислительная среда в рабочем пространстве; 4 – ширина рабочего пространства, дм; 8 – длина рабочего пространства, дм; 2,5 – высота рабочего пространства, дм; 13 – номинальная температура, сотни °С; И2 – исполнение.

Технические данные приведены в таблице 6.



Рисунок 25. Электродпечь сопротивления СНО-4.8.2,5/13-И2 с карбидокремневыми электронагревателями

Таблица 6

№	Наименование параметров	Тип электропечи СНО-4.8.2,5/13- И2
1	Установленная мощность, кВт, не более	50
2	Номинальная (потребляемая мощность), кВт, не более	40,3
3	Номинальная температура, °С	1300
4	Напряжение питающей сети, В	380, 400, 440
5	Номинальная частота, Гц	50 ± 1; 60 ± 1,2
6	Число фаз	3
7	Масса садки, кг, не более	250
8	Характер среды в рабочем пространстве	Окислительная
9	Размеры рабочего пространства, мм: - длина - ширина - высота	800 400 250
11	Мощность холостого хода, кВт, не более	10,9
12	Производительность , кг/ч (при нагреве садки от 850 до 1300°С), не менее	240
13	Масса, т, не более: - электропечи - футеровки	1,87 1,3

На рисунке 26 показаны габаритные размеры печи, дополнительно видно кожух 1, двухслойную футеровку 2, образующую камеру нагрева, карбидокремниевые электронагреватели 3 и теплоизолированную заслонку 4.

В данной электропечи кожух изготовлен из листовой стали. Футеровка состоит из муллитокремнеземистого волокнистого теплоизоляционного материала и слоя огнеупорного кирпича. В отверстия, имеющиеся в кожухе и футеровке, вставлены карбидокремниевые электронагреватели. Заслонка, теплоизолированная муллитокремнеземистым волокнистым материалом, подвешена к кожуху электропечи на рычаге. Регулирование температуры электропечи осуществляется автоматически. В период наладки возможно ручное регулирование температуры. Приборы и аппаратура системы управления установлены в шкафу управления 5.

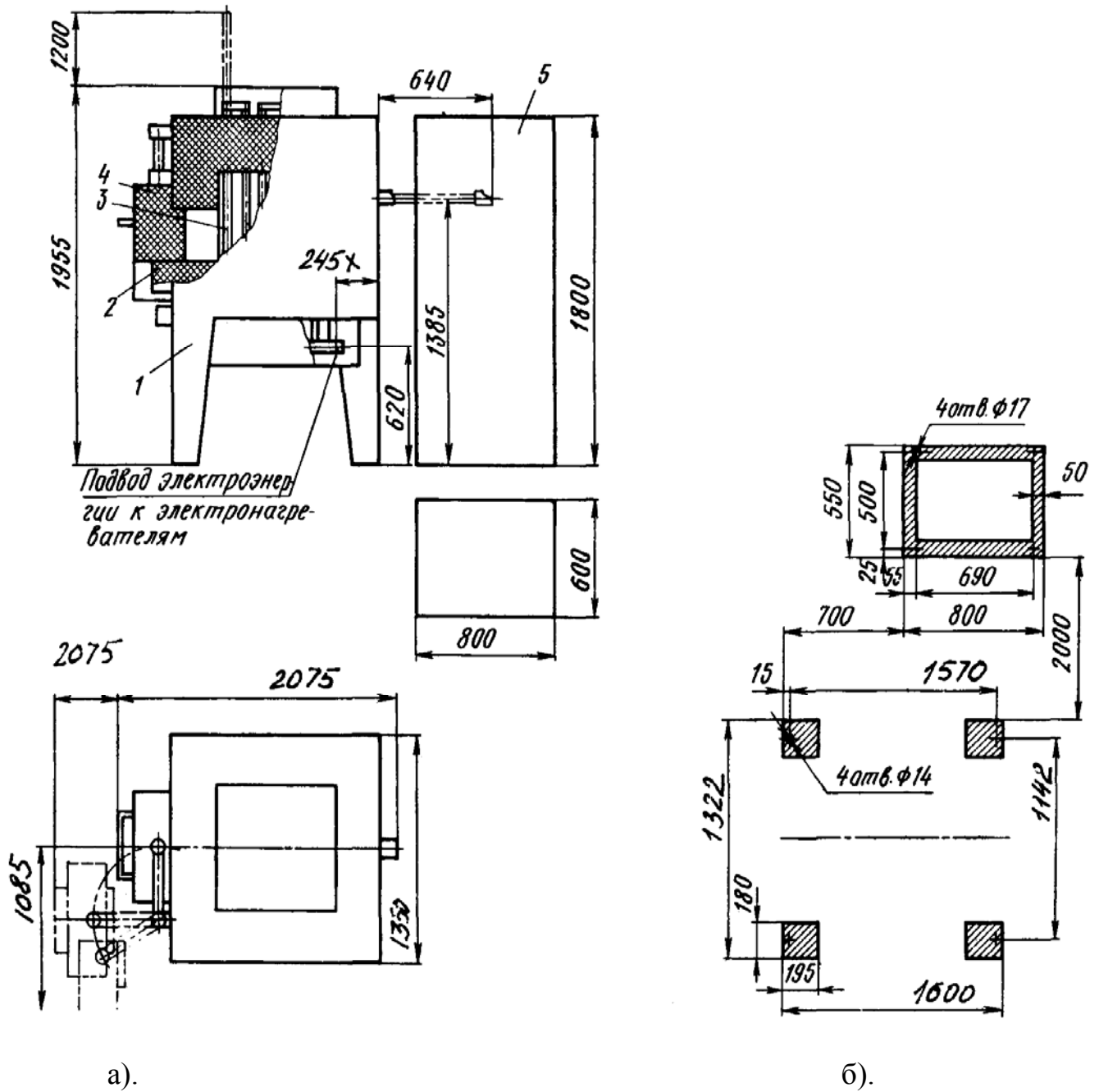


Рисунок 26. Габаритные (а) и установочные (б) размеры электропечей СНО-4.8.2,5/13-И2

На рисунке 27 показана камерная печь сопротивления в разрезе.

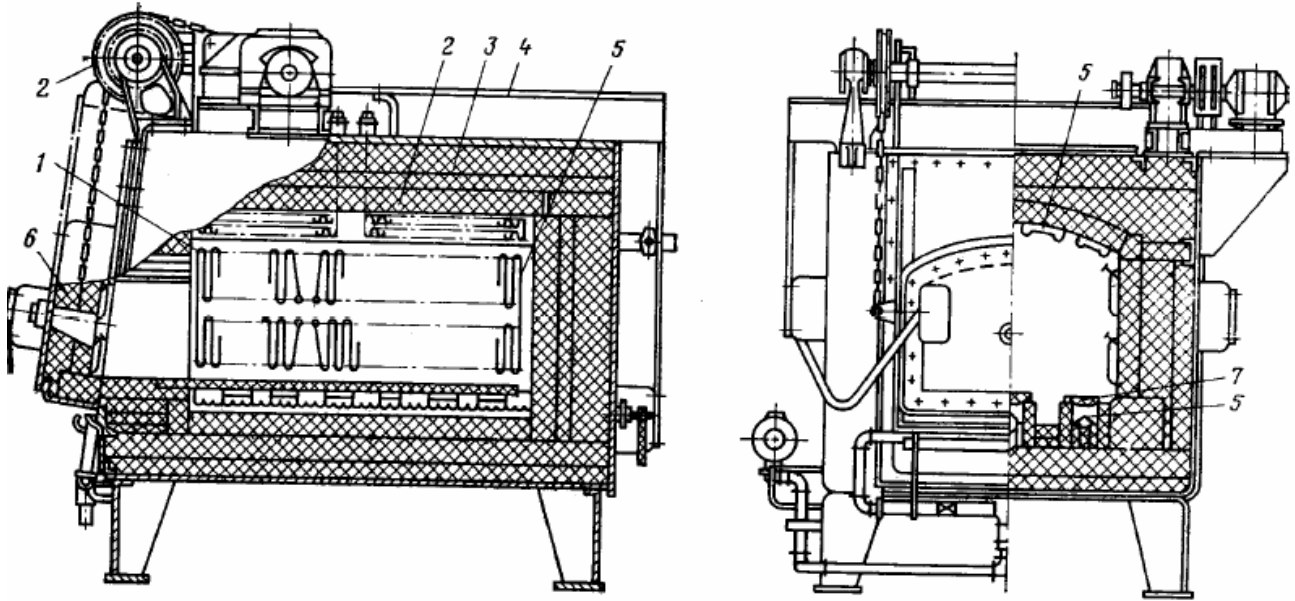


Рисунок 27. Камерная электропечь с загрузкой через окно: 1 – рабочая камера; 2 – огнеупорный слой футеровки; 3 – теплоизоляционный слой футеровки; 4 – кожух; 5 – нагревательные элементы; 6 – футерованная дверца; 7 – подовая плита

5.3.2 Камерная печь с выдвижным подом

Камерные электропечи с выдвижным подом (рисунок 28) применяют там, где не требуется контролируемая атмосфера. Для удобства загрузки электропечи имеют разные конструкции дверей и выкатных подов. Нагрев рабочей камеры проводится нагревателями спирального типа, расположенными на трех стенках, двери и на поду печи. Нагреватели изготовлены из сплава суперфехраль.



Рисунок 28. Камерная печь с выдвижным подом

5.3.3 Шахтная электрическая печь сопротивления

Шахтные электропечи являются второй по распространенности группой ЭПС периодического действия. Печи этого типа сравнительно небольших размеров рабочего пространства (диаметром примерно от 600 до 1000 мм). Эти ЭПС, так же как и камерные, просты по конструкции и достаточно универсальны (рисунок 29). Шахтные печи представляют собой футерованную шахту цилиндрической формы. Для вертикальных топливных печей отношение высоты рабочего пространства к диаметру принимается не менее трех. Нагреваемые изделия загружают и выгружают через отверстие сверху шахты.

Изделия помещают в специальную жароупорную корзину, которую загружают в рабочее пространство ЭПС; длинномерные изделия подвешивают в вертикальном положении непосредственно в ЭПС на приспособлениях. Для увеличения скорости нагрева и улучшения равномерности температуры в шахтных электропечах на крышке или поду устанавливают рабочее колесо вентилятора.

Рабочее пространство этих ЭПС представляет собой открытую сверху шахту с круглым, квадратным или прямоугольным сечением. Нагреватели в этих ЭПС обычно устанавливаются на боковых стенках, реже на дне электропечи, а в случае нагрева загрузки, имеющей форму полого цилиндра (например, бухты из проволоки, ленты), устанавливается вертикальный центральный нагреватель.

Электрические шахтные печи с окислительной атмосферой имеют индекс СШО, а с контролируемой атмосферой – СШЗ.

5.4 Электрические печи сопротивления непрерывного действия

В ЭПС непрерывного действия изделия загружаются в печь и, непрерывно или периодически перемещаясь по длине электропечи, нагреваются и выходят с другого конца нагретыми до определенной температуры. Температуры различных точек рабочего пространства могут быть различными или одинаковыми, однако они не изменяются во времени.

Электропечь непрерывного действия, как правило, имеет несколько тепловых зон с самостоятельным регулированием температуры, что дает возможность создавать различные температурные режимы. Длина зоны обычно равна 1,5 – 2 м.

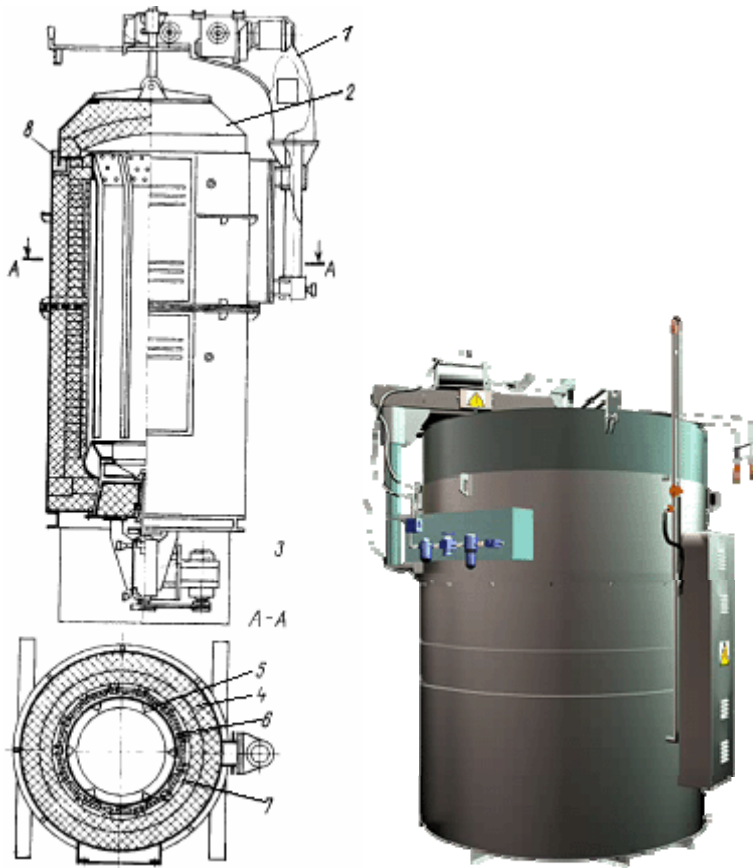


Рисунок 29. Шахтная электропечь: 1 – механизм подъема и поворота крышки; 2 – крышка; 3 – вентилятор; 4 – футеровка; 5 – направляющие; 6 – экран; 7 – нагреватели; 8 – песочный затвор

Печи могут комплектоваться камерами охлаждения, могут работать с контролируемыми атмосферами. С загрузочной и разгрузочной сторон устанавливают шлюзовые камеры.

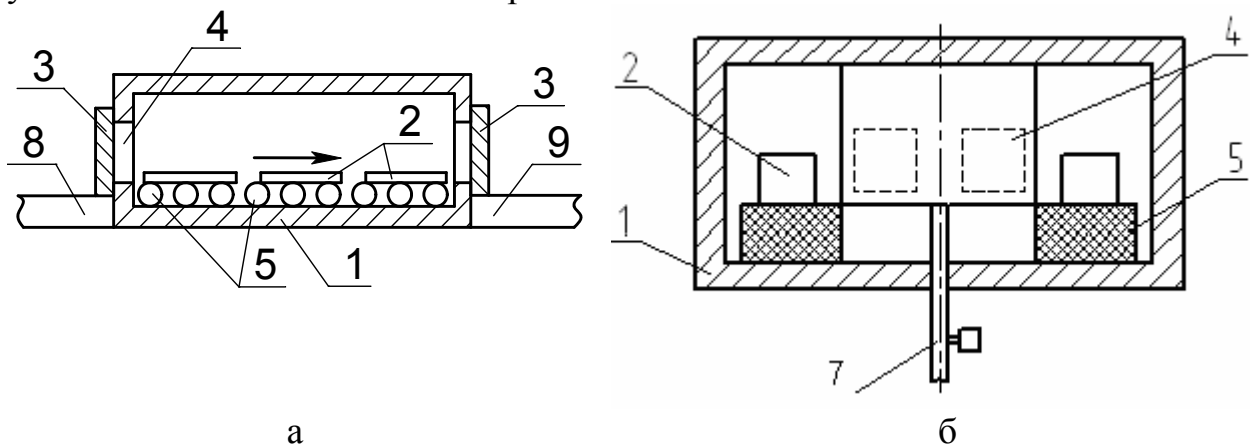


Рисунок 30. Схемы печей непрерывного действия: а – рольганговая; б – карусельная; 1 – каркас печи с футеровкой; 2 – нагреваемые тела (загрузка); 3 – дверца; 4 – загрузочные проемы; 5 – рольганг с приводом; 6 – кольцевой под; 7 – вал с приводом; 8 – загрузочный стол; 9 – разгрузочный стол

5.4.1 Рольганговая электрическая печь сопротивления

В рольганговых печах могут быть нагреты заготовки, разнообразные по форме и массе. Рольганговые ЭПС могут комплектоваться загрузочным столом или загрузочным механизмом, камерой загрузки, камерой охлаждения, закалочным баком, разгрузочным столом или разгрузочным механизмом, разгрузочной камерой, кантователем, транспортером возврата поддонов.

Электropечи с небольшой высотой рабочего пространства для возможности проведения ремонта имеют съемные своды. При использовании рольганговых ЭПС для работы с контролируемыми атмосферами ролики должны быть герметичными, в случае необходимости они охлаждаются водой. Движение роликов, как правило, осуществляется общим наружным приводом.

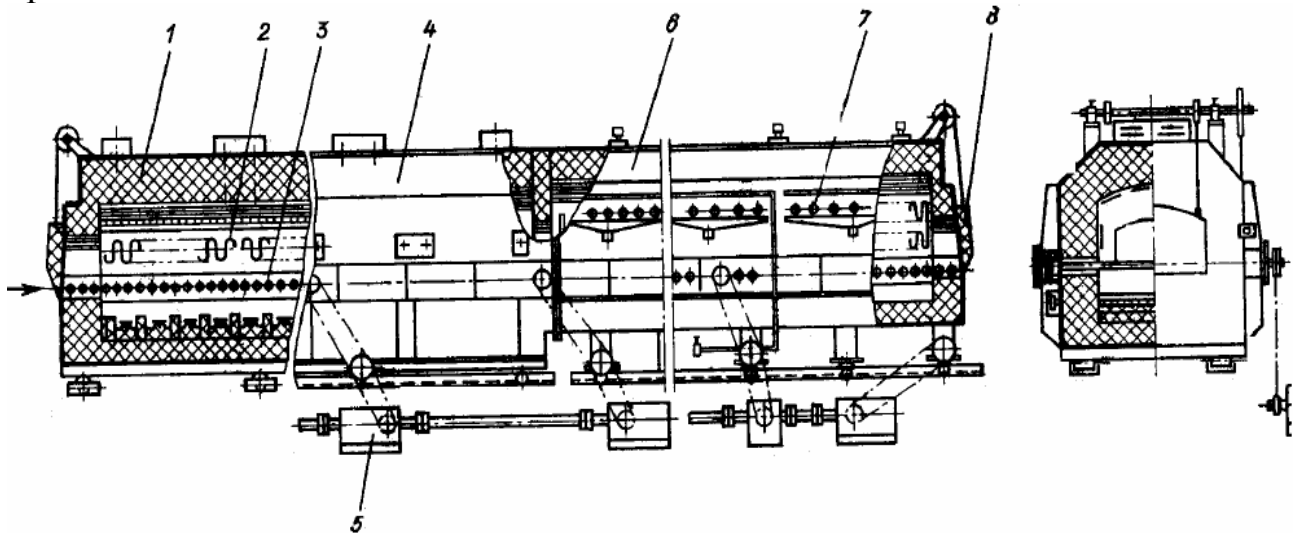
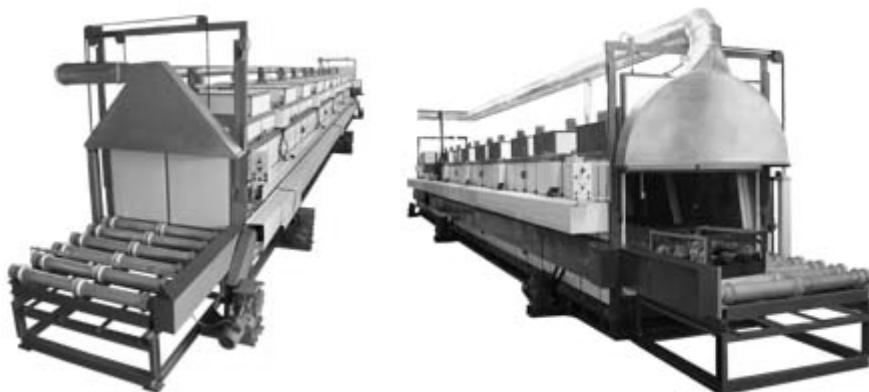


Рисунок 31. Рольганговая электropечь: 1 – футеровка; 2 – нагреватель; 3 – рольганг; 4 – кожух; 5 – привод рольганга; 6 – камера охлаждения; 7 – система водоохлаждения; 8 – дверца



5.4.2 Карусельная печь сопротивления

В карусельных ЭПС (рисунок 32) можно нагревать изделия сложной конфигурации без поддонов, что не всегда возможно в других печах непрерывного действия. Карусельные электрические печи сопротивления могут быть приспособлены для работы с защитной атмосферой, для этого оконные проемы оборудуются пламенными завесами и шторками. Недостаток – в сложности осуществления возможности механизации загрузки и выгрузки заготовок, так как загрузочный и разгрузочный проемы находятся рядом.

Вращение пода может быть непрерывным или прерывистым. Если на вращающемся поду расположены нагревательные элементы, то электропитание к ним подводится через скользящие контакты. Карусельная печь может выполняться с пульсирующим подом, шагающим подом.

5.5 Область применения, преимущества и недостатки

Электropечи сопротивления применяются для нагрева цветных металлов и сплавов перед пластическим деформированием, а также мелких стальных заготовок.

Преимущества:

- 1) легкость регулирования теплового режима, соблюдения точной и равномерной температуры нагрева;
- 2) возможность герметизации рабочего пространства печи;
- 3) возможность обеспечить безокислительный нагрев;
- 4) высокий КПД;
- 5) удобство обслуживания;
- 6) высокая гигиеничность.

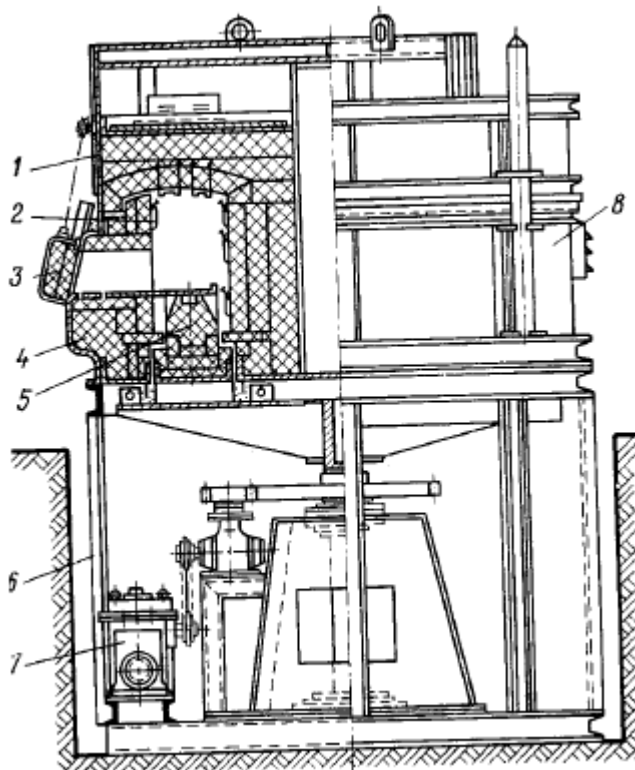


Рисунок 32. Типовая карусельная электропечь: 1 – съемный свод; 2 – нагреватели; 3 – дверца; 4 – футеровка; 5 – вращающийся под; 6 – рама; 7 – привод механизма; 8 – кожух

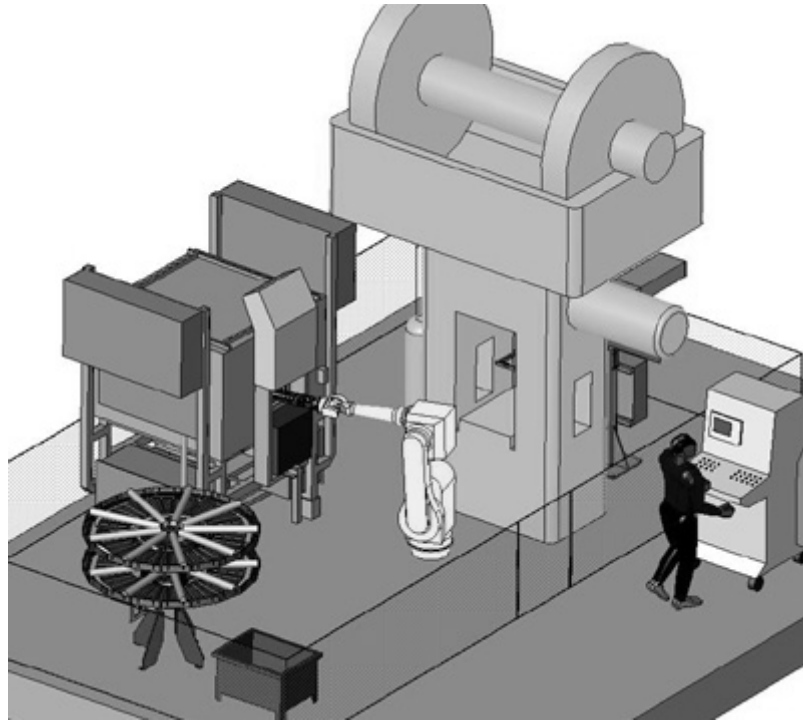


Рисунок 33. Схема расположения печи на участке объемной штамповки

5.6 Расчет электрической печи сопротивления

Расположение нагревателей в печи должно определяться как технологическими требованиями, так и возможностью размещения их в печи. Следующим этапом является определение времени нагрева садки. Если часовая производительность печи задана, то время цикла, ч,

$$\tau_{\text{цикл}} = \frac{G}{M},$$

где G – масса загрузки печи, кг; M – ее часовая производительность, кг/ч.

Время цикла в общем виде

$$\tau_{\text{цикл}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{пр}},$$

где $\tau_{\text{нагр}}$ – время нагрева; $\tau_{\text{выд}}$ – время выдержки; $\tau_{\text{пр}}$ – время простоя печи.

Время простоя печи $\tau_{\text{пр}}$ складывается из времени ее загрузки и выгрузки, а иногда также из времени, необходимого на ее чистку или подправку. Время выдержки изделий в печи $\tau_{\text{выд}}$ задается технологическим процессом, в противном случае оно сливается с последним этапом нагрева. Для определения времени нагрева $\tau_{\text{нагр}}$ необходимо задаться значением удельного полезного теплового потока $q_{\text{п}}$. Полезный тепловой поток, Вт/м² :

$$q_{\text{п}} = \frac{C_{\text{пр}}}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{ст}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right],$$

где $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент лучеиспускания; $\varepsilon_{\text{изд}}$ – степень черноты изделия; $\varepsilon_{\text{ст}}$ – степень черноты стен камеры; $F_{\text{изд}}$ – тепловоспринимающая поверхность изделия; $F_{\text{ст}}$ – поверхность стен камеры; $T_{\text{печи}}$ – температура в камере печи; $T_{\text{изд}}$ – температура изделия

После определения времени нагрева и производительности печи следует приступить к расчету тепловых потерь печи и к составлению энергетического баланса:

$$Q_{\text{цикл}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{пот.ср}} \tau_{\text{цикл}},$$

где $Q_{\text{пол}}$ – полезная теплота; $Q_{\text{всп}}$ – теплота, расходуемая на нагрев вспомогательного оборудования; $q_{\text{пот.ср}}$ – тепловые потери за время одного цикла.

Полезная теплота, идущая на нагрев садки:

$$Q_{\text{пол}} = G_{\text{изд}} C_{\text{изд}} (t_{2\text{изд}} - t_{1\text{изд}}) + G_{\text{изд}} (q_{2\text{изд}} - q_{1\text{изд}}),$$

где q – теплосодержание; C – удельная теплоемкость; t – температура; G – масса материала.

Теплота, идущая на нагрев вспомогательного оборудования,

$$Q_{\text{всп}} = G_{\text{всп}} C_{\text{всп}} (t_{2\text{всп}} - t_{1\text{всп}}) + G_{\text{газ}} C_{\text{газ}} (t_{2\text{газ}} - t_{1\text{газ}}).$$

Тепловые потери за время одного цикла складываются из тепловых потерь за отдельные периоды цикла, т.е. из потерь за время нагрева, выдержки, остывания и простоя печи при загрузке и выгрузке:

$$q_{\text{пот.ср}} \tau_{\text{цикл}} = q_{\text{пот.нагр}} \tau_{\text{нагр}} + q_{\text{пот.выд}} \tau_{\text{выд}} + q_{\text{пот.ост}} \tau_{\text{ост}} + q_{\text{пот.пр}} \tau_{\text{пр}}.$$

Отдельно подсчитываются тепловые потери через закрытую и открытую дверцы, причем учитывается время открытого состояния последней:

$$q_{\text{пот.дв}} = q_{\text{пот.откр.дв}} \frac{\tau_{\text{откр}}}{\tau_{\text{цикл}}} + q_{\text{пот.закр.дв}} \frac{\tau_{\text{цикл}} - \tau_{\text{откр}}}{\tau_{\text{цикл}}}$$

Потери через тепловые короткие замыкания следует подсчитывать, оценивая температуру на обоих концах металлического стержня (t_1 и t_2), проходящего через стенку:

$$q_{\text{пот.к.х}} = \lambda \frac{t_2 - t_1}{L_{\text{стр}}} F_{\text{стр}},$$

где $L_{\text{стр}}$ – длина стержня; $F_{\text{стр}}$ – сечение стержня; λ – коэффициент теплопроводности.

Расход энергии на единицу обрабатываемой в печи продукции может быть определен из выражения

$$A = \frac{Q_{\text{цикл}}}{M\tau_{\text{цикл}}}.$$

Тепловой КПД печи

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{пот}}\tau_{\text{цикл}}}.$$

Мощность печи периодического действия

$$P_{\text{печи}} = K \frac{Q_{\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}},$$

где K – коэффициент запаса.

Особое место занимает нагрев в таре или муфеле. В этих условиях определение времени нагрева расчетным путем затруднительно, и оно обычно задается на основе опытных данных.

6 Нагрев стальных заготовок в соляных ваннах

Рабочая часть ванны представляет собой керамический тигель 1, который заполняется солью 2 (рисунок 34). Сорт и состав соли зависит от требуемой температуры. Для нагрева заготовок до температуры 850 – 1350°C применяется соль состава 20%KCl+80%BaCl₂. В тигель опускаются два электрода 3, которые подключаются гибкими шинами 4 к трансформатору 5 со стороны низкого напряжения. При пропускании через соль переменного электрического тока соль нагревается вследствие своего собственного сопротивления прохождению тока и при температуре 700 – 750 °C плавится. Благодаря перегреву соли между электродами и наличию значительных электромагнитных сил вокруг электродов в ванне образуется мощная циркуляция соли, обеспечивающая равномерный прогрев всего ее объема.

Заготовки погружаются в расплавленную соль и тем включаются в цепь тока.

Предварительный подогрев заготовок до температуры 600°C уменьшает время нагрева в соляной ванне на 10 – 30%.

Соль с заготовки удаляется погружением в течение 1 – 2 секунд в холодную воду. Жидкая пленка соли превращается в твердую корку, которая легко отталкивается. Температура заготовки при этом практически не уменьшается (понижается на 20 °C), так как вокруг горячей заготовки образуется плотная паровая рубашка, которая изолирует металл от холодной воды.

Характеристика солей, применяемых в соляных ваннах, приведена в таблице 7.

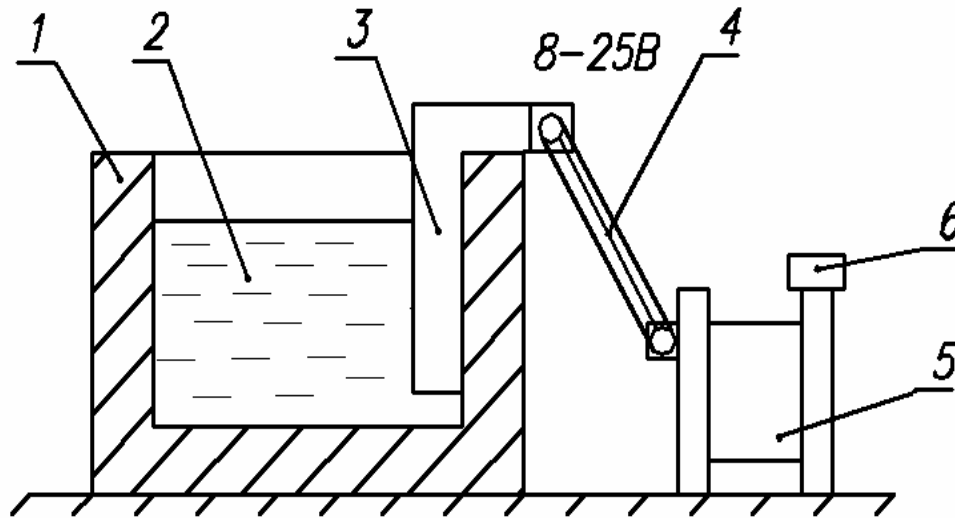


Рисунок 34. Схема нагрева в соляной ванне

Таблица 7

Соль	Химическая формула	Температура плавления, °С	Область применения
Хлористый калий	KCl	740÷804	Закалка и нагрев поковки и штамповку
Хлористый натрий	NaCl	776÷820	
Сода	Na ₂ CO ₃	814÷820	
Поташ	K ₂ CO ₃	910	
Хлористый барий	BaCl ₂	960	

Преимущества перед пламенным нагревом:

1) высокая скорость нагрева (в 3 – 4 раза выше, чем в пламенных печах) вследствие более высокой удельной теплоемкости жидкостей по сравнению с газами;

2) высокая равномерность нагрева ($\pm 3 - 5$ °С);

3) отсутствие контакта заготовки с кислородом воздуха в процессе нагрева (малоокислительный нагрев);

4) простота механизации загрузки и выгрузки заготовок;

5) соль является смазкой для штампов, что снижает силу штамповки и повышает срок службы штампов.

Недостатки:

1) наличие большого количества соляных паров ухудшает гигиенические условия цеха;

2) большие потери теплоты излучением;

3) большой унос соли, особенно при нагреве металлических заготовок;

4) при штамповке соль разбрызгивается;

5) часть соли задерживается в ручьях штампа, что ведет к незаполнению полости ручья металлом.

6.1 Краткая характеристика соляных электрованн

Электрованны соляные имеют общий вид, представленный на рисунке 35.



Рисунок 35. Соляная электрованна СВС-2,7/13И1

Модификационное обозначение электрованны: С – нагрев сопротивлением; В – ванна; С – соляная; 2 – максимальный диаметр садки, дм; 7 – максимальная высота садки; 13 – температура расплавленной среды, сотни °С; И1 – исполнение.

Электрованны СВС-2,7/13И1 представляют собой футерованную камеру, заполненную расплавленной солью, в которую опущены металлические электроды, и состоят из кожуха, футеровки, электродной группы, выемных устройств и нагревателя. Кожух круглый, сварной из листового проката. Футеровка состоит из огнеупорного тигля, сложенного из высокоглиноземистых блоков, утрамбованной засыпки из высокоглиноземистого мертеля, слоя секторных кирпичей из легковесного шамота, теплоизоляции из легковесного шамота и пенодиатомита.

Три электрода массивного сечения свободно опущены в углы шестигранного огнеупорного тигля. Каждый электрод выполнен из двух частей – электродержателя и рабочей части, которая является сменным элементом. Для подсоединения токоподводящих шин к электродержателям приварены контактные пластины. Удаление паров солей с зеркала электрованны производится вытяжным устройством, подсоединенным к цеховой вытяжной вентиляционной системе. Для измерения, записи и регулирования температуры расплава служит электронный потенциометр, датчиком которого является термопара.

В электрованнах имеется ручное или автоматическое управление подачей напряжения на электроды. В автоматическом режиме при температуре расплава ниже заданной включается промежуточное реле приставки позиционного регулирования, которое дает команду на включение контактора, подающего напряжение на электроды. При достижении заданной

температуры расплава промежуточное реле отключается, отключая при этом контактор.

Технические характеристики приведены в таблице 8.

Таблица 8

Наименование параметра	Норма параметра СВС-2,7/13И1
Установленная мощность, кВт	160
Номинальная температура, °С	1300
Напряжение питающей сети, В	380
Частота, Гц	50
Число фаз	3
Напряжение на электродах, В:	21,5
Напряжение на внешнем нагревателе, В	21,5
Производительность, кг/ч	500
Среда в рабочем пространстве	Расплав солей
Размеры рабочего пространства (по садке), мм:	
- диаметр	200
- глубина	700
Масса футеровки не более, т.	1,66
Масса электрованны (без шкафа управления и трансформатора) не более, т	2,37

7 Пламенный нагрев

7.1 Топливо. Признаки топлива и его состав

Топливо есть вид горючего, которое используется для получения тепловой энергии. Признаками, которые дают возможность отнести горючие вещества к топливу, являются:

- 1) природные запасы горючего должны быть достаточно велики;
- 2) его добыча или получение из природных материалов должны быть экономически выгодными;
- 3) в горючем должно содержаться как можно меньше инертных примесей и оно должно обладать способностью длительного хранения;
- 4) продукты горения должны быть газообразными и безвредными, т.е. удовлетворять гигиеническим и экологическим требованиям;
- 5) процесс сжигания топлива должен обеспечить возможность управления.

По физическому состоянию топливо делится на твердое (уголь, торф, сланцы и пр.), жидкое (нефть, мазут и пр.) и газообразное; каждое из этих топлив, в свою очередь, делится на естественное (природное) и искусственное. В кузнечно-штамповочном производстве применяется газообразное топливо – природный газ и некоторые искусственные газы. Состав и количество летучих веществ является одним из основных показателей, характеризующих топливо с точки зрения воспламенения, длины пламени и пр.

Топливо характеризуется теплотой сгорания. Теплота сгорания – это то количество теплоты, которое выделяется при сгорании 1 кг (1 м³) топлива.

Различные составляющие топлива имеют различную ценность. Углерод – наиболее важная составляющая топлива, воспламеняется при температуре 750°С. При горении выделяет значительное количество теплоты: в среднем, около 20000 кДж/кг.

Водород воспламеняется при температуре около 750°С. При горении водород выделяет также значительное количество теплоты – порядка 13000 кДж/кг. Водород находится в топливе в виде различных соединений с углеродом, серой, кислородом и в свободном виде.

Азот является инертным газом; он не горит и не способствует горению. В условиях топочного процесса в свободном виде полностью переходит в продукты горения.

Кислород является балластом органической части топлива и не только понижает содержание других элементов, но и частично обесценивает значение этих элементов как источников тепловой энергии, образуя с ним ряд соединений (Н₂О; СО₂; SO₂ и др.). С другой стороны кислород необходим для поддержания процесса горения.

Сера в топливе является вредным элементом, так как:

- 1) при нагреве заготовок взаимодействует с металлом, придавая ему краснотомкость, повышенную хрупкость;
- 2) сернистый газ разъедает металлические части топки и дымоходов, а также отравляет окружающий воздух, губит растительность и портит окружающие предметы.

Для определения состава топлива производится его анализ. Анализ топлива подразделяется на элементарный и технический. Элементарный анализ топлива ставит целью определить содержание всех элементов и отдельных химических соединений, входящих в состав топлива.

Газообразное топливо состоит из смеси газов: СО; Н₂; С_nН_m; СО₂; N₂; О₂; Н₂S и пр. Анализ химических соединений газообразного топлива производится путем последовательного поглощения его отдельных составляющих различными реактивами и дает в объемных процентах содержание частей газовой смеси (таблица 9).

Таблица 9

Состав сухого газа	CO_2^{C}	CO^{C}	H_2^{C}	$\text{C}_n\text{H}_m^{\text{C}}$	$\text{H}_2\text{S}^{\text{C}}$	O_2^{C}	N_2^{C}	–	100%
Состав влажного газа	CO_2^{C}	CO^{P}	H_2^{P}	$\text{C}_n\text{H}_m^{\text{P}}$	$\text{H}_2\text{S}^{\text{P}}$	O_2^{P}	N_2^{P}	$\text{H}_2\text{O}^{\text{P}}$	100%

Содержание влаги в газообразном топливе определяется экспериментально в виде массы воды в единице объема и обозначается W кг/м³.

Формула для пересчета сухого газа на влажный имеет вид:

$$K^{\text{ВЛ}} = K^{\text{C}} \frac{100}{100 + 0,1242W}.$$

Например, для углекислого газа

$$\text{CO}_2^{\text{ВЛ}} = \text{CO}_2^{\text{C}} \frac{100}{100 + 0,1242W}.$$

Новая составляющая H_2O подсчитывается как

$$\text{H}_2\text{O}^{\text{P}} = 0,1242W \frac{100}{100 + 0,1242W}.$$

Технический анализ – это упрощенный анализ топлива, который дает вполне надежную характеристику топлива, а выполняется простыми лабораторными средствами. При этом определяют в массовых процентах содержание влаги, серы, горючих летучих, зольность. Определяют также теплоту сгорания топлива.

7.2 Теплота сгорания топлива

Количество теплоты, которое выделяется при сгорании 1 кг (1 м³) топлива, называется теплотой сгорания топлива. Различают два вида теплоты сгорания топлива – высшую $Q_{\text{В}}$ и низшую $Q_{\text{Н}}$. При определении $Q_{\text{В}}$ учитывается количество теплоты, расходуемое на испарение содержащейся в топливе влаги, образовавшейся при горении водорода. При определении $Q_{\text{Н}}$ – исключают количество теплоты, расходуемое на испарение влаги.

Теплота сгорания топлива может быть определена опытным путем или вычислена по данным анализа топлива. Определение теплоты сгорания топлива опытным путем производится в калориметре, где проба топлива сжигается в чистом кислороде в калориметрической бомбе, погруженной в сосуд с водой. Теплота сгорания топлива по элементарному анализу подсчитывается суммированием произведений тепла горения составных частей топлива на их процентное содержание; полученная сумма делится на 100.

Таким образом, теплота сгорания топлива:

$$Q_H^p = 128CO + 108H_2 + 360CH_4 + \dots + 231H_2S, \text{ кДж/м}^3.$$

Для оценки топлива производится его сравнение с так называемым условным топливом, низшая теплота сгорания которого принимается

$$Q_H^{ysl} = 29300 \text{ кДж/кг}.$$

Отношение теплоты сгорания данного топлива к теплоте сгорания условного топлива называется калорийным эквивалентом:

$$\mathfrak{E}_k = \frac{Q_H^p}{29300}.$$

7.3 Природное газообразное топливо

Природный газ – это смесь различных горючих и негорючих газообразных химических соединений, добываемых из недр земли. Наиболее распространенным соединением является метан CH_4 с $Q_H^p = 31620 \text{ кДж/м}^3$. В газах, залегающих над нефтью, содержатся пары наиболее летучих частей бензина – жирные углеводороды: пропан, бутан и пр. с $Q_H^p > 83800 \text{ кДж/м}^3$. Природный газ с содержанием более 50 г/м^3 жирных углеводородов C_nH_{2n+1} называется «жирным». Его теплота сгорания $Q_H^p = 33500\text{--}46100 \text{ кДж/м}^3$.

Газы, содержащие мало жирных углеводородов, называются «сухими» или «тощими». Содержание азота и углекислоты в природном газе понижает его теплотворность. Содержание сероводорода H_2S нежелательно, т.к. при нагреве сера взаимодействует с металлом. Обычно в природном газе $H_2S = 0,3\text{--}1,0\%$. Природный газ каждого месторождения, а иногда даже и отдельных скважин, имеет свой типичный состав и свойства.

Природное газообразное топливо получило широкое распространение. По сравнению с твердым и даже жидким топливом газообразное топливо имеет ряд преимуществ, среди которых следует отметить:

- 1) возможность хорошего перемешивания с воздухом, что обеспечивает полное горение и меньшие потери теплоты с отходящими газами;
- 2) возможность достижения высоких температур, особенно при предварительном подогреве распыливающего воздуха, а иногда и газа;
- 3) простота сжигания и легкость регулирования температуры, длины факела и атмосферы печи;
- 4) легкость транспортировки.

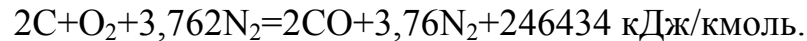
Помимо природного газа в малых кузнечных цехах как местное топливо используются искусственные газы: генераторный, доменный, коксовальный и др.

7.4 Искусственные горючие газы

К таковым относятся генераторные и светильные газы, газы подземной газификации твердого топлива, а также побочные продукты металлургического производства – доменный и коксовальный газы.

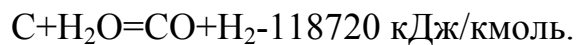
Генераторные газы получают при неполном сжигании топлива в специальных устройствах, называемых газогенераторами. Основным компонентом генераторных газов является окись углерода CO. В зависимости от применяемого дутья различают следующие разновидности генераторных газов: воздушный, водяной, паровоздушный и парокислородный газ.

Воздушный газ получается при подаче в газогенератор воздушного дутья:



Состав газа: CO=34,7% и N₂=65,3%; теплота сжигания Q_H^C = 4425 кДж/м³. Ввиду низкой теплотворности воздушный газ как топливо почти не применяется.

Водяной газ получается при взаимодействии топлива с водяным паром:



Состав газа: CO=37÷38%; H₂=48÷50%; CO₂=6–6,5%; CH₄=0,5%; H₂S=0,3–0,5%; N₂=5,5–6,5%; теплота сжигания Q_H^P = 10300 кДж/м³.

Водяной газ обладает очень низкой светимостью и для его приготовления требуется высококачественное сырье (кокс или антрацит). КПД газогенератора низкий. Стоимость газа высокая. Все это ограничивает применение водяного газа как топлива.

Наиболее дешевым и распространенным искусственным генераторным газом, применяемым для сжигания в промышленных печах, является паровоздушный генераторный газ. Процесс получения паровоздушного газа проще. Поэтому этот газ может быть получен из разнообразных видов твердых топлив. Состав паровоздушного газа, полученного из машиноформовочного торфа: CO=28%; H₂=15%; CH₄=3%; CO₂=8%; N₂=45,3%; теплота сжигания Q_H^P = 6480 кДж/м³.

Применение дутья, обогащенного кислородом, повышает производительность газогенератора, снижает содержание азота и увеличивая его теплоту сжигания. Состав и теплотасжигания парокислородного газа различны, в зависимости от конденсации кислорода в дутье. Так, при содержании кислорода в дутье 70,6% состав газа будет: CO=35,2%; H₂=37,5%; CH₄=0,5%; CO₂=17,4%; N₂=9,4%; теплота сжигания Q_H^P = 8725 кДж/м³.

Доменный газ является побочным продуктом при выплавке чугуна в доменных печах. Его теплота сжигания $Q_H^p = 3350\text{--}4000$ кДж/м³. Применяется в основном для нужд металлургических заводов.

Коксовальный газ выделяется в печах коксохимических заводов при переработке каменного угля на кокс. Его теплота сжигания $Q_H^p = 16800$ кДж/м³.

Светильный газ получается в результате сухой перегонки каменного угля с высоким содержанием смолы и летучих веществ в специальных печах, обогреваемых снаружи, где уголь подвергается нагреву до 800–1000°С. Состав: CO=8%; H₂=51%; CH₄=28%; CO₂=6%; N₂=3%; теплота сжигания $Q_H^p = 16800\text{--}20900$ кДж/м³.

Высококалорийные газы (природный, коксовальный и светильный) являются лучшими видами топлива для всех печей машиностроительного заводов. Антрацитный генераторный газ можно рекомендовать для кузнечных печей при условии подогрева воздуха и газа.

7.5 Сжигание топлива

7.5.1 Сущность процесса горения

Горение топлива есть химическое превращение (реакция) при котором горючие элементы и газообразные химические соединения топлива, соединяясь с кислородом воздуха (окисляясь), переходят в газообразные продукты горения (CO₂, (H₂O)_{пар}, SO₂).

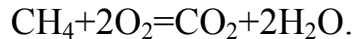
Температура подогрева реагирующих веществ (топливо и воздух), при которой горение будет происходить самостоятельно, без добавочного подвода теплоты в очаг горения, называется температурой воспламенения топлива. Последняя зависит от теплопроводности и теплоемкости топлива; содержания горючих веществ, их состава и легкости выделения из топлива; избытка воздуха в очаге горения и др.

В результате горения рабочее пространство заполняется раскаленными продуктами горения, в которых концентрируется теплота, и они являются передатчиками теплоты стенками печи и нагреваемому металлу. Продукты горения могут быть прозрачными либо в виде светящегося пламени. Светимость пламени обуславливается составом топлива и качеством смешения его с воздухом. Наибольшая светимость будет у того топлива, которое богато углеводородами.

Если процесс смешения горючих летучих веществ с воздухом протекает несовершенно, то горение их будет происходить замедленно – не одновременно во всем объеме, а лишь в тех местах, где летучие перемешиваются с воздухом. Там же, где нет воздуха, горения не будет. Здесь по мере прогревания летучих протекает распад углеводородов по

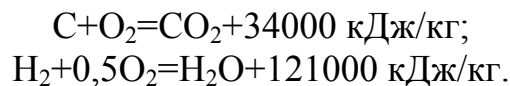
реакции $\text{CH}_4 = \text{C} + 2\text{H}_2$. Углерод при этом выделяется в виде мельчайших частичек сажистого углерода, которые вместе с различной мелкой пылью, будучи раскаленными до высокой температуры теплотой соседних участков, создают яркую светимость пламени в рабочем пространстве.

Прозрачное пламя наблюдается при горении главным образом газообразного топлива, предварительно смешанного с воздухом. Горение такой смеси протекает быстро, почти одновременно во всем объеме горючей смеси. Углеводороды топлива сгорают, не успевая распасться на водород и сажистый углерод:

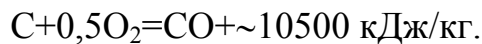


Горение протекает нормально только при достаточном количестве поступающего воздуха и надлежащей температуре в очаге горения.

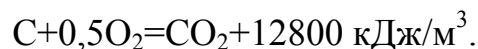
При достаточном подводе воздуха, например, углерод и водород успевают соединиться с кислородом полностью:



Горение, при котором горючие вещества целиком переходят в продукты горения, называются полным. Оно сопровождается наибольшим выделением теплоты. В случае, если подводится недостаточное количество воздуха, то при горении, например углерода, выделяется окись углерода, т.е. новое горючее вещество:



Такое горение называется неполным. Количество теплоты выделяется меньше, а окись углерода вместе с продуктами горения уходит из рабочего пространства. При дополнительном подводе кислорода в очаг горения окись углерода, соединяясь еще с половиной молекулы кислорода, переходит в углекислый газ:



Если в продуктах горения содержится 1% CO, то потери теплоты составляют 35%. Внешним признаком неполноты горения является наличие коптящего пламени. При большом избытке воздуха получается острое пламя в виде факела из светящихся языков. Такое пламя нагревает металл быстро, но является опасным, т.к. способствует образованию трещин в металле и увеличению угара. При уменьшении потока воздуха в топку печи факел начинает расплываться и, наконец, равномерно заполняет весь объем рабочей камеры печи белым с фиолетовыми полосками непрозрачным или полупрозрачным пламенем. Такое горение соответствует хорошо работающей кузнечной печи. Оно дает небольшой угар и равномерно нагревает металл.

7.5.2 Расчет потребного количество воздуха, состава и количества продуктов горения

В расчетах, относящихся к горению, делаются следующие допущения:

1) в составе сухого атмосферного воздуха содержится по объему 21,0% O_2 и 79,0% N_2 , или на одну объемную единицу поступающего для горения кислорода вводится $\frac{79}{21} = 3,762$ объемных единиц азота;

2) к числу горючих веществ относятся химические соединения, при полном горении которых образуются CO , $(H_2O)_{\text{пар}}$, SO_2 ; на практике возможно и неполное горение с образованием некоторого количества CO , H_2 и пр., однако их количество невелико;

3) молекулярные веса технических газов принимаются приближенными, с округлением до единицы, т.е. $H_2 - 2,0$; $N_2 - 28,0$ и т.д.;

4) для всех топочных и горючих газов принимается одинаковый объем 1 кмоль, равный $22,4 \text{ м}^3$;

5) объем воздуха и продуктов горения отнесен к нормальным условиям (0°C и давление 101 кПа).

Для определения количества необходимого для горения воздуха и объема образующихся продуктов горения на практике чаще пользуются молярным расчетом. Расчет ведется на 100 кг (м^3) рабочего топлива.

Рабочий состав топлива, согласно таблице (9),

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100\% \quad (7.1)$$

Расчет удобнее вести, составляя таблицу 10:

1) пересчитывают заданный состав топлива в рабочее;

2) определяют содержание молей в 100 кг топлива; так как газообразное топливо выражается в объемных процентах, это приближенно принимают за молярный состав;

3) записывают реакцию горения и компоненты топлива, переходящие в продукты горения (N_2 , W и пр.);

4) суммируя по каждому компоненту, получают количество требуемого кислорода и образующихся продуктов горения;

5) вычитая из требуемого количества кислорода имеющегося в топливе, получают количество кислорода, которое надо ввести с воздухом;

6) так как с воздухом, помимо кислорода, вводится влага и азот, которые увеличивают количество продуктов горения, это количество прибавляется к полученному в пункте 4 количеству продуктов горения; таким образом, получено: количество молей K_1 необходимого для горения кислорода; количество молей K_2 влажных продуктов горения; количество молей K_3 влаги;

7) проводят пересчет молярного состава в массовый (или объемный для газа).

По расчету получено столько воздуха, сколько необходимо для полного горения при отсутствии свободного кислорода. Такое количество воздуха называется теоретически необходимым, а количество продуктов горения теоретическим выходом продуктов горения.

Теоретический расход сухого воздуха

$$L_0^c = \frac{22,4(K_1 + 3,762K_1)}{100} = 1,07K_1 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (7.2)$$

Теоретический расход влажного воздуха

$$L_0^b = (1 + 0,00124W)L_0^c \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (7.3)$$

где W – содержание влаги в воздухе, определяемое экспериментально.

Теоретический выход сухих продуктов горения:

$$V_0 = \frac{22,4(K_2 - K_3)}{1000} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (7.4)$$

Теоретический выход влажных продуктов горения

$$V_0^b = \frac{22,4K_2}{100} \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (7.5)$$

В формулах (7.2)...(7.5) K_1 , K_2 , K_3 числовые значения компонентов, полученных расчетом в соответствующих графах таблицы 9.

Определение расхода воздуха, выхода и состава продуктов горения для газообразного топлива выражается в объемных процентах, что приблизительно принимается за молярный состав газов; поэтому данные состава без дополнительных пересчетов вводятся в расчетную таблицу в графу «содержится в 100 м³ рабочего топлива молей». Если поступающий для горения воздух обогащен кислородом, то коэффициент $N_2/O_2=3,762$ должен быть заменен на соответствующее отношение содержания азота и кислорода в сухом обогащенном воздухе.

На практике количество поступающего для горения воздуха отличается от теоретического. Вводится некоторый избыток воздуха, который необходим для лучшего перемешивания кислорода с топливом. Чем лучше смешение топлива с воздухом, тем полнее и быстрее протекает процесс горения, тем больше выделяется теплоты и тем выше будет температура в печи. Отношение количества практически вводимого воздуха к теоретически необходимому, называется коэффициентом избытка воздуха

$$\alpha = L_{\Pi} / L_0, \quad (7.6)$$

где L_{Π} – количество воздуха, практически вводимого в печь.

Таблица 10. Схема аналитического расчета полного горения твердого и жидкого топлива

№п/п	Составные части топлива	Содержится в 100 кг рабочего топлива, молей	Реакция горения	Требуется кислорода, молей		Образуется продуктов горения, молей					
				На один моль данного	На все количество горючего, находящегося в топливе, молей	O ₂	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	Всего
1	C ^P	$\frac{C^P}{12}$	C+O ₂ =CO ₂	1	$\frac{C^P}{12}$	-	$\frac{C^P}{12}$	-	-	-	$\frac{C^P}{12}$
2	H ^P	$\frac{H^P}{2}$	H+0,5O ₂ =H ₂ O	0,5	$\frac{H^P}{4}$	-	-	$\frac{H^P}{2}$	-	-	$\frac{H^P}{2}$
3	S ^P	$\frac{S^P}{32}$	S+O ₂ =SO ₂	1	$\frac{S^P}{32}$	-	-	-	$\frac{S^P}{32}$	-	$\frac{S^P}{32}$
4	N ^P	$\frac{N^P}{28}$	N _{топ} →N _{дым}	-	-	-	-	-	-	$\frac{N^P}{28}$	$\frac{S^P}{32}$
5	W ^P	$\frac{W^P}{18}$	W _{топ} →W _{дым}	-	-	-	-	$\frac{W^P}{18}$	-	-	$\frac{W^P}{18}$
			<u>Всего</u>	-	$\frac{C^P}{12} + \frac{H^P}{4} + \frac{S^P}{32} = \Sigma_1$	-	$\frac{C^P}{12}$	$\frac{H^P}{2} + \frac{W^P}{18} = \Sigma_2$	$\frac{S^P}{32}$	$\frac{N^P}{28}$	$\Sigma_3 = \text{кол.} 1+2+3+4+5$
6	O ^P	$\frac{O^P}{32}$	Имеется в топливе		$\frac{O^P}{32}$	-	-	-	-	-	-
			Вводится из воздуха		$\frac{C^P}{12} + \frac{H^P}{4} + \frac{S^P}{32} - \frac{O^P}{32} = K_1$ $\Sigma_1 - \frac{O^P}{32} = \frac{O_{\text{возд}}}{32}$	-	-	$100 \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}^B}{22,4} *$	-	$3,762 O_{\text{возд}}$	$\Sigma_4 = 100 \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}^B}{22,4} * + 3,76$ $2 O_{\text{возд}}$
7			Итого				$\frac{C^P}{12}$	$\Sigma_2 + 100 \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}^B}{22,4}$	$\frac{S^P}{32}$	$\frac{N^P}{28} + 3,762 \frac{O_{\text{возд}}}{32} =$ $= \Sigma_6$	$\Sigma_7 = \Sigma_3 + \Sigma_4$

* V_{H₂O}^B - количество водяных паров, поступающих с воздухом на 1 кг топлива, м³

Таким образом, $L_{\text{п}} = \alpha L_0$.

Вводимый избыточный воздух увеличивает объем продуктов горения за счет появления в них свободного кислорода и дополнительного количества азота. Практический объем продуктов горения

$$V_{\text{п}} = V_0(\alpha - 1)L_0. \quad (7.7)$$

Однако увеличение расхода воздуха и образование большого количества продуктов горения приводит к увеличению потерь теплоты с отходящими газами; к уменьшению температуры горения; к увеличению окисления металла; к увеличению потребных мощностей и размеров вентиляторов, воздухонагревателей, трубопроводов; к уменьшению коэффициента использования топлива. Наивыгоднейшим коэффициентом избытка воздуха является такой, при котором потери теплоты от неполноты горения и потери теплоты с отходящими газами при одних и тех же температурах печи будут наименьшими.

Действительное значение коэффициента избытка воздуха определяют по анализу продуктов горения. Для практических расчетов можно принять $\alpha = 1,05 - 1,1$.

7.5.3 Устройство для сжигания топлива

Газ сжигается в рабочем пространстве посредством горелок. Основные стадии сжигания: 1) смешивание с воздухом; 2) подогрев смеси до температуры воспламенения; 3) собственно горение.

Скорость горения зависит от протекания первых двух стадий и от предварительного подогрева воздуха и газовой смеси. Предварительный подогрев газа нецелесообразен вследствие расщепления углеводородов с образованием сажи, что создает опасность быстрого загрязнения рекуператора.

Наиболее распространенным методом сжигания является диффузионный метод. Газ поступает в окружающее воздушное пространство. На границе соприкосновения газа с воздухом происходит взаимное проникновение молекул и перемешивание газа с воздухом. Если в горелку поступает воздух, интенсивность подачи которого можно регулировать, то можно получить как диффузионное горение с длинным пламенем, так и с очень коротким пламенем.

Горение протекает не одновременно во всем объеме, а лишь в местах соприкосновения газового и воздушного потока. Часть газового потока прогревается без доступа воздуха, что приводит к распаду углеводородов с образованием мельчайших частиц сажистого углерода, что придает светимость пламени (пламенное горение).

Другим методом является метод с предварительным смешением газа и воздуха. В рабочее пространство поступает готовая газозвушная смесь от смесителя. Горение протекает одновременно во всем объеме смеси,

практически мгновенно, заканчиваясь у устья горелки. В этом случае углеводороды не успевают распадаться с выделением сажистого углерода и пространство печи заполняется раскаленными прозрачными продуктами горения (беспламенное горение). Сжигание газа достигается в двухпроводных дутьевых горелках полного внутреннего или предварительного смешивания и в инжекционных горелках.

Работа инжекционных горелок основана на том, что выходящее из сопла с большой скоростью струя газа засасывает из окружающей атмосферы воздух и смешивается с ним в смесителе.

Классификация горелок.

По давлению газа: 1) низкого давления (до 500 Па) (давление воздуха 1500 – 2000 Па); 2) среднего давления (0,01–0,3 МПа); 3) высокого давления (>0,3 МПа).

По месту смешивания топлива и воздуха: 1) с полным предварительным (беспламенные); 2) с частичным предварительным; 3) с внешним (пламенные, диффузионные).

По количеству ступеней смешивания: 1) одноступенчатые; 2) двухступенчатые.

В зависимости от наличия резервного топлива: 1) только для использования газа; 2) газо-мазутные.

В зависимости от характера движения продуктов горения и передачи теплоты: 1) консервативно-рециркуляционные; 2) плоскопламенные-радиационные.

Большое распространение получили инжекционные горелки высокого давления с полным предварительным смешением (рисунке 36).

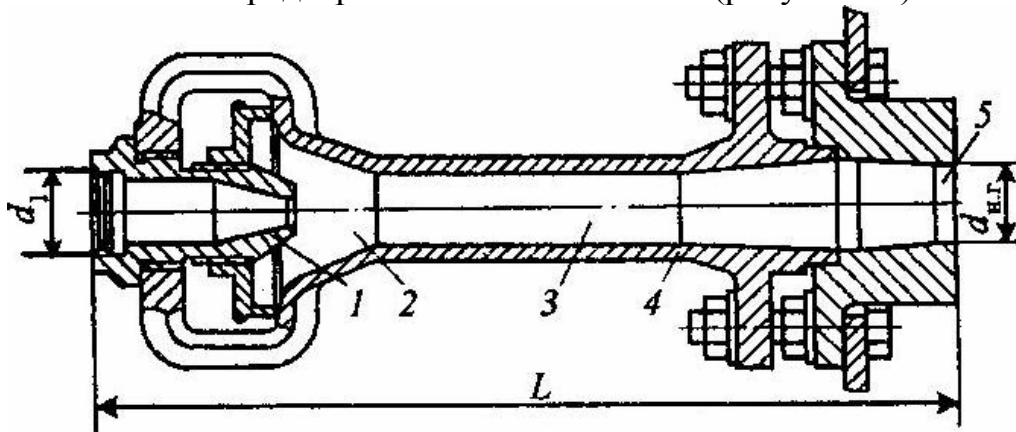


Рисунок 36. Инжекционная горелка: 1 – газовое сопло; 2 – конфузор; 3 – смеситель; 4 – диффузор; 5 – носик горелки

Хорошее смешение газа с воздухом позволяет таким горелкам работать с коэффициентом расхода воздуха $\alpha=1,0-1,05$ и давать беспламенное горение с высокой температурой горения.

Смесители могут быть индивидуальными (для одной горелки) и групповые (обеспечивать группу горелок).

На рисунке 37 приведена конструкция плоскопламенной горелки ППГ. Воздух от вентилятора тангенциально поступает в корпус 1 к шнекообразному направляющему винту 3. Из сопла 4 через систему радиальных отверстий в сильно закрученный поток подаются струи горючего газа, которые воспламеняются в непосредственной близости от торца сопла. Горячие вращающиеся струи по мере продвижения по тоннелю обтекают горелочный блок, свод и стены. Кладка свода раскаляется и становится мощным источником теплового излучения в направлении нагреваемого металла. Горелки ППГ могут работать как на холодном, так и подогретом до 500°C воздухе. Устанавливаются они в своде печи.

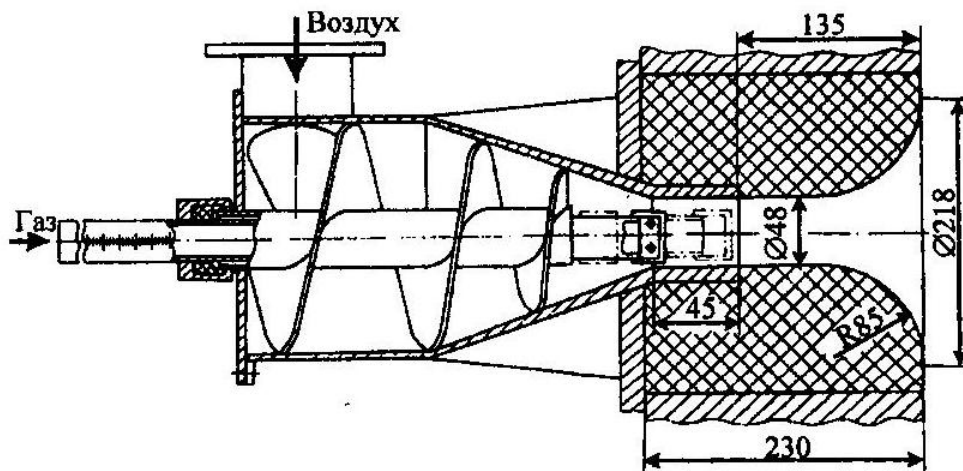


Рисунок 37. Плоскопламенная горелка

В горелках с излучающей чашей типа ГВИЧ (рисунок 38) плоский факел создается, благодаря закручиванию газа и воздуха, проходящих в смеситель через тангенциальные отверстия. Сгорание происходит внутри горелочного блока, являющегося источником интенсивного излучения.

7.6 Температура горения

Температура горения любого топлива непостоянна. Она изменяется в зависимости от условий горения: количества воздуха, температуры предварительного подогрева топлива и воздуха, качества подготовки топлива для горения.

Различают калориметрическую, теоретическую и действительную температуру горения топлива.

Калориметрической называется такая температура, до которой нагрелись бы продукты полного горения, если бы вся теплота горения топлива пошла только на нагревание продуктов горения:

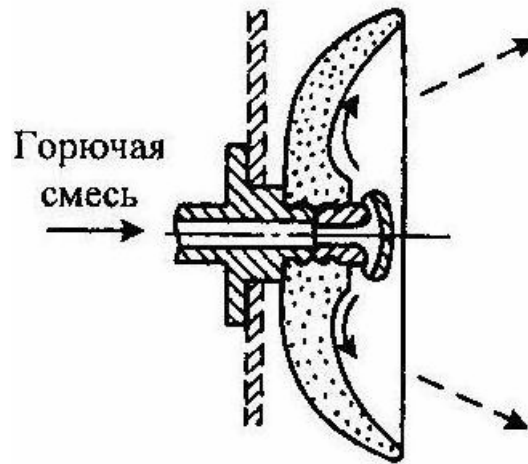


Рисунок 38. Горелка с излучающей чашей

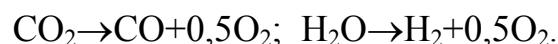
$$t_k = \frac{Q_H^p + q_T^\phi + q_B^\phi}{C_\Pi V_\Pi^B}, \quad (7.8)$$

где Q_H^p – теплота сгорания топлива, кДж/кг (m^3); V_Π^B – количество влажных продуктов горения, кг (m^3); C_Π – средняя теплоемкость продуктов горения в интервале температур от 0° до $t^\circ C$, кДж/кг; $q_B^\phi = C_B t_B L_\Pi$ – физическая теплота воздуха; L_Π – количество воздуха, поступающего для горения; C_B – средняя теплоемкость воздуха; t_B – температура подогрева воздуха; $q_T^\phi = C_T t_T$ – физическая теплота топлива; C_T – средняя теплоемкость топлива; t_T – температура подогрева топлива, $^\circ C$.

Выражение $C_\Pi V_\Pi^B$ можно представить как

$$C_\Pi V_\Pi^B = C_{CO_2} V_{CO_2}^B + C_{H_2O} V_{H_2O}^B + C_{N_2} V_{N_2}^B + \dots$$

В состав продуктов горения топлива входят CO_2 и H_2O (водяные пары). При высокой температуре реакции образования CO_2 и H_2O обратимы, т.е. имеет место явление диссоциации по реакциям



Это явление сопровождается поглощением теплоты, а следовательно, понижением температуры горения. Температура при горении топлива с учетом потерь теплоты на диссоциацию называется теоретической температурой. Потеря на диссоциацию при горении с температурой до $1500^\circ C$ невелика и в расчетах не учитывается.

Температура в рабочем пространстве печи (измеряемая пирометром), соответствующая горению в реальных условиях с учетом потерь, называется действительной температурой

$$t_{\text{п}} = \eta t_{\text{к}} \quad (7.9)$$

где η – пирометрический коэффициент.

Значение η для различных печей приводится в справочной литературе.

Из формулы 7.9 следует, что потребная калориметрическая температура

$$t_{\text{к}}^{\text{п}} = \frac{t_{\text{п}}}{\eta}. \quad (7.10)$$

При выборе топлива необходимо, чтобы $t_{\text{к}} \geq t_{\text{к}}^{\text{п}}$. В противном случае следует увеличить подогрев воздуха (и топлива), либо перейти на другой вид топлива.

8 Движение газов в печах

8.1 Характер движения газов

Дымовые газы (CO_2 ; N_2 ; H_2O ; SO_2 и др.), образующиеся при сжигании топлива, поступая в рабочее пространство печи, отдают часть теплоты нагреваемому металлу и окружающим стенкам, а затем удаляются в атмосферу.

От характера движения газов в печах зависят условия теплообмена в рабочем пространстве, распределение температуры, распределение давлений, сопротивление движению газов и пр.

При рассмотрении характера движения газов в печах принимаются следующие допущения.

1. Так как давление в печи мало отличается от атмосферного (на $0,02 \div 0,1\%$), изменение объема газов под влиянием такого изменения давления ничтожно мало и им можно пренебречь.

2. Изменение температуры по длине газоходов хотя и значительное, но оно идет постепенно. Вызванное им изменение объема газов на сравнительно небольших участках можно считать незначительным и им можно пренебречь.

Газы, как и жидкости, обладают свойством сопротивляться относительному сдвигу, т.е. обладают вязкостью вследствие наличия внутреннего трения. При движении одного слоя газа относительно другого, под влиянием теплового движения, молекулы будут проникать из одного слоя в другой, затрудняя взаимное перемещение слоев. С повышением температуры вязкость газов увеличивается, т.к. увеличивается скорость движения молекул и тем усиливаются тормозящие действия молекул, переходящих из слоя в слой.

Движение газов имеет различный характер и зависит от природы газов, размеров газоходов и скорости движения. При малых скоростях поток газа

имеет струйное движение. При этом отдельные струйки движутся вдоль канала прямолинейно и параллельно друг другу. Такое движение газа носит название слоистого, или ламинарного, движения. Кроме того, вследствие теплового движения частицы газа диффундируют между отдельными струйками. В печной практике ламинарное движение почти не встречается.

При скоростях, которые имеют место в печах, в центральной части потока движение из струйного переходит в беспорядочное, характеризующееся наличием микроскопических вихрей. Благодаря этому, обмен между отдельными частями потока происходит более энергично. Чем ближе к стенкам канала, тем больше слабеет вихреобразование, а у самых стенок движение остается упорядоченным. Такое движение газов называется турбулентным, или вихреобразным.

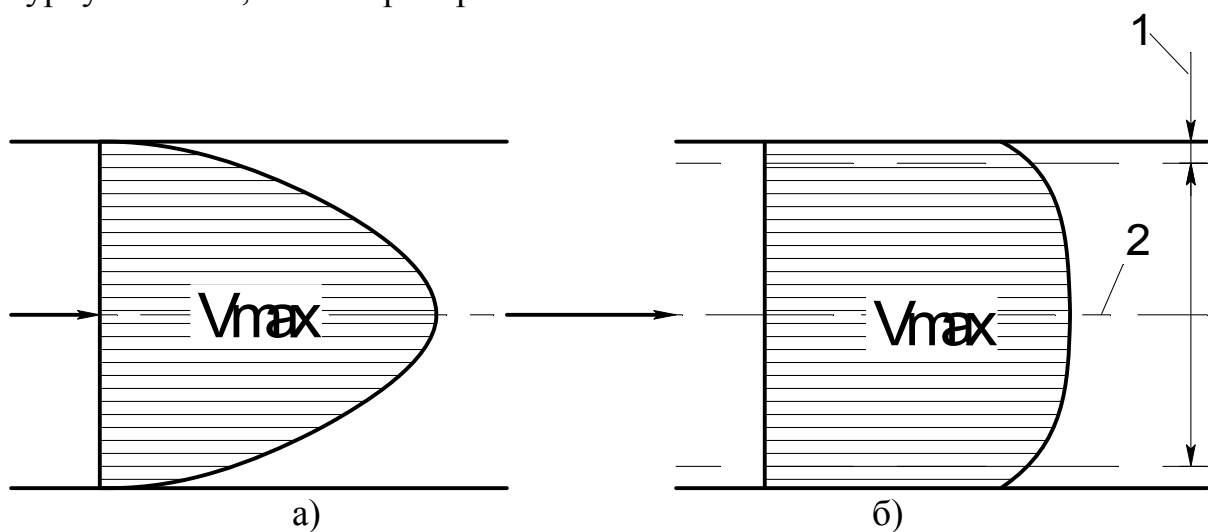


Рисунок 39. Распределение скоростей при ламинарном (а) и турбулентном (б) характере движения газа

Оставшийся у самой стенки ламинарный слой малоподвижен, а у самой поверхности почти совсем неподвижен. Этот слой тормозит движение газа. Чем более шероховата поверхность, тем более сильное тормозящее значение имеет этот слой. Кроме того, этот слой ухудшает теплообмен.

8.1.2 Движение газа в рабочем пространстве печи. Свободное и вынужденное движение газов

По природе возникновения различают два рода движения: свободное и вынужденное. Свободным называется такое движение, которое возникает вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц газов, т.е. за счет действия подъемной силы в открытом пространстве внутри объема газовой среды. Естественное движение возбуждается в самой среде газов без какого бы то ни было возбудителя извне вследствие наличия

геометрического напора, образуемого столбами газов различной температуры (например, циркуляция воздуха в закрытом помещении).

Вынужденным называется движение газов по закрытым каналам и трубопроводам под действием внешних сил. В печной практике наиболее распространенным является вынужденное движение, создаваемое струями, выходящими из форсунок и горелок.

Струя газа, выходящая в свободное пространство, заполненное тем же газом, называется свободной струей. Скорость струи, выходящей из какой-либо насадки, вследствие трения между струей и окружающей средой уменьшается по мере удаления от насадки, а диаметр увеличивается пропорционально расстоянию от насадки (рисунок 40.). В области соприкосновения струи и неподвижной среды возникают вихри, которые проникают внутрь струи и в окружающую среду, вызывая перемешивание масс газа в поперечном направлении. Частицы струи, попадая в окружающую неподвижную среду, приводят ее частицы в движение, увлекая их за собой; частицы среды, переносимые внутрь среды, замедляют ее движение. Таким образом, количество движущейся массы газа возрастает по мере удаления от места истечения, а скорость падает.

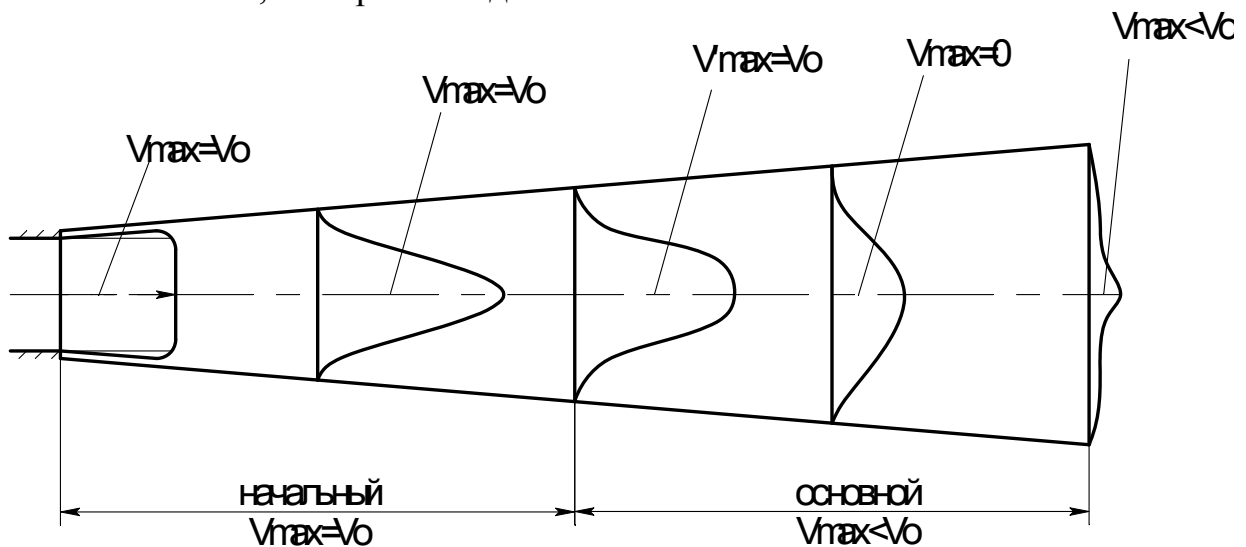


Рисунок 40. Изменение скорости и диаметра струи.

Если поперечное сечение струи невелико по сравнению с размерами рабочего пространства печи, то на большой длине она будет вести себя так же, как если бы она выходила в свободное пространство.

Однако ввиду того, что в печи к струе нет свободного доступа газа из окружающей ее атмосферы, который мог бы подсасываться струей, атмосфера не остается неподвижной.

Внешние слои струи, имеющие малые скорости, будут отклоняться и возвращаться к месту пониженных давлений. Таким образом, атмосфера печи будет находиться в состоянии циркуляции. Скорость циркуляции атмосферы

зависит от скорости струи, от соотношения размеров камеры и струи, а также от направления струи в камере.

В отдельных местах циркуляция может быть очень слабой, и даже образуются малоподвижные и застойные зоны. Во многих случаях такие зоны нежелательны. Чем больше скорость входящей в пространство струи, тем более энергична циркуляция газов около нее. Однако повышение скорости струи вызывает большую разность давлений по длине рабочей камеры. Изменение направления движения струи вызывает также изменение давления по длине камеры.

На характер движения газов в печи влияет избыток давления ΔP , вызванный разностью плотностей газа и воздуха. Избыток давлений $\Delta P = P_{\Gamma} - P_{\text{в}} = H(\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\Gamma})$ можно определить по закону равновесия газов

$$P = P_0 - \gamma H, \quad (7.11)$$

где P_0 и P – давления газов на уровнях Z_0 и Z ;
 $H = Z - Z_0$;

γ – плотность газов.

8.2 Приложение закона Бернулли к решению задач, относящихся к работе печей

Определить скорость v_2 истечения и расход газа V при выходе его из небольшого по сравнению с размерами печи отверстия, расположенного на высоте H (рисунок 41) от уровня пода.

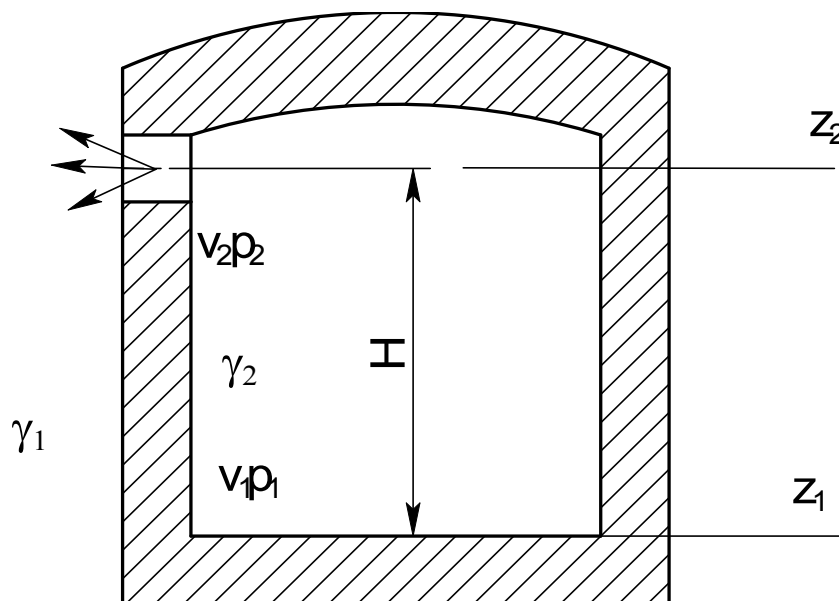


Рисунок 41.

Примем, что избыточное давление на этом уровне создается только напором столба горячих газов. Составим уравнение Бернулли для уровней Z_1 и Z_2 , приняв $Z_1=0$:

$$P_1 + \frac{v_1^2}{2g} \gamma_\Gamma = H\gamma_\Gamma + P_2 + \frac{v_2^2}{2g} \gamma_\Gamma + h_{\text{пот}} \quad (7.12)$$

Т.к. $v_2 \gg v_1$, то можно принять $v_1 \approx 0$. Сопротивление газам будет сосредоточено главным образом в отверстии стенки. Потерями на трение можно пренебречь, т.е. $h_{\text{тр}}=0$. Тогда

$$h_{\text{пот}} = \xi \frac{v_2^2}{2g} \gamma_\Gamma.$$

Подставляя $h_{\text{пот}}$ в уравнение (7.12), получим

$$P_1 = P_2 + \frac{v_2^2}{2g} \gamma_\Gamma + \xi \frac{v_2^2}{2g} \gamma_\Gamma + H\gamma_\Gamma, \quad (7.13)$$

откуда

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}} \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2 - H\gamma_\Gamma)}{\gamma_\Gamma}}. \quad (7.14)$$

На основании закона равновесия

$$P_2 = P_1 - H\gamma_\Gamma.$$

Подставляя значение P_2 в (7.14) получим

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}} \sqrt{\frac{2g(\gamma_\Gamma - \gamma_\Gamma)H}{\gamma_\Gamma}}. \quad (7.15)$$

Обозначив $\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}}$ – коэффициент скорости, а избыток давлений

$$\Delta P = P_\Gamma - P_\Gamma = H(\gamma_\Gamma - \gamma_\Gamma)$$

и подставляя в (7.15), получим

$$v_2 = \varphi \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma_\Gamma}}. \quad (7.16)$$

Если давлениями, вызываемыми движущимися в печи потоками газов пренебречь нельзя, то

$$\Delta P = H(\gamma_\Gamma - \gamma_\Gamma) + P_{\text{дин}}, \quad (7.17)$$

где $P_{\text{дин}}$ – динамическое давление, определяемое экспериментально на моделях.

Расход газа:

$$V = \varphi f_{\text{стр}} \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma_{\Gamma}}}, \quad (7.18)$$

где $f_{\text{стр}}$ – сечение струи при выходе из отверстия.

При выходе из отверстия $f_{\text{стр}}$ не всегда равно сечению отверстия f_0 (рис. 48). При входе в отверстие струя сужается, а затем расширяется. Если $f_{\text{стр}}$ приобретает размер сечения f_0 за пределами стенки, то считается, что струя выходит из отверстия в тонкой стенке.

Отношение $\varepsilon = \frac{f_{\text{стр}}}{f_0}$ называется коэффициентом сужения струи. Для

тонкой стенки $\varepsilon=0,63$. Если $f_{\text{стр}}=f_0$ внутри отверстия, то стенка толстая и $\varepsilon=1$. Следовательно, $f_{\text{стр}} = \varepsilon f_0$. Подставляя в (7.18), получим

$$V = \varphi \varepsilon f_0 \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma_{\Gamma}}}.$$

Произведение $\varphi \varepsilon = \mu$ называется коэффициентом расхода. Окончательно

$$V = \mu f_0 \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\gamma_{\Gamma}}} \quad (7.19)$$

В расчетах принимается: для отверстий в тонкой стенке $\xi=0,01$; $\varphi=0,98$; $\varepsilon=0,63$; $\mu=0,62$; в толстой – $\xi=0,5$; $\varphi=0,85$; $\varepsilon=1$; $\mu=0,83$.

8.3 Понятие о рециркуляции газов

Если температура поступающих продуктов горения сильно отличается от температуры газов в рабочей камере печи, то по высоте печи или по ее длине могут создаваться большие разности температуры. Неравномерность температуры можно значительно снизить, если осуществить в печи рециркуляцию газов. Рециркуляция заключается в том, что к поступающим продуктам горения примешиваются отработанные в рабочей камере газы (рисунок 42). Чем больше к горючим газам подмешивается газов, отходящих из рабочей камеры, тем более равномерная температура получается в этой камере.

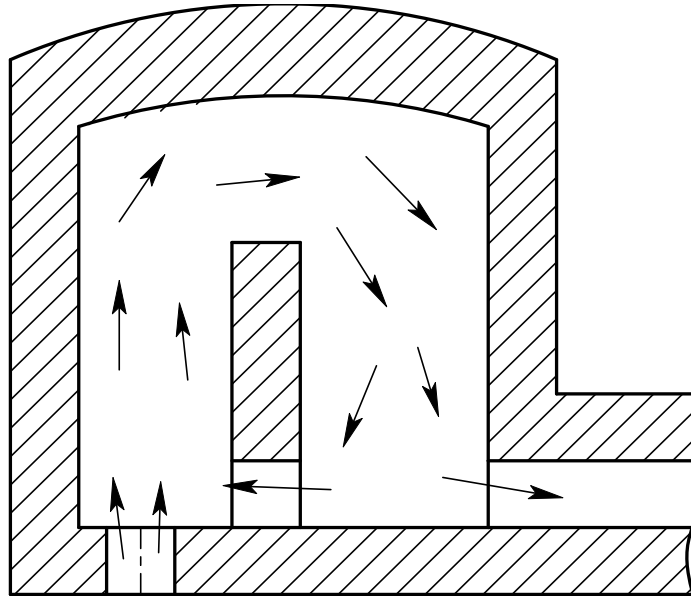


Рисунок 42. Рециркуляция газов.

Отношение количества циркулирующего в камере газа q_1+q_2 к количеству свежего газа q_1 называется кратностью циркуляции

$$\kappa = \frac{q_1 + q_2}{q_1}$$

В низкотемпературных печах рециркуляция может осуществляться или путем инжектирования отработанных газов струями свежих газов, или с помощью специальных вентиляторов, а в высокотемпературных печах – путем инжектирования газов струями, выходящими из форсунок или горелок.

8.4 Отвод дымовых газов

Удаление продуктов горения из печи осуществляется за счет естественной тяги дымовой трубы или искусственной тяги, создаваемой вентилятором или дымососом. При естественной тяге горячие отработанные продукты горения, будучи легче окружающего печь атмосферного воздуха, поднимаются по трубе вверх и уходят в атмосферу. Искусственная тяга устраивается в виде косвенной и прямой. При косвенной тяге через коническую насадку вдувается вентилятором воздух, который увлекает за собой дым. При прямой тяге дым из дымохода засасывается непосредственно дымососом (вентилятором) и выбрасывается в рядом стоящую невысокую трубу.

Прямая тяга осуществляется вытяжками: 1) с жаропрочными лопатками, применяемыми для удаления продуктов горения с $t=400\div 600$ °С; 2) с лопатками из конструкционной стали.

Над малыми печами, выбрасывающими продукты горения непосредственно в цех, устанавливаются специальные дымоулавливающие зонты, через которые посредством вентилятора и системы трубопроводов дым удаляется в атмосферу.

8.4.1 Рекуператоры и регенераторы

Можно вернуть часть теплоты, теряемой с отходящими газами, путем использования его для подогрева компонентов горения в рекуператорах и регенераторах.

В регенераторах через выложенную кирпичом камеру сверху вниз пропускают дым, а затем в обратном направлении пропускают воздух или газообразное топливо. В этот период регенеративная насадка отдает воздуху ранее аккумулированную теплоту. Применяются в основном в нагревательных колодцах и доменных печах.

В рекуператорах поток компонентов горения и продуктов горения непрерывен и теплоотдача происходит через разделяющую их стенку.

Рекуператоры бывают металлические и керамические. Металлические – компактны, газоплотны и могут располагаться в любом месте по отношению к печи. Из углеродистой стали – допускают нагрев воздуха до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, из чугуна – до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, из жаропрочной стали – до $700\div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Керамические – громоздки и менее газоплотны. Располагаются рядом с печью над подземным сборным дымоходом. Температура подогрева воздуха в них до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Движение газообразной среды в рекуператоре может быть прямоточное противоточное и перекрестное. По способу передачи теплоты рекуператоры подразделяются на радиационные (работающие при температуре дыма более $900\text{ }^{\circ}\text{C}$), конвективные (температура дыма менее $900\text{ }^{\circ}\text{C}$), комбинированные радиационно-конвективные. Конвективные металлические могут быть трубчатые и игольчатые. Часто применяют рекуператоры с прямыми трубами (рисунок 43). Предназначены для подогрева воздуха до $250\div 450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

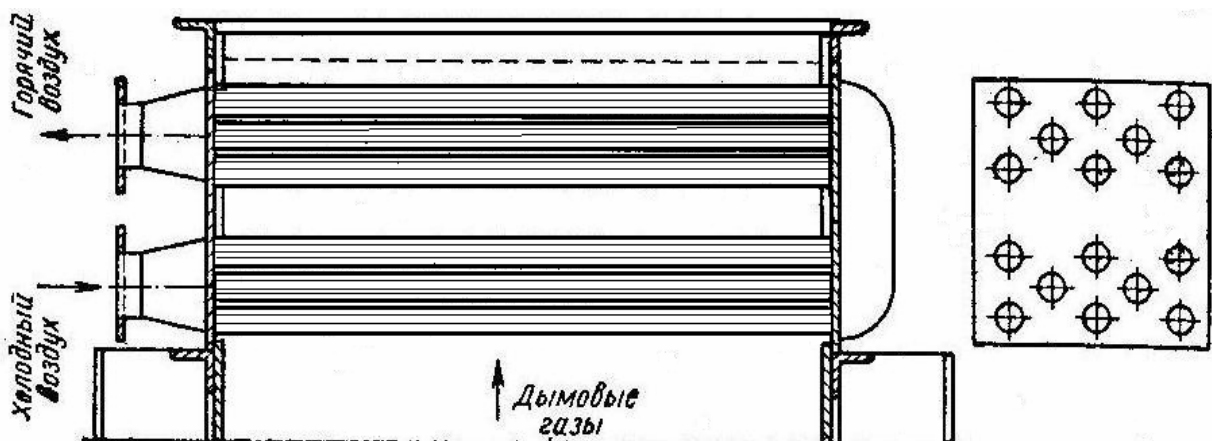


Рисунок 43. Конвективный трубчатый рекуператор

Радиационные (излучающие) работают при температуре более 900°C . Воздух в них движется с большой скоростью. Наиболее распространены цилиндрические радиационные рекуператоры.

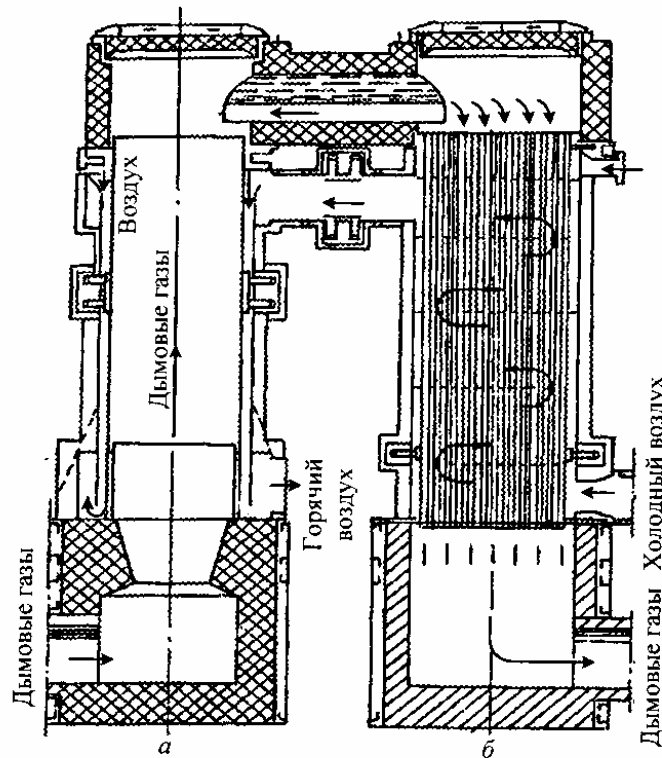


Рисунок 44. Комбинированный радиационно-конвективный рекуператор.

Для повышения эффективности часто устанавливают комбинированные конвективно-радиационные рекуператоры. Холодный воздух поступает в конвективный трубчатый рекуператор, а затем переходит для окончательного нагрева в радиационный (рисунок 44).

9 Классификация пламенных нагревательных устройств

Пламенные нагревательные устройства подразделяются на печи и ванны. В печах теплота воспринимается заготовками посредством излучения пламени, стен и свода, а также конвекцией движущихся газов. В ваннах – теплопроводностью от расплавленных сред (соль, стекло и пр.).

Печи подразделяются:

1) по назначению: для нагрева перед пластическим деформированием; перед разделкой проката на заготовки;

2) по режиму нагрева: камерные (садочные периодического нагрева), которые, в свою очередь, могут быть в зависимости от количества камер: однокамерными и двухкамерными; в зависимости от вида нагреваемых заготовок: с заслонкой, щелевые, очковые; в зависимости от конструкции

пода: со стационарным и выкатным подом; далее – методические и полуметодические печи, которые могут быть: с односторонней (верхней) и двухсторонней (верхней и нижней) подачей тепловой энергии; с торцевой и боковой выдачей заготовок; двух-, трех-, четырехзональные;

3) по характеру движения газов в рабочем пространстве;

4) по составу печной атмосферы: с обычной окислительной атмосферой и с безокислительной (малоокислительной) атмосферой;

5) по температуре рабочего пространства: низкотемпературные – до 600°C; среднетемпературные – до 1000°C; высокотемпературные – более 1000°C; скоростного нагрева – более 1500°C;

6) по видам и средствам механизации: толкательные, конвейерные, карусельные.

Главные параметры при подборе печей – заданная производительность и минимальный расход топлива; но существует и ряд других требований к печам: минимальное время разогрева; нагрев заготовок с минимальным окалинообразованием; равномерный нагрев металла; уменьшение занимаемой площади и стоимости; надежность и простота эксплуатации и ремонта.

Соблюдение всех требований сразу в пламенных печах невозможно, поэтому на машиностроительных заводах выбор способа нагрева определяется конкретными условиями производства и зависит от многих технологических и экономических факторов, таких как форма и размер заготовки, требования к поверхности металла перед последующей обработкой, число выпускаемых заготовок, время штамповки и другое.

При среднесерийном производстве основную массу заготовок составляют заготовки диаметром менее 100 мм с малым соотношением длины к диаметру (l/d). Для деформации применяются механические прессы и штамповочные молоты. Это оборудование предъявляет повышенные требования к чистоте поверхности обрабатываемой заготовки. А значит, из всей номенклатуры печей наиболее подходящими будут индукционные нагреватели, печи безокислительного нагрева и печи скоростного нагрева.

При нагреве широкой номенклатуры заготовок перед штамповкой на штамповочных молотах применяют печи с вращающимся подом, которые легко можно автоматизировать. Печи полуметодического действия рекомендуются для нагрева квадратных, полосовых и круглых заготовок диаметром свыше 100 мм с большим соотношением l/d .

Печи с шагающим подом или шагающими балками можно применять для нагрева заготовок с большим соотношением l/d . Преимущество этих печей перед полуметодическими – в возможности быстрого опорожнения рабочего пространства при длительных остановках, характерных в технологии кузнечно-штамповочного производства.

9.1 Конструкция камерной печи

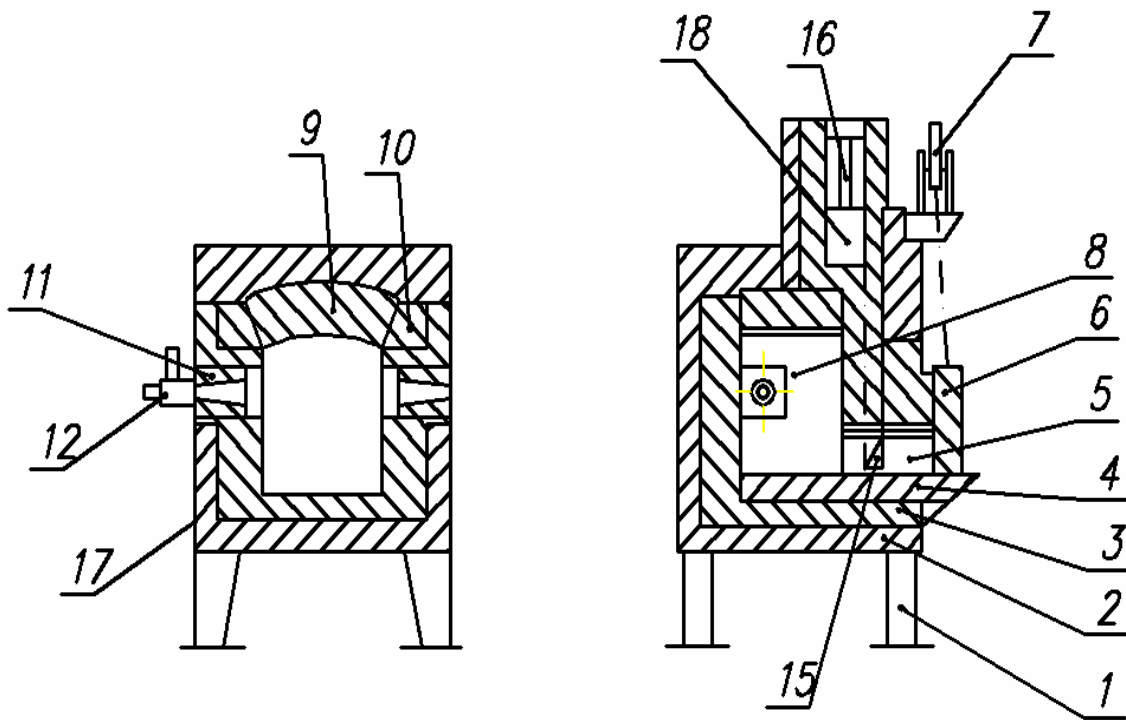


Рисунок 45. Конструкция камерной печи периодического действия: 1 – стойка каркаса; 2 – теплоизоляционный наружный слой; 3 – огнеупорный слой; 4 – под печи; 5 – загрузочно-разгрузочное отверстие; 6 – заслонка; 7 – механизм подъема заслонки; 8 – рабочее пространство печи; 9 – свод печи; 10 – пятовый кирпич, на который опирается свод и через который передается нагрузка на пятовую балку; 11 – мазутный блок; 12 – горелка (форсунка); 13 – подача газообразного или жидкого топлива; 14 – подача распыливающего воздуха; 15 – дымовые каналы; 16 – воздухонагреватель (регенератор); 17 – каркас и кожух; 18 – дымоход

Камерные печи имеют приблизительно одинаковую температуру во всех точках рабочего пространства. Работа печи – периодическая, а заготовки не передвигаются по поду (рисунок 45).

9.2 Конструкция методической печи

Характеристика печи: печь удлиненной формы; заготовки загружаются через одно окно и выгружаются через другое; температура рабочего пространства у рабочего окна понижена, а в зоне окончательного нагрева повышена; печь непрерывного действия (рисунок 53). Подача и выгрузка заготовок обычно автоматизирована.

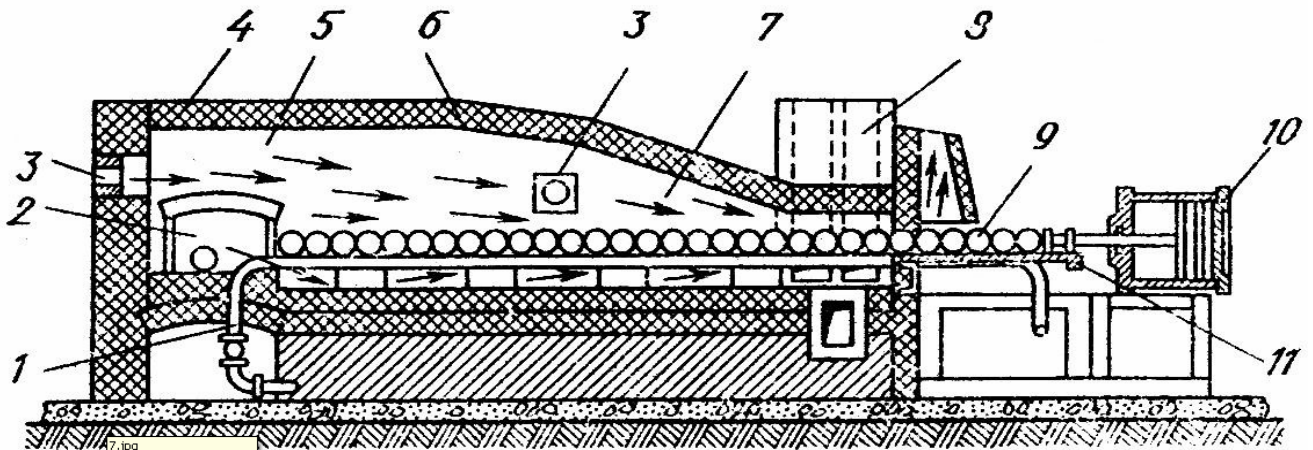


Рисунок 46. Конструкция методической печи непрерывного действия: 1 – система охлаждения, встроенная в направляющие заготовок; 2 – окно загрузки; 3 – горелочно-форсуночный блок, 4 – футеровка; 5 – методическая зона с пониженной температурой; 6 – внутренний огнеупорный слой кладки печи; 7 – зона окончательного нагрева; 8 – рекуператор; 9 – заготовки; 10 – ограничитель; 11 – под печи

9.3 Недостатки пламенного нагрева

Основными недостатками пламенного нагрева являются низкая скорость нагрева; окисление и обезуглероживание поверхности нагретой заготовки; повышенный износ штамповой оснастки; низкая точность получаемых поковок; возможность перегрева и пережога металла при нагреве.

Поэтому пламенный нагрев с успехом применяется для нагрева крупных заготовок.

10 Теплопередача в печах

10.1 Три способа передачи теплоты

В рабочей камере нагревательного устройства поток раскаленных газов отдает теплоту нагревательному металлу, а также стенкам, своду и частично поду (участкам, не занятым металлом).

Поток энергии от более нагретого тела к менее нагретому называется тепловым потоком (Q , кДж). Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности F и времени τ , называется удельным тепловым потоком (q , кДж/($m^2 \cdot ч$)). Совокупность значений температуры для всех точек рассматриваемого тела в данный момент времени называется температурным

полем. Если температурное поле не меняется со временем, то такое состояние называется стационарным, а если меняется, то нестационарным.

Теплообмен может осуществляться тремя способами: конвекцией, излучением и теплопроводностью.

Сущность передачи теплоты конвекцией между движущимися жидкостью или газом и твердым телом состоит в том, что к поверхности твердого тела непрерывно подходят частицы жидкости или газа, которые отдают или воспринимают теплоту, и отходят, уступая место другим частицам.

Лучистый теплообмен – это теплообмен между телами, осуществляющийся вследствие испускания и поглощения ими электромагнитного излучения.

Передача теплоты теплопроводностью имеет место между двумя точками одного тела или между двумя соприкасающимися телами, если они имеют различную температуру (между ними имеется температурный градиент). Температурный градиент – вектор, характеризующий изменение температурного поля между двумя точками одного тела или между двумя соприкасающимися телами. Теплота передается за счет теплового движения молекул и свободных электронов в телах.

В печах, работающих на топливе, имеют место все три способа теплообмена, но в зависимости от конструкции печи и теплового режима один из видов теплообмена преобладает над другим.

10.2 Количество теплоты, передаваемое конвекцией

Количество теплоты, передаваемое конвекцией,

$$Q_k = \alpha_k (t_1 - t_2) F \tau \text{ кДж}, \quad (10.1)$$

где $t_1 - t_2$ – разность температур между движущейся средой и твердым телом, °С; F – поверхность соприкосновения среды с твердым телом, м²; α_k – коэффициент теплопередачи конвекцией, который характеризует то количество теплоты, которое передается на 1 м² поверхности нагрева за 1 с при разности температур в 1 К, кДж/(м²·с·К).

При передаче теплоты конвекцией имеет место и теплопроводность. На поверхности твердого тела образуется тонкий «пограничный слой» газа или жидкости. По мере увеличения скорости движения потока отдельные частицы проникают через этот слой и соприкасаются с поверхностью тела. Однако газы проводят теплоту плохо. Поэтому количество теплоты, передаваемого теплопроводностью через пограничный слой ничтожно мало.

Теплопередача конвекцией зависит от характера движения среды. В ламинарном потоке большое значение имеет теплопроводность, в турбулентном – скорость движения среды. С увеличением скорости потока повышается его турбулентность, учащается контакт частиц с поверхностью

нагрева. Большое влияние оказывает также температура, геометрические размеры и формы поверхности нагреваемого тела и его расположение в потоке, природа жидкости или газа.

Теплопередача конвекцией имеет большое значение при температуре печи ниже $600 - 700^{\circ}\text{C}$ и средней скорости потока газов, омывающих поверхность нагрева больше 5 м/с . в кузнечных же печах с температурой $900 - 1300^{\circ}\text{C}$ и выше этот вид теплопередачи имеет вспомогательное значение. Конвекцией передается лишь $10 - 15\%$ теплоты, а остальное – излучением.

Для всех видов теплообменников (воздухонагревателей, рекуператоров, регенераторов и пр.) теплопередача конвекцией имеет первостепенную важность, в особенности для собственно воздушных потоков, т.к. воздух, будучи прозрачным для лучистой энергии, всегда нагревается непосредственно конвекцией.

Конвекция играет большую роль в печах скоростного нагрева, где имеют место большие скорости потока.

10.3 Основы теплопередачи излучением

Тепловая энергия, заключенная в теле, превращается в лучистую энергию. Тепловые лучи, подобно световым лучам, представляют собой электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве со скоростью света. Они отличаются от световых лучей лишь длиной волны. Лучистая энергия распространяется в различных направлениях и при встрече с другим телом полностью или частично превращается в тепловую энергию. При этом, падая на поверхность тела, лучистая энергия ($Q_{\text{л}}$) частично ($Q_{\text{А}}$) поглощается телом, снова превращаясь в теплоту, частично отражается (Q_{R}), и частично проходит сквозь тело ($Q_{\text{д}}$), т.е.

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{А}} + Q_{\text{R}} + Q_{\text{д}}$$

Разделив обе части равенства на $Q_{\text{л}}$, получим

$$\frac{Q_{\text{А}}}{Q_{\text{л}}} + \frac{Q_{\text{R}}}{Q_{\text{л}}} + \frac{Q_{\text{д}}}{Q_{\text{л}}} = 1.$$

Отношение $A = \frac{Q_{\text{А}}}{Q_{\text{л}}}$ называется поглощательной способностью тела,

или коэффициентом поглощения; $R = \frac{Q_{\text{R}}}{Q_{\text{л}}}$ – отражательной способностью;

$D = \frac{Q_{\text{д}}}{Q_{\text{л}}}$ – способностью тела пропускать лучистую энергию. Если $R=D=0$ и $A=1$, то тело называется абсолютно черным. В природе абсолютно черных

тел нет. Самой высокой поглотительной способностью обладает сажа, у которой $A=0,96$. Для тел, встречающихся в природе, коэффициенты A , R и D не равны нулю и всегда меньше единицы.

Твердые и жидкие тела встречающиеся в печах, пропускают через себя ничтожно малое количество лучистой энергии, поэтому в общем случае в расчетах эту энергию можно не учитывать, т.е. можно считать, что $A+R=1$. Газообразные продукты горения обладают прозрачностью и поглотительной способностью по отношению к тепловым лучам, поэтому приближенно можно считать $A+D=1$. Для воздуха $D=1$.

Ряд законов, установленных для видимых световых потоков лучистой энергии, справедлив и для тепловых. Связь между излучающей и поглощающей способностями тела установлена законом Кирхгофа, по которому отношение излучающей способности тела E к его коэффициенту поглощения A есть величина постоянная для всех тел, имеющих одинаковую температуру, т.е.

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = \frac{E_0}{A_0} = E_0, \quad (10.3)$$

где E_0 и A_0 – излучающая и поглощающая способности абсолютно черного тела.

Чем сильнее тело поглощает падающую на него лучистую энергию, тем больше энергии оно само может излучить при прочих равных условиях. Зависимость полного количества энергии E_0 абсолютно черного тела от абсолютной температуры выражается законом Стефана-Больцмана:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ кДж}/(\text{м}^2\text{ч}), \quad (10.4)$$

где T – абсолютная температура тела; $C_0 = 4,96$ – константа излучения абсолютно черного тела.

Твердые и жидкие тела относятся к серым телам и имеют меньшую излучающую способность, чем абсолютно черное тело. В отличие от абсолютно черного тела серое тело лишь частично поглощает падающую на его поверхность лучистую энергию, а другую часть отражает. Для серых тел закон Стефана-Больцмана принимает вид:

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ кДж}/(\text{м}^2\text{ч}), \quad (10.5)$$

где C – коэффициент излучения данного тела, который зависит от его природы, от состояния и температуры.

Согласно закону Кирхгофа,

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4; \quad (10.6)$$

$$E_1 = C_1 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = A_1 C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

откуда

$$C_1 = A_1 C_0. \quad (10.7)$$

Так как $A < 1$, то $C_1 < C_0$, а следовательно $E_1 < E_0$. Числовые значения C_1 для различных тел определяются экспериментально. Из уравнения (10.7) видно, что при известном коэффициенте поглощения тела можно найти коэффициент его излучения. Отношение излучающей способности данного тела к излучающей способности абсолютно черного тела называется степенью черноты тела ε .

$$\varepsilon = \frac{E_1}{E_0} = \frac{C_1 \left(\frac{T}{100} \right)^4}{C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4} = \frac{C_1}{C_0}, \quad (10.8)$$

откуда $C_1 = \varepsilon C_0$; тогда $E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$. Но $C_1 = A_1 C_0$, тогда $\varepsilon = A_1$, т.е.

поглощательная способность и степень черноты тела численно равны между собой. Значение ε всегда изменяется в пределах $0 \div 1$ и зависит от природы тела и его температуры нагрева. Так ε для шамотного кирпича при температуре 1000°C равен $0,75$, а при $T=1227^\circ\text{C}$ составляет $0,59$. Окисленная сталь при $T=600^\circ\text{C}$ имеет $\varepsilon=0,7 \div 0,8$.

10.3.1 Лучистый теплообмен между телами

При лучистом теплообмене каждое из тел излучает энергию. Количество теплоты, воспринимаемое менее нагретым телом от более нагретого, зависит от их температуры, формы и размеров тел, взаимного расположения в пространстве и степени черноты.

1. Теплообмен между двумя параллельными поверхностями:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{\text{п}} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ кДж}/(\text{м}^2\text{ч}), \quad (10.9)$$

где Q_{1-2} – количество теплоты, воспринимаемое менее нагретым телом (1) от более нагретого (2); T_1 и T_2 – температуры более нагретого тела и менее нагретого тела; $\varepsilon_{\text{п}}$ – приведенная степень черноты системы, которая определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \text{т.е.} \quad \varepsilon_{\Pi} = f(\varepsilon_1; \varepsilon_2).$$

2. Теплопередача при произвольном расположении поверхностей:
- 3.

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{\Pi} C_0 F_p \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1-2} \quad \text{кДж/час} \quad (10.11)$$

где $\varepsilon_{\Pi} = \varepsilon_1 \varepsilon_2$; F_p – условная расчетная поверхность теплообмена; φ_{1-2} – средний угловой коэффициент, т.е. доля излучения поверхности F_1 , направленная на поверхность F_2 .

Средний угловой коэффициент определяется формой поверхностей, их размерами, взаимным расположением и расстоянием между ними.

10.3.2 Излучение газов

Газы, как и твердые тела, обладают значительной лучеиспускательной способностью. В отличие от твердых тел они могут излучать или поглощать лучи лишь волн некоторых длин, а для остальных длин они являются теплопрозрачными.

Наибольшей лучеиспускательной способностью обладает трехатомные газы, из которых большое значение для работы печей имеют $(\text{H}_2\text{O})_{\text{пар}}$ и CO_2 . Излучение двухатомных газов (H_2 , O_2 , N_2 , CO и др.) очень мало и в расчетах может не учитываться.

10.4 Передача теплоты теплопроводностью

При работе печи передача теплоты теплопроводностью происходит в нагреваемом металле (от поверхности внутрь), от пода к нагреваемому металлу через поверхность контакта, а также в стенках печи (от внутренней поверхности к внешней).

Различные материалы проводят теплоту по-разному в зависимости от их физических свойств и состояния. Способность проводить теплоту отражает коэффициент теплопроводности λ_t , представляющий собой количество теплоты, передаваемое в 1 ч через стенку площадью 1 м², толщиной 1 м при разности температур в 1К.

У материалов с плотной кристаллической структурой (металлы и некоторые минералы) λ_t значительно выше, чем у многопористых материалов (шамот, диас, красный кирпич). С повышением температуры теплопроводность обычно уменьшается. Численные величины λ_t колеблются

в широких пределах и определяются опытным путем. Так, для теплоизоляционных материалов $\lambda_t=0,02\div0,1$, для металлов $\lambda_t=10\div360$, для жидкостей $\lambda_t=0,1\div0,5$, для воздуха $\lambda_t=0,021$. В расчетах коэффициент теплопроводности λ_t берется при температуре T_{cp} , средней между температурами двух поверхностей.

Передача теплоты может быть при стационарном состоянии (в стенках печи) и при нестационарном (в нагреваемом металле). При стационарном состоянии количество теплоты Q , передаваемое теплопроводностью от одной поверхности однослойной стенки к другой,

$$Q = \lambda_t \frac{T_1 - T_2}{S} F \tau \text{ кДж}, \quad (10.18)$$

где S – толщина стенки; T_1 и T_2 – температура одной и другой поверхности.

Кладка современных печей делается многослойной. Внутренний слой стенки выложен из огнеупорного кирпича, средний из теплоизоляционного огнеупорного легковеса и наружный из менее огнеупорного, но более теплоизоляционного материала. Каждый слой имеет различную толщину и различный коэффициент теплопроводности.

10.5 Теплопередача в рабочем пространстве печи

Как было указано ранее, в рабочем пространстве печи раскаленные продукты горения топлива отдают свою теплоту нагреваемому металлу, а также стенкам и своду печи путем излучения и конвекции.

В результате металл получает теплоту за счет трех основных потоков: излучения раскаленных газов и пламени, $Q_{лг}$; излучения стен и свода, $Q_{лс}$; конвекционного потока теплоты от движущихся газов, Q_k . Внутренняя поверхность кладки вследствие малой теплопроводности и большой степени черноты нагревается до более высокой температуры, чем металл и излучает свою теплоту на металл, т.е. кладка является посредником в передаче теплоты металлу.

Для расчета количества теплоты, переданного посредством излучения $Q_{л}$ от печных газов $Q_{лг}$ к металлу с учетом косвенной теплопередачи стенок и свода $Q_{лс}$ пользуются формулой

$$Q_{л} = \varepsilon_{п} C_0 F_M \left[\left(\frac{T_{г}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{м}}{100} \right)^4 \right] \text{ кДж/ч}, \quad (10.27)$$

где $T_{г}$ и $T_{м}$ - соответственно температуры газа и металла; $\varepsilon_{п}$ – приведенная степень черноты при лучистом теплообмене между газами ($\varepsilon_{г}$), кладкой печи ($\varepsilon_{к}$) и нагреваемом металлом ($\varepsilon_{м}$);

$$\varepsilon_{\Pi} = \varepsilon_{\text{М}} \frac{\omega + 1 - \varepsilon_{\Gamma}}{\omega + \frac{1 - \varepsilon_{\Gamma}}{\varepsilon_{\Gamma}} [\varepsilon_{\text{М}} + \varepsilon_{\Gamma} (1 - \varepsilon_{\text{М}})]},$$

где $\omega = \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{М}}}$ – степень развития внутренней поверхности кладки.

На практике часто принимают $\varepsilon_{\text{М}} \approx \varepsilon_{\text{к}} = 0,8$.

Чем больше ω , тем интенсивнее теплопередача излучением, т.к. с увеличением высоты свода увеличивается поверхность кладки и, следовательно, увеличивается толщина газового потока. Однако это увеличение идет до тех пор, пока поток излучающих газов заполняет все пространство, ограниченное кладкой. Если с увеличением высоты свода толщина газового потока не увеличивается, то увеличения теплопередачи происходить не будет, а при очень большой высоте свода теплопередача уменьшится вследствие значительного увеличения потерь теплоты на сторону.

Величина тепловоспринимающей поверхности $F_{\text{М}}$ зависит от формы изделий и способа укладки их на поду печи. Если заготовки имеют прямоугольное или круглое сечение и уложены вплотную друг к другу, то за тепловоспринимающую поверхность при одностороннем нагреве принимают проекцию заготовок на под, причем поверхность торцов не учитывается.

Если заготовки уложены не вплотную, необходимо определить эффективную поверхность $F_{\text{М}}'$. Для этого подсчитывается активная площадь пода: $F_{\text{акт}} = n(b + d)l$, м², а также отношение $\frac{b}{d}$, где n – число нагреваемых в печи заготовок; d – диаметр, сторона квадрата или ширина заготовок, м; l – длина заготовок, м; b – ширина промежутка между соседними заготовками, м. Зная $F_{\text{акт}}$ и $\frac{b}{d}$, по таблице определяем отношение $\frac{F_{\text{М}}'}{F_{\text{акт}}}$, а отсюда и $F_{\text{М}}'$.

Поперечное сечение заготовки	b/d										
	0,00	0,25	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Квадратные	$F_{\text{М}}'/F_{\text{акт}}$										
	1,0	0,99	0,98	0,95	0,91	0,82	0,74	0,67	0,61	0,56	0,52
Круглые	1,0	0,98	0,97	0,93	0,89	0,79	0,71	0,65	0,60	0,55	0,51

Одновременно $\varepsilon_{\text{М}}$ заменяем на $\varepsilon_{\text{М}}'$, которое определяется по формуле

$$\varepsilon'_M = \frac{\varepsilon_M}{1 - (1 - \varepsilon_M) \left(1 - \frac{F'_M}{F_{\text{акт}}}\right)}.$$

Температуру внутренней поверхности печных стенок (например, для расчета тепловых потерь теплопроводностью в окружающее пространство) можно определить по формуле:

$$T_K^4 = T_M^4 + \frac{\varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_M} (T_{\Gamma}^4 - T_M^4).$$

Излучение газов в печах всегда сопровождается конвективной теплопередачей. Общее количество теплоты

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}. \quad (10.29)$$

11 Тепловой баланс пламенной печи

Выражается уравнением, связывающим статьи прихода и расхода теплоты. Тепловой баланс необходим для определения расхода топлива и КПД печи. Весь расчет ведется на 1 ч. работы печи.

Приход теплоты.

1. Химическая теплота топлива (результат реакций):

$$Q_{\Gamma} = B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}},$$

где B – неизвестная величина, расход топлива, найдется из баланса; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания топлива.

2. Физическая теплота, вносимая подогретым воздухом:

$$Q_{\text{в}} = BL_{\Gamma} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}},$$

где L_{Γ} – количество воздуха, необходимого для сжигания 1 м^3 газа; $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воздуха; $t_{\text{в}}$ – температура подогрева воздуха.

3. Теплота, выделяющаяся при угаре металла:

$$Q_{\text{у}} = \frac{5650G \cdot a}{100},$$

где 5650 – тепловой эффект окисления, кДж/кг; a – процент угара металла, (2–3% для камерной печи и 1–2% для методической); G – производительность печи, кг/ч.

Расход теплоты.

1. Теплота, затрачиваемая на нагрев металла:

$$Q_1 = G \cdot C_M (T_K - T_0),$$

где C_M – теплоемкость металла (для стали $0,66 \div 0,707$ кДж/(кг·К)).

2. Потери теплоты с продуктами горения:

$$Q_2 = B \cdot V_{\Gamma} \cdot C_{\text{д}} (T_{\text{д}} - T_0),$$

где $C_{\text{д}}$ – теплоемкость газов, уходящая в дымоход ($1,4 \div 1,6$ кДж/(м³·К)); $T_{\text{д}}$ – температура газа в дымоходе; V_{Γ} – количество продуктов горения, образующегося при сгорании 1 м³ газа.

3. Потери теплоты от химической неполноты горения:

$$Q_3 = 12100 \frac{B \cdot V_{\Gamma} \cdot CO}{100},$$

где CO – количество угарного газа в % в общем количестве продуктов горения.

4. Потери теплоты из-за механического недожога топлива:

$$Q_4 = kBQ_{\text{н}}^{\text{п}},$$

где k – коэффициент механических потерь.

5. Потери теплоты теплопроводностью через кладку печи:

$$Q_5 = \frac{t_{\text{ккл}} - t_{\text{в}}}{\frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha''}} \cdot F_{\text{ккл}},$$

где $t_{\text{ккл}}$ – температура кладки печи; равна температуре в печи ≈ 1300 °С; $t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, ≈ 20 °С; $\frac{S}{\lambda}$ – термическое сопротивление кладки; α'' – коэффициент конвективного теплообмена между кладкой и воздухом; $F_{\text{ккл}}$ – поверхность кладки.

6. Потери теплоты теплопроводностью через поверхность заслонки окон

$$Q_6 = \frac{t_{\text{ккл}} - t_{\text{в}}}{\frac{S}{\lambda} - \frac{1}{\alpha''}} \cdot F_0 \cdot \psi,$$

где ψ – доля времени, в течение которого окно закрыто; F_0 – площадь окна.

7. Потери теплоты излучением через открытые окна:

$$Q_7 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \cdot F_0 (1 - \psi) \cdot \phi,$$

где ε – степень черноты кладки печи, C_0 – коэффициент Больцмана; $(1 - \psi)$ – доля времени, в течении которого окно открыто; ϕ – коэффициент диафрагмирования.

8. Теплота, выносимая выбивающимися газами через закрытые окна:

$$Q_8 = V_0 \cdot C_T \cdot (T_k - T_0),$$

где V_0 – расход продуктов сгорания через отверстия в печи.

9. Потери теплоты на нагрев перемещающихся деталей печи и тары:

$$Q_9 = G_T \cdot C_T \cdot (T_k - T_0)$$

где G_T – масса тары; C_T – теплоемкость тары.

10. Потери теплоты с окалиной:

$$Q_{10} = 0,01 \cdot a \cdot G \cdot C_{ок} (T_k - T_0).$$

Из уравнения баланса можем найти искомую величину B и КПД печи:

$$\eta = \frac{Q_1}{\sum_{i=1}^{10} Q_i}.$$

КПД камерной печи обычно составляет 0,1–0,15; методической печи – 0,3 – 0,35.

12 Обслуживание печей и электронагревателей

При обслуживании печей выполняются следующие операции:

1) регулируют расход топлива и воздуха; недостаток воздуха при газовом нагреве определяют по желтовато-зеленому цвету пламени, выбивающемуся из печи, а избыток его – по отсутствию такого пламени;

2) контролируют горение всех горелок (форсунок), так как неодинаковая их работа приводит к неравномерному нагреву заготовок;

3) поддерживают на подду низкое положительное давление печных газов с небольшим выбиванием пламени из-под заслонки, горячий факел, поднесенный к заслонке, должен отклоняться от печи, а не втягиваться в нее;

4) поддерживают в печи заданную температуру изменением расхода топлива;

5) контролируют работу рекуператора, не допуская повышения перед ним температуры дымовых газов в результате догорания продуктов неполного горения;

6) контролируют работу приборов теплового контроля и автоматического регулирования, а также различных механизмов, горелок, форсунок и пр.

7) выдерживают заданный режим нагрева заготовок, темп загрузки и выгрузки заготовок.

Необходимо добиваться режима нагрева с минимальным расходом топлива и исключать горячие простои печи. Если во время простоев металл находится в печи, снижают расход топлива, а пламя поддерживают восстановительным, чтобы не перегреть заготовки.

Обслуживание индукционных электронагревателей делится на техническое и оперативное. Техническое обслуживание включает в себя наладку цепей управления, отработку режимов нагрева заготовок, производство профилактических и капитальных осмотров и ремонтов оборудования, изготовление новых инструментов и т.д. Оперативное обслуживание включает: своевременный пуск преобразователей частоты тока; сбор схем питания нагревательных установок; загрузку заготовки, подачу заготовки к ковочно-штамповочному механизму; наладку нагревателей при переходе от нагрева одной заготовки на нагрев другой.

Техническое обслуживание осуществляется работниками общезаводского цеха электронагрева, а оперативное – работниками кузнечного цеха.

12.1 Ремонт печей

Кузнечная печь работает без большого ремонта в среднем 4 – 6 месяцев. Прежде всего у нее разрушается под, свод и стенки (в методических и полуметодических печах), откосы рабочих окон. Два-три раза в месяц необходимо подправлять под, откосы рабочего окна, футеровку заслонки, прочищать дымовые каналы, то- есть производить текущий ремонт.

Ремонт проводится по графику цеха. Для ремонта необходимо иметь запас соответствующих материалов: огнеупорный кирпич, молотый шамот, глину, песок, а также комплекты арматуры, которая чаще разрушается (заслонки, шиберы, сопла форсунок и горелок и другое). Все неисправности наружной кладки печи и теплоизоляции немедленно исправляются. Не реже раза в неделю производится побелка печи.

13 Особенности нагрева сталей аустенитного класса

Специфические особенности нагрева аустенитных сталей связаны с тем, что в следствии их парамагнитности глубина проникновения тока в холодную сталь мало отличается от глубины проникновения в горячую. Глубина проникновения в холодную сталь при частоте тока 2500 Гц равна 8,7 мм, а в горячую – 11,1 мм. При нагреве углеродистых сталей при такой же частоте тока глубина проникновения в холодную сталь – 0,67, а в горячую – 11 мм. Таким образом, с момента начала цикла нагрева объем теплоносителя в парамагнитной заготовке больше, чем в ферромагнитной.

Плавное изменение теплофизических свойств аустенитных сталей с повышением температуры объясняет линейное возрастание температуры всех точек сечения в период регулярного режима нагрева. Средняя скорость нагрева аустенитной стали в 1,5 – 2 раза меньше, чем углеродистой. Рост зерна происходит медленнее, чем у углеродистых сталей при тех же температурных условиях, что является важной характеристикой при выборе технологии горячего деформирования.

В кузнечно-штамповочном производстве применяется штамповка аустенитных сталей с индукционным нагревом при производстве таких деталей, как тройники, диски, шестерни, патрубки, крышки и т.п. Конечный перепад температур при нагреве заготовок выбирают таким образом, чтобы к началу деформирования он уменьшился до 100 – 130°C.

13.1 Особенности нагрева цветных сплавов

Для нагрева цветных металлов чаще используют электрические печи сопротивления камерного типа и карусельные. Колебание температуры в печи не более 10 °С. Для нагрева магниевых сплавов предпочтительны печи с принудительной циркуляцией воздуха. В печи, где находятся цветные сплавы, не должно быть стальных заготовок, а сами заготовки не должны соприкасаться с нагревательными элементами печи. Поковки могут загружаться в печь поштучно или на поддонах.

Перед загрузкой в печь, заготовки должны быть тщательно очищены от масла и прочих загрязнений. Заготовки из магниевых сплавов должны быть очищены от магниевой пыли. Если в печи нагревались заготовки при более высокой температуре, необходимо печь предварительно охладить ниже заданной температуры на 50 – 100 °С, а затем поднять температуру до заданной для данного сплава, дать выдержку в течении 20 – 30 мин. и только тогда загружать заготовки в печь. Время нагрева перед ковкой и штамповкой устанавливаются следующим образом: для заготовок из алюминиевых и магниевых сплавов диаметром или толщиной до 50 мм – 1,5 минуты на каждый миллиметр диаметра или толщины; для заготовок диаметром или толщиной свыше 100 мм – 2 мин. на каждый миллиметр диаметра или толщины; для заготовок из медных сплавов диаметром или толщиной до 50 мм – 0,75 мин. на каждый миллиметр диаметра или толщины; для диаметров или толщин свыше 100 мм – 1 мин. на миллиметр диаметра или толщины. Для заготовок из алюминиевых или магниевых сплавов диаметром или толщиной 50 – 100 мм время нагрева τ каждого миллиметра диаметра или толщины определяется по формуле:

$$\tau = 1,5 + 0,01(d - 50)$$

Для заготовок из медных сплавов при тех же условиях

$$\tau = 1,0 + 0,06(d - 50),$$

где d – диаметр или толщина нагреваемых заготовок, мм.

После загрузки заготовки в разогретую до нужной температуры печь наблюдается снижение температуры, а после окончания загрузки температура медленно поднимается. Время нагрева является временем выдержки заготовок в печи после достижения ею температуры начала штамповки. При вынужденных перерывах в работе продолжительностью до 6 – 7 часов температура печи для алюминиевых сплавов должна быть снижена до 430 – 470⁰С, а заготовки оставаться в печи; при перерывах свыше 7 часов заготовки вынимаются из печи. Для магниевых сплавов МА2, МА3 и МА5 при перерывах до 4 часов, а сплава ВМ65-1 до 2 часов, температура печи должна быть снижена до нижнего предела, установленного для каждого из рассматриваемых сплавов, заготовки же должны оставаться в печи. При перерывах свыше 4 часов для сплавов МА2, МА3 и МА5 и свыше 2 часов для сплава ВМ65-1 заготовки выгружают из печи. При возобновлении работы находящиеся в печи заготовки должны быть нагреты до верхнего предела температур деформирования.

При нагреве заготовок из титановых сплавов необходимо обеспечивать минимальное время пребывания их при температуре свыше 800⁰С. Для нагрева цилиндрических заготовок наилучшим способом является индукционный. Фасонные заготовки рекомендуется нагревать в электрических методических или двухкамерных печах. Нагрев в газовых печах возможен только в окислительной атмосфере. При этом пламя от форсунок не должно омывать заготовки. Во всех печах обязательное условие – равномерный прогрев всей печи, допускается перепад не более 30⁰С.

Время, необходимое для нагрева, определяется из расчета: 1 мин. на каждые 2 мм максимального поперечного сечения заготовки. Заготовки диаметром более 200 мм необходимо нагревать, применяя двухступенчатый нагрев. В случае небольшого перерыва в работе, температуру печи, в которой находятся заготовки, следует снизить до 850⁰С и после перерыва вновь поднять ее до температурыковки-штамповки со скоростью, допускаемой мощностью печи. При длительных перерывах заготовки из печи выгружают и укладывают на лист асбеста или в сухой песок.

Перед загрузкой заготовок в печь под ее должен быть очищен от шлака, чтобы исключить реакцию взаимодействия между нагреваемым металлом и шлаком. Под печи не рекомендуется изготавливать из жаропрочных сплавов с большим содержанием никеля (свыше 50%), так как при этом возможно приваривание заготовок к поду. Заготовки укладываются в один ряд с небольшими промежутками между ними.

При плотной укладке необходимое время нагрева увеличивается на 10 –15%. Заготовки диаметром свыше 150 мм рекомендуется кантовать каждые 30 минут.

Список литературы

1. Касенков М.А. Нагревательные устройства кузнечного производства Машгиз. 1962. 472 с.
2. Ковка и штамповка. Справочник, т. 1. Под ред. Е.И. Семенова, 1986. – 592 с.
3. Семенов Е.И., Кондратенко В.Г., Ляпунов Н.И. Технология и оборудование ковки и объемной штамповки. М.: Машиностроение, 1999. – 259с.
4. Богданов В.Н., Рыскин С.Е. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности. М.-Л. – Машиностроение, 1965. – 96 с.
5. Безручко И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки. – Л.: Машиностроение, 1987. – 126 с.
6. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов. – М.: Машиностроение, 1981. – 168 с.
7. Поляков И.С. Учебное пособие. Современные пламенные печи для нагрева заготовок в кузнечно-штамповочном производстве.– МАМИ, 1990, –101 с.
8. Поляков И.С. Методическое пособие. Индукционный нагрев заготовок под штамповку.– МАМИ, 1988.
9. Брук В.Д., Пашистов М.А. Современные пламенные печи для нагрева заготовок в кузнечно-штамповочном производстве. Обзор, М., НИИмаш, 1981., 56с.
10. Никольский Л.Ф., Эйфир Е.М. Технология горячей штамповки цветных сплавов. М: НТО Машпром, 1963. – 117с.
11. Покрас И.Б., Шеногин В.П. Нагрев и нагревательные устройства. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2004. – 660 с.

Содержание

1 Общие сведения о нагреве металлов и сплавов	3
1.1. Явления, происходящие в металле при нагреве	3
1.2. Режимы нагрева металла под ковку и штамповку и температурный интервал ковки и штамповки	9
1.3. Охлаждение поковок	14
1.4. Расчет продолжительности нагрева заготовок	14
2. Классификация способов нагрева.	15
3. Индукционный нагрев	17
3.1. Физические основы индукционного нагрева	17
3.2. Преимущества и недостатки индукционного нагрева	20
3.3. Устройство индукционной установки и основные виды индукционных нагревательных установок	21
3.4. Виды индукторов	22
3.5. Разновидности режимов нагрева	24
3.5.1. Обычный индукционный нагрев	24
3.5.2. Ускоренный изотермический нагрев	24
3.5.3. Нагрев токами промышленной частоты	25
3.5.4. Двухчастотный нагрев.	25
3.5.5. Безокислительный и малоокислительный индукционный нагрев	26
3.5.6. Пламенно-индукционный нагрев	27
3.6. Расчет индуктора	28
3.7. Оборудование, применяемое для индукционного нагрева	32
3.7.1 Индуктор для нагрева цилиндрических заготовок	35
3.7.2 Индукционные нагреватели для концов мерных заготовок	37
3.8. Измерение температуры при индукционном нагреве	38
3.10. Требования, предъявляемые к футеровке индукторов	39
4. Электроконтактный нагрев	41
4.1. Сущность электроконтактного нагрева	42
4.2. КПД установки для электроконтактного нагрева	44
4.3. Основные схемы нагрева в электроконтактных установках	45
4.4. Контактное давление и распределение температуры в заготовке	46
4.5. Определение времени нагрева заготовок	46
4.6. Устройство однопозиционной электроконтактной установки К-16	47
4.7. Преимущества и недостатки электроконтактного нагрева	47
5. Нагрев металла в электрических печах сопротивления	48
5.1. Особенности нагрева металла в электрических печах	49

сопротивления	
5.2. Нагревательные элементы	49
5.3. Краткая характеристика электропечи сопротивления с карбидокремниевыми нагревателями	51
5.3.1. Электропечь камерная с карбидокремниевыми нагревателями	51
5.3.2. Камерная печь с выдвижным подом	55
5.3.3. Шахтная электрическая печь сопротивления	56
5.4. Электрические печи сопротивления непрерывного действия	56
5.4.1. Рольганговая электрическая печь сопротивления	58
5.4.2. Карусельная печь сопротивления	59
5.5. Области применения, преимущества и недостатки	59
5.6. Расчет электрической печи сопротивления	61
6. Нагрев стальных заготовок в соляных ваннах	63
6.1. Краткая характеристика соляных электрованн	65
7. Пламенный нагрев	66
7.1. Топливо. Признаки топлива и его состав.	66
7.2. Теплота сгорания топлива	68
7.3. Природное газообразное топливо	69
7.4. Искусственные горючие газы	70
7.5. Сжигание топлива	71
7.5.1. Сущность процесса горения	71
7.5.2. Расчет потребного количество воздуха, состава и количества продуктов горения	73
7.5.3. Устройство для сжигания воздуха	76
7.6. Температура горения	78
8. Движение газов в печах	80
8.1. Характер движения газов	80
8.1.2. Движение газа в рабочем пространстве печи. Свободное и вынужденное движение газов	81
8.2. Приложение закона Бернулли к решению задач, относящихся к работе печей	83
8.3. Понятие о рециркуляции газов	85
8.4. Отвод дымовых газов	86
8.4.1. Рекуператоры и регенераторы	87
9. Классификация пламенных нагревательных устройств	90
9.1. Конструкция камерной печи	90
9.2. Конструкция методической печи	91
9.3. Недостатки пламенного нагрева	91
10. Теплопередача в печах	91
10.1. Три способа передачи теплоты	91
10.2. Количество теплоты, передаваемое конвекцией	92

10.3. Основы теплопередачи излучением	93
10.3.1 Лучистый теплообмен между телами	95
10.3.2. Излучение газов	97
10.4. Передача теплоты теплопроводностью	98
10.5. Теплопередача в рабочем пространстве печи	98
11.Тепловой баланс пламенной печи	99
12. Обслуживание печей и электронагревателей	101
12.1 Ремонт печей	102
13. Особенности нагрева сталей аустенитного класса	102
13.1 Особенности нагрева легированных сталей	103
Список литературы	105

Учебное издание

Петров Павел Александрович, к.т.н., доц.
Крутина Елена Васильевна, к.т.н., ст.преп.
Калпин Юлий Григорьевич, д.т.н., проф.

**НАГРЕВ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА В КУЗНЕЧНО-
ПРЕССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.**

Под редакцией авторов

*Оригинал-макет подготовлен редакционно-издательским отделом
МГТУ «МАМИ»*

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной литературы на 2010 г.

Подписано в печать 10.03.2010. Формат 60x90 1/16. Бумага 80г/м²
Гарнитура «Таймс».Ризография. Усл. печ. л. 6.8.
Тираж 100 экз. Заказ № 36-10.

МГТУ «МАМИ»
107023, г. Москва, Б. Семеновская ул., 38.