

Конспект лекций по дисциплине  
**«Нагрев и нагревательные  
устройства»**

## Лекция № 1

### План лекции:

*Введение. Топливо. Общие понятия о топливе. Теплота сгорания. Процесс горения топлива*

Пластическая деформация металла и его термическая обработка выполняются при высоких температурах в нагревательных устройствах. Основными агрегатами, в которых выделяемая теплота расходуется для нагрева металла, являются печи.

Печи находят широкое применение в горячих цехах машиностроительных заводов: кузнечно-штамповых, термических, литейных и других отраслей промышленности.

Нагрев металла в кузнечно-штамповочном производстве – одна из важнейших производственных операций, целью, которой является получение необходимых механических характеристик металла перед обработкой давлением. От правильной организации и выполнения процесса нагрева металла зависит не только качество поковок, но и производительность основного кузнечного оборудования, стойкость штампов, а также экономия металла и топливно-энергетических ресурсов.

Нагрев металла теплом, полученным за счет сжигания топлива в рабочей камере нагревательного устройства, образует группу пламенного нагрева (или нагрева в пламенных печах). Нагрев металла теплом, полученным за счет преобразования электрической энергии, образует группу электронагрева. В свою очередь каждая из вышеуказанных групп делится на окислительный и безокислительный процессы. Таким образом, современные машиностроительные заводы располагают разнообразными нагревательными устройствами, удовлетворяющими все требования технологии производства. Однако наиболее широкое распространение в кузнечно-штамповочном производстве получил пламенный нагрев с его большим многообразием нагревательных устройств (печей) за счет своей универсальности и простоты обслуживания. Это и

неудивительно, поскольку наука о печах или печная теплотехника прошла сложный путь развития.

Основоположником науки печной теплотехники является М.В.Ломоносов, сформулировавший закон сохранения энергии и давший строгое научное обоснование причин движения газов в печах. Дальнейшее развитие теории движения газов связано с именами ученых Д.Бернулли, О. Рейнольдса, Л. Прандтля, Н.Е.Жуковского. Наиболее крупный вклад в развитие печной теплотехники сделал В.Е. Грум-Гружимайло, который разработал основные положения гидравлической теории печей, получившей всемирное признание.

В настоящее время на машиностроительных заводах находят применение весьма перспективные установки – печи скоростного безокислительного нагрева. Кроме того, широко применяют электроконтактный и индукционный нагрев, что способствует улучшению процесса нагрева, механизация загрузки и выгрузки заготовок, автоматическое управление процессом нагрева.

### ***Топливо. Общие понятия о топливе***

В кузнечно-штамповочных цехах широкое применение нашли пламенные печи, представляющие собой сложный тепловой агрегат, в котором протекают два процесса: – процесс получения тепла от горения топлива и процесс передачи полученного тепла нагреваемому металлу.

При этом на процесс нагрева существенно влияют свойства топлива, применяемого для пламенных печей и способ его сжигания.

Топливом называется горючее вещество, выделяющее при сгорании значительное количество теплоты и используемое как источник получения тепловой энергии. К топливу предъявляются следующие основные требования:

- достаточно большое количество тепловой энергии, выделяющейся при сжигании на единицу массы или объема;
- газообразность продуктов горения;
- удобство добычи, транспортирования и хранения;

– безопасность продуктов горения для обслуживающего персонала, оборудования и окружающей среды.

Все этим требованиям отвечают вещества органического происхождения. По агрегатному состоянию топливо может быть твердое, жидкое и газообразное; по происхождению и способу добычи – естественное и искусственное, ниже представлена таблица общей классификации видов топлива по агрегатному состоянию.

Таблица 1

Общая классификация топлива по агрегатному состоянию

Агрегатное состояние	Происхождение топлива	
	естественное	искусственные
Твердое	Дрова, торф, бурый уголь, горючие сланцы, каменный уголь, антрацит	Древесный уголь, кокс, полукокс, брикеты, пылевидное топливо
Жидкое	Нефть	Бензин, керосин, соляровое масло, мазут, дизельное топливо и другие продукты переработки нефти, каменноугольная смола, сланцевое масло, спирт
Газообразное	Природный (естественный) и попутный (нефтяной) газы	Коксовый, светильный, нефтяной, генераторный, доменный, газ полукоксования и другие газы.

Естественным топливом называют топливо, которое используют в том виде, в каком оно существует в природе (каменный уголь, нефть, природный газ).

Топливо, полученное из естественного, путем переработки, называют искусственным (мазут, коксовый и доменный газы).

Состав топлива определяют техническим и элементарным анализом. Технический анализ обычно проводят в заводских условиях и при этом определяют процентное содержание серы, влаги и золы в топливе. При элементарном анализе, который проводится в специальных химических лабораториях после технического, определяют содержание углерода, водорода, кислорода в топливе.

Твердое и жидкое топливо – это вещества органического происхождения, состоящие из углерода и водорода (представляют самую ценную часть топлива), серы, кислорода, азота, находящихся в виде сложных химических соединений. Помимо указанных элементов, составляющих горючую массу топлива, в нем есть балласт – это зола ( $A$ ) и влага ( $W$ ), которые снижают процентное содержание горючих составляющих топлива, а следовательно, и ценность топлива в целом.

В соответствии с элементарным составом в твердом и жидком топливе различают горючую, сухую и рабочую массу топлива, которые обозначаются индексом, соответствующим первой букве названия массы топлива. Суммарное содержание элементов каждого индекса равно 100% по массе. Например, состав топлива по горючей массе:

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g = 100\% .$$

Горючей массой называют топливо, лишенное влаги и золы. Сухой массой называют топливо, освобожденное от влаги путем высушивания при температуре 105 – 110°C. Под рабочей массой понимают топливо, содержащее все составляющие. Пересчет состава твердого и жидкого топлива из одной массы в другую выполняется по формулам [7].

$$X^p = \frac{X^g(100 - W^p)}{100};$$

$$X^p = \frac{X^g(100 - W^p - A^p)}{100} .$$

где  $X^p; X^g; X^z$  – процент какого-либо элемента соответственно в рабочей, сухой, горючей массе топлива;

$A^p; W^p$  – процент золы и влаги в топливе.

Все элементы твердого и жидкого топлива можно разделить на горючие ( $C^p; P^p; S^p$ ) и негорючие составляющие ( $O^p; N^p; A^p; W^p$ ).

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих газов и водяных паров.

К горючим газам, входящим в состав газообразного топлива, относятся: окись углерода ( $CO$ ), водород ( $H_2$ ), метан ( $CH_4$ ), более тяжелые углеводороды – этан, пропан, бутан и др., сероводород ( $H_2S$ );

к негорючим газам – азот ( $N_2$ ), кислород ( $O_2$ ), двуокись серы ( $SO_2$ ), влага ( $H_2O$ ).

Химический состав газообразного топлива обычно характеризуется содержанием отдельных составляющих в объемных процентах в сухом газе. Газообразное топливо может быть сухое и влажное. Содержание влаги в газе (его влажность) зависит от температуры.

### ***Теплота сгорания.***

Основным свойством топлива при его использовании для получения тепловой энергии является теплота сгорания. Теплотой сгорания топлива называется количество тепла, выделившегося при полном сгорании единицы массы или объема топлива. Теплота сгорания обозначается  $Q$  измеряется в  $\frac{кДж}{кг}$  или  $\frac{кДж}{м^3}$ .

В зависимости от агрегатного состояния влаги в продуктах горения различают высшую и низшую теплоту сгорания топлива. Высшей теплотой сгорания ( $Q_g^p$ ) называют количество тепла, которое выделяется при сгорании единицы количества топлива, при превращении водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, в жидкость. На практике не удастся охладить продукты сгорания до полной конденсации, и поэтому введено понятие низшей теплоты сгорания. Связь между низшей и высшей теплотой сгорания определяется формулой [1]

$$Q_n^p = Q_g^p - (9H^p + W^p),$$

где  $(9H^p + W^p)$  – затраты теплоты на испарение суммарной влаги.

Обычно в пламенных печах температура газов значительно выше температуры конденсации водяных паров и поэтому основной характеристикой топлива считают низшую теплоту сгорания. Существует два метода

определения теплоты сгорания: экспериментальный и расчетный, если известен элементарный состав топлива.

В первом случае определяют экспериментальное количество теплоты, выделившейся при горении определенного количества тепла. Для этого используют приборы, которые называют *калориметрами*.

Для высшей теплоты сгорания, кДж/кг:

$$Q_n^p = 339,1C^p + 1256H^p - 108,8(S^p - O^p) \quad (1)$$

Для низшей теплоты сгорания, кДж/кг:

$$Q_n^p = 339,1C^p + 1256H^p + 108,8(S^p - O^p) - 25,1(9H^p + W^p). \quad (2)$$

Теплота сгорания газообразного топлива определяется по формуле, построенной по тому же принципу, что и формула Д.И.Менделеева [1].

$$Q_n^p = 127CO + 108H_2 + 358CH_4 + 640C_2H_6 + 915C_3H_8 + 1190C_4H_{10} + 1465C_5H_{12} + 234H_2S \quad (2)$$

где 127; 108; 358; 640; 915; 1190; 1465; 234 – это тепловые эффекты соответствующих составляющих, отнесенных к 0,01 м<sup>3</sup> газа, кДж.

Теплота сгорания газообразного топлива, рассчитанная по формуле, всегда несколько ниже действительной, так как содержащиеся в газе примеси дают дополнительное тепло [3].

Различное топливо имеет разную теплоту сгорания. Поэтому для сравнения тепловой ценности различного топлива введено понятие – "условное" топливо, под которым подразумеваем топливо с теплотой сгорания:  $Q_n^p = 29330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ . Отношение теплоты сгорания данного топлива к теплоте сгорания "условного" топлива называется калорийным эквивалентом топлива:

$$\mathcal{E}_k = \frac{Q_n^p}{Q_{y.m.}}$$

Чем больше величина эквивалента, тем более ценным является топливо. Топливо, используемое в пламенных печах для нагрева заготовок под ковку и штамповку, должно отвечать следующим требованиям:

- удобство сжигания;
- обеспечение требуемого температурного режима нагрева;

– обеспечение высокой производительности печи.

Этим требованиям наиболее полно отвечают жидкое и газообразное топлива. Твёрдое топливо применяется в условиях небольших кузниц.

Из жидкого топлива в кузнечных нагревательных печах сжигают в основном мазут, получивший широкое применение вследствие высокой теплоты сгорания, удобства сжигания и быстрого достижения необходимой температуры нагрева металла [1].

Мазут является результатом перегонки нефти. Выход мазута из нефти достигает 65%. Состав мазута, полученного из различных сортов нефти, примерно одинаковый: углерода содержится 86 – 87%, водорода 12 – 13% и балласта 1,2–1,5%. По содержанию серы, мазут, делится на малосернистый (<0,5%), сернистый (0,5 – 1,0%) и высокосернистый (>1,0%). В основную классификацию мазутов положена вязкость, которая определяется при температуре 50, 80 и 100°C в градусах условной вязкости (в градусах по Энглери). За условную вязкость принимаем отношение времени истечения через тарированное отверстие 200см<sup>3</sup> данной жидкости к времени вытекания того же количества воды при 20°C. По содержанию парафина, который колеблется от 1,5 до 15%, мазут делится на 6 марок (20; 40; 60; 80; 100; 200).

Таблица № 2

#### Классификация мазута

Характеристика	Марка мазута			
	40	100	200	МП
Условная вязкость при 50 °C, *ВУ	5...8	13...15,5	6,5...9,5 (при 100 °C)	8...16
Температура вспышки, °C	90	110	140	110
Температура застывания, °C	10	25	35	25

Марки означают предельную вязкость данного мазута при температуре 50°C. Для нормального сжигания мазута условная вязкость должна быть в пределах от 5 до 15 (в зависимости от форсунки). Поэтому для получения такой вязкости мазут обязательно разогревают.



Газообразное топливо является наиболее желаемым, так как оно лучше перемешивается с воздухом, удобно транспортируется, проще в обслуживании и регулировании, улучшает условия труда.

Различают природный газ и искусственные газы, к которым относятся продукты газификации твёрдого топлива, а также газы, получающиеся как побочные продукты металлургического производства.

Природный газ добывают из чистых газовых месторождений или вместе с нефтью (попутный газ). Основной горючей составляющей является метан ( $\text{CH}_4$ ), содержание которого доходит до 95 - 98%. Попутные газы помимо метана содержат и более тяжёлые углеводороды: этан, пропан, бутан и другие в небольшом количестве.

Из искусственных газов в кузнечном производстве наиболее часто применяют коксовальный и доменный газы. Коксовальный газ получается при переработке каменного угля на кокс и является как бы побочным продуктом. Выход коксовального газа из одной тонны угля составляет до 330 м<sup>3</sup>. Химический состав: 50–55%  $\text{H}_2$ ; 20–15%  $\text{CH}_4$ ; 7–6,5%  $\text{CO}$ ; 2–2,5%  $\text{CO}_2$ ; 7–8%  $\text{N}_2$ . Теплота сгорания коксовального газа примерно в 4 раза больше доменного газа.

Доменный, или колошниковый, газ является побочным продуктом при получении чугуна в доменных печах. Он состоит из 9-16%  $\text{CO}_2$ ; 26-30%  $\text{CO}$ ; 1-2,5%  $\text{H}_2$ ; 0,2-0,5%  $\text{CH}_4$ ; 56-60%  $\text{N}_2$ . Из-за низкой теплоты сгорания и высокой токсичности этот газ экономически невыгодно передавать на большие расстояния и потому его используют по месту производства.

### ***Процесс горения топлива***

Горением называется процесс быстрого окисления горючих составляющих топлива, протекающий с большой скоростью и сопровождающийся выделением тепла, которое обеспечивает высокую температуру продуктов горения [1, 2, 5]. Окислителем в процессе горения является кислород воздуха. Выделенное тепло конденсируется в газообразных

продуктах горения, которые являются передатчиками тепла нагреваемому металлу и стенкам печи.

Горение топлива очень сложный процесс, состоящий из совокупности физических и химических явлений таких, как:

- нагрев топлива до температуры воспламенения с одновременным разложением и выделением газообразных веществ;
- смешение топлива и продуктов его термического разложения воздухом;
- окисление горючих составляющих топлива кислородом с одновременным теплообменом как внутри зоны горения, так и с окружающей средой;
- удаление продуктов горения, нагретых до высоких температур.

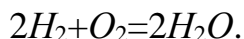
Химические реакции, протекающие при горении топлива, могут быть гомогенные, когда топливо и окислитель в одинаковом фазовом состоянии, и гетерогенные, когда компоненты в различных фазах.

Горение топлива может быть диффузионным и кинетическим. При диффузионном горении процесс смешения горючих составляющих с окислителем и собственно процесс горения протекают одновременно. Определяющей скоростью является величина скорости диффузии. Диффузионное горение - это горение твёрдого и жидкого топлива.

При кинетическом горении процесс горения происходит в объёме предварительно полученной газовой смеси. Определяющей скоростью в этом случае является величина скорости химического взаимодействия. Кинематическое горение наблюдается при сжигании газообразного топлива. Горение смеси топлива и воздуха возможно только при определенном их состоянии. В настоящее время существует две основные теории воспламенения и горения топлива - тепловая и цепная.

Согласно тепловой теории, воспламенение и горение топлива связаны с процессами распространения тепла. Процесс горения, возникающий в результате местного воспламенения, распространяется по всей массе смеси топлива и воздуха с определённой скоростью, благодаря передаче тепла теплопроводностью от зоны горения к ещё не воспламенившейся части смеси.

Цепная теория, не отрицая влияния теплового состояния системы "топливо - воздух", объясняет процессы горения и воспламенения кинематикой цепных реакций. Согласно этой теории, горение топлива представляет цепную реакцию с разветвлёнными цепями, когда каждая активная молекула порождает ряд новых активных центров, ускоряющих ход реакций. Для примера рассмотрим горение водорода, суммарную реакцию которого можно записать уравнением [6]:



В действительности горение протекает по следующей схеме: молекула водорода, сталкиваясь с какой-либо активной молекулой, распадается на два атома водорода. Атомарный водород, реагируя с молекулой кислорода, образует гидроксил (ОН) и атом кислорода. Атом кислорода, вступая в реакцию с молекулой водорода, образует при этом гидроксил (ОН) и атом водорода. Гидроксил (ОН), сталкиваясь с молекулой водорода, реагирует с ней, образуя молекулу  $H_2O$  (водяного пара) и свободный атом водорода. Таким образом, каждый атом водорода порождает в итоге три новых свободных атома водорода и две конечные молекулы водяного пара. Образовавшиеся три активных атома водорода начинают реагировать по той же цепи, т.е. в три раза ускоряя ход реакции и т. д. При таком ходе реакции практически мгновенно распространяются по всему объёму.

Горение окиси углерода и углеводородов идёт так же с образованием промежуточных продуктов, как и разветвлённые цепные реакции, но так как водород, окись углерода и углеводороды являются основными горючими составляющими газообразного топлива, то и горение топлива носит в целом цепной характер.

Процесс воспламенения всегда предшествует горению. Минимальная температура, при которой смесь воспламеняется, называется температурой воспламенения. Согласно тепловой теории горения топлива, температурой воспламенения считается та, при которой количество тепла, выделяющегося в результате окисления составляющих топлива, больше или равно количеству

тепла, отдаваемого в окружающее пространство. С позиции цепной теории горения, топливо воспламеняется при такой скорости цепной реакции, когда количество возникающих цепей больше или равно количеству цепей обрыва.

Температура воспламенения зависит от физических свойств газа, пропорции между газом и окислителем и от потерь в окружающую среду. Не всякая смесь газа с окислителем способна воспламеняться. Существуют верхний и нижний пределы концентрации горячих газов в смеси с воздухом и кислородом. Вне этих пределов смесь не воспламеняется. Пределы воспламенения при увеличении температуры смеси значительно расширяются, т.е. если смесь не горит в холодном состоянии, то может легко загореться в случае ее подогрева. Знание пределов воспламенения позволяет судить о возможности взрыва газовоздушной смеси и принимать меры к предотвращению взрывов при разжигании печей, ремонтных работ на газопроводах и т.д.

Процесс горения, возникающий в результате местного воспламенения, распространяется по всей массе смеси топлива и воздуха с определённой скоростью, благодаря передаче тепла теплопроводностью от зоны горения к ещё не воспламенившейся части смеси. Эта скорость называется скоростью распространения пламени, которая зависит от теплоты сгорания топлива, теплопроводности, теплоёмкости, начальной температуры смеси газа и воздуха, температуры воспламенения топлива и средней температуры продуктов горения. Большое влияние на скорость горения оказывает избыток или недостаток воздуха в газовоздушной смеси и температура подогрева смеси. Так увеличение температуры подогрева смеси приводит к увеличению скорости горения. Скорость распространения пламени необходимо учитывать при конструировании газовых горелок с внутренним смешением газа и воздуха.

Горение топлива протекает нормально лишь при определённых условиях: достаточном количестве воздуха, поступающего в очаг горения, и поддержания температуры горения. Чем меньше избыток воздуха при горении, тем меньше образуется продуктов горения, а следовательно, выше температура и

интенсивнее теплопередача. Различают два вида горения топлива: полное и неполное.

Таблица № 3

Концентрационные пределы воспламенения смесей горючих газов с воздухом  
(без предварительного подогрева)

Газ	Предельное содержание горючего газа в %	
	Нижнее	Верхнее
Водород	4,1	75
Окись углерода	12,5	75
Метан	5,3	14
Коксовый газ	5,6	30,4
Природный газ	4	13

Полным горением называют процесс, при котором горючие составляющие топлива сгорают и выделяют при этом тепло полностью.

Количество воздуха, необходимое для полного горения топлива, называется теоретическим расходом воздуха. Однако на практике расход воздуха, необходимый для полного горения топлива, всегда превышает теоретический.

Неполным горением называется процесс, при котором горючие составляющие топлива сгорают неполностью с образованием окиси углерода (CO), а при содержании CO от 3% и более появляется водород (H<sub>2</sub>). Неполное горение топлива может являться следствием не только недостатка воздуха, но и плохого его перемешивания с топливом [2,7].

## Лекция № 2

### План лекции:

*Расчет горения топлива. Сжигание жидкого топлива. Сжигание газообразного топлива.*

При расчёте горения топлива определяются: теплота сгорания топлива; количество воздуха, необходимого для сжигания единицы топлива; количество и состав продуктов горения (дымовых газов); температура горения топлива.

Таблица № 4

Теоретические температуры горения топлива в зависимости от условий его сжигания.

Вид топлива и коэффициент расхода воздуха $\alpha$	Теоретическая температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) при подогреве воздуха		
	0	200	400
Мазут	1,1	1840	1960
	1,2	1825	1930
	1,3	1800	1890
Природный газ	1,05	1020	2020
	1,1	1860	1970
	1,2	1740	1880

Теплоту сгорания топлива можно определить по эмпирическим зависимостям. Для твёрдого и жидкого топлива теплота сгорания обычно определяется по формуле Д.И.Менделеева (1). Для газообразного топлива по формуле (2).

Наименьшее количество воздуха, необходимое, согласно расчета, для полного сгорания единицы топлива данного состава, называется теоретическим расходом воздуха. Теоретическое количество воздуха приближённо можно определить в зависимости от теплоты сгорания данного топлива по формулам [1]:

для твёрдого и жидкого топлива:

$$L_m = 1.01 \cdot 10^{-3} Q_n^p + 0.5 \quad (1)$$

$$L_m = 8.5 \cdot 10^{-4} \cdot Q_n^p + 2.0$$

для газообразного топлива:

$$L_m = 1.09 \cdot 10^{-3} \cdot Q_n^p - 0.25 \quad (2)$$

Однако достигнуть полного сгорания топлива с теоретически необходимым количеством воздуха достаточно трудно и поэтому при горении топлива приходится вводить воздуха больше, чем это требуется теоретически. Избыток воздуха необходим для лучшего смешения топлива с воздухом, так как чем лучше смешение топлива с воздухом, тем полнее и быстрее протекает процесс горения, а следовательно, и больше выделится тепла в единицу времени, и тем выше температура.

Отношение действительного количества воздуха  $L_o$ , введённого в нагревательное устройство, к теоретическому количеству воздуха  $L_m$  называется коэффициентом избытка воздуха и обозначается  $\alpha_o$ .

Коэффициент избытка воздуха зависит от агрегатного состояния топлива, конструкции топливосжигающего устройства (горелки или форсунки) и температуры воздуха и топлива. Газообразное топливо легче перемешивается с воздухом, чем жидкое и твёрдое топливо. Поэтому при сжигании жидкого и твёрдого топлива требуется больший избыток воздуха. Для газообразного топлива коэффициент избытка воздуха составляет 1,05 – 1,15; для жидкого – 1,15 – 1,35; для твердого – 1,3 – 1,6. Зная теоретически необходимое количество воздуха и значение коэффициента избытка воздуха, легко определить действительный расход воздуха.

Количество продуктов горения (дымовых газов) можно приближённо определить в зависимости от теплоты сгорания топлива и теоретического расхода воздуха по формулам [1]:

для твёрдого и жидкого топлива:

$$V_2 = 8.9 \cdot 10^{-4} Q_n^p + (\alpha_o - 1)L_m + 1.65 \quad V_2 = 1.11 \cdot 10^{-3} \cdot Q_n^p + (\alpha_o - 1)L_m$$

для газообразного топлива:

$$V_2 = 1.14 \cdot 10^{-3} \cdot Q_n^p + (\alpha_o - 1)L_m + 0.25$$

Продукты горения представляют собой смесь сухих газов и водяных паров. Объём сухих газов представляет собой сумму объёмов продуктов горения каждой горючей составляющей топлива и объёма избыточного количества воздуха.

Температура горения любого топлива непостоянна и изменяется в зависимости от условий горения: количества подводимого воздуха, температуры воздуха и топлива, участвующих в горении, качества подготовки топлива. Принято различать три температуры горения топлива: *калориметрическую, теоретическую и действительную.*

Калориметрической называется температура, до которой нагревались бы продукты полного сгорания, если бы всё тепло топлива и воздуха пошло только на их нагревание, т.е. температура, получающаяся при горении без потерь. Калориметрическая температура горения топлива определяется по формуле [1]

$$t_k = \frac{Q_n^p + q_m^\phi + q_g^\phi}{C_z V_z};$$

где  $q_m^\phi = C_m t_m$  – физическое тепло топлива;

$q_g^\phi = C_g t_g L_0$  – физическое тепло воздуха;

$C_m; C_g; C_z$  – физическое теплосодержание топлива и воздуха при температуре подогрева и средняя теплосодержание дымовых газов соответственно

Теоретическая температура получается тогда, когда учитываются потери теплоты на частичную диссоциацию  $CO_2$  и  $H_2O$  в продуктах сгорания, т.е. теоретическая температура представляет собой температуру, до которой нагрелись бы продукты сгорания, если бы на нагрев пошло всё тепло, введённое в топку, за вычетом потерь от химического недожога [7]. Действительной температурой называется температура в рабочем пространстве печи, т.е. температура соответствующая горению в реальных условиях. Связь действительной температуры с калориметрической даёт пирометрический коэффициент [11]

$$t_n = \eta t_k$$



где  $\eta$  – пирометрический коэффициент.

Величина пирометрического коэффициента зависит от конструкции и режима работы печи и имеет значения 0,6 – 0,8 [3].

Из вышеприведённых формул, очевидно, что для увеличения температуры горения топлива необходимо подогревать воздух и топливо. На увеличение температуры горения существенно влияет применение совершенных топливосжигающих устройств, исключающих недожог топлива.

### ***Сжигание жидкого топлива***

При использовании топлива в нагревательных устройствах применяют два способа его сжигания: слоевой и факельный.

Слоевое горение происходит при сжигании твердого топлива, когда его слой продувает воздух в топке пламенной печи.

Факельное горение характерно для жидкого и газообразного топлива, когда смесь топлива с воздухом вдувается в топку и сгорает в зоне, имеющей форму факела. Факел представляет собой горящую струю газа, имеющую геометрическую форму и определенную направленность. Когда поперечные размеры рабочего пространства печи достаточно велики по сравнению с размерами факела, факел называется свободным. Если стенки рабочего пространства ограничивают развитие поперечных размеров факела, то такой факел называется ограниченным.

Процесс сжигания жидкого топлива (мазута) состоит из pulverизации, испарения и термического разложения жидкого топлива, смешения полученных продуктов с воздухом, воспламенения смеси и собственного горения.

Задача pulverизации (распыления) заключается в увеличении поверхности соприкосновения жидкости с воздухом, т.е. если над поверхностью движется воздушный поток, то вследствие трения между поверхностью жидкости и воздуха происходит отрыв отдельных частичек жидкости от основной ее массы. Однако это может происходить при

определенной скорости движения воздушного потока и чем выше скорость, тем интенсивнее будет протекать отрыв частичек жидкости с поверхности.

Распыленный таким образом мазут в виде конусообразного потока вбрасывается в рабочее пространство печи. Этот поток, состоящий из смеси мельчайших капелек мазута с воздухом, за счет теплоты в рабочем пространстве, быстро прогревается, мазут испаряется. Чем тоньше произведено распыление мазута, тем интенсивнее будет его испарение.

Слой продуктов испарения мазута воспламеняется, и возникает зона горения, которая образует факел. Факел представляет собой путь горения топлива, поэтому его длина определяется произведением средней скорости движения горящих частиц топлива на время их горения. Скорость движения горящих частиц зависит от аэродинамических свойств факела, которые определяются диаметром сопла форсунки и скоростью распыления.

Для распыления мазута, перемешивания его с воздухом и подачи смеси в рабочее пространство печи используют специальные устройства - форсунки. При тонком распылении мазута и интенсивном перемешивании его капель с воздухом происходит горение мазута с образованием факела небольшой длины. При грубом распылении и плохом перемешивании, образовавшиеся крупные капли мазута не успевают испариться, в результате по мере прогрева наблюдается термический распад углеводородов, входящих в состав мазута. Это приводит к образованию сажистого углерода в форме хлопьев, которые медленно сгорают, что приводит к замедлению горения, увеличению длины факела, потерям от химической неполноты горения (копящее пламя) и понижению температуры в рабочем пространстве печи.

Форсунки распыляют жидкое топливо (мазут) сжатым воздухом или паром. Воздушные форсунки в зависимости от степени давления воздуха делятся на форсунки низкого и высокого давления.

Применяют также механические форсунки, в которых мазут подается под давлением, и распыливание производится за счет энергии давления мазута и центробежных сил. Принципиальные схемы форсунок показаны на рис. 1 и 2.

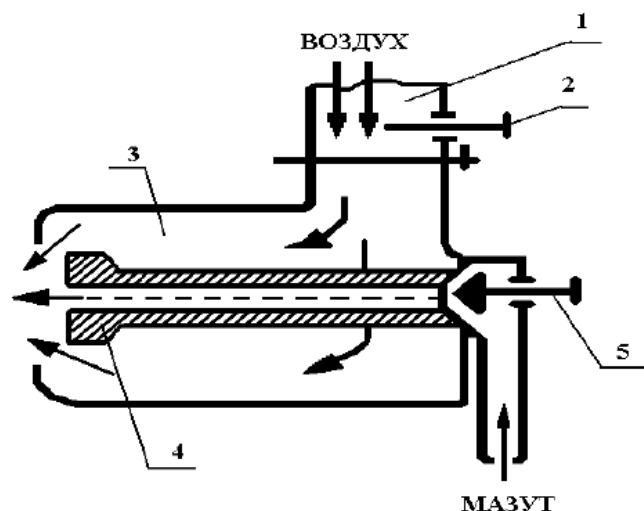


Рис.1 Форсунка с регулируемым грибовидным соплом: 1 – воздухопровод подогретого воздуха, 2 – шибер подачи воздуха, 3– корпус форсунки, 4 – мазутное сопло, 5 – вентиль подач мазута.

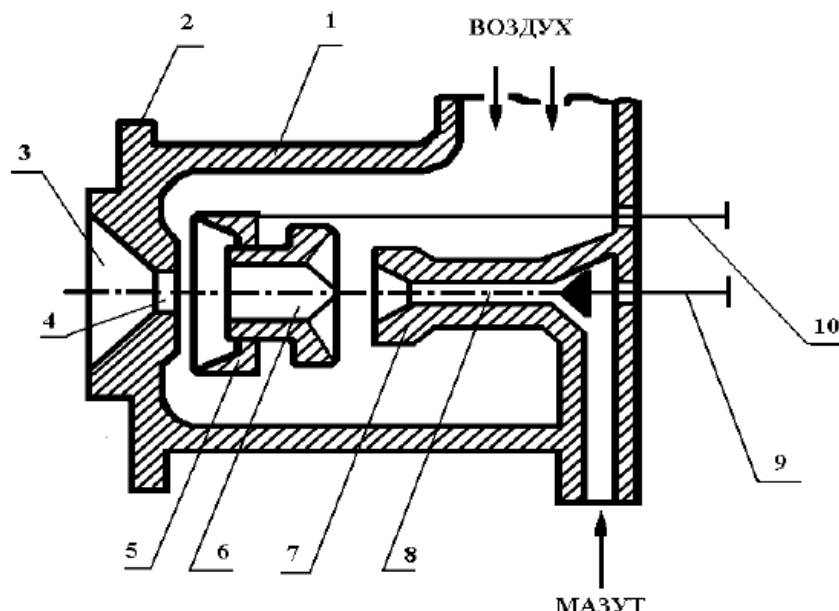


Рис.2. Двухступенчатая форсунка: 1–корпус, 2–фланец крепления, 3–конический выход, 4– смеситель второй ступени, 5– шайба регулировки подачи воздуха, 6– мазутное сопло, 7– смеситель первой ступени, 8–распылитель первой ступени, 9– вентиль, 10– тяга перемещения регулировочной шайбы

К форсункам низкого давления относятся форсунки, работающие с давлением 3 – 6 кПа. Скорость истечения воздуха из сопла форсунки колеблется от 60 до 75 м/с. Масса воздуха, подаваемого в форсунку, должна соответствовать количеству воздуха, требуемого для горения топлива. Для

правильного сжигания мазута форсунка должна сохранять постоянную скорость распыления при разных режимах работы, обеспечивать хорошее смешение мазута с воздухом и высокое использование энергии воздушного потока. Эти основные положения заложены в многочисленных конструкциях форсунок низкого давления.

К форсункам высокого давления относятся форсунки, работающие с давлением пара 500 – 1500 кПа и давлением компрессорного воздуха 600 - 800 кПа. Существенное различие между форсунками высокого и низкого давления заключается не только в давлении распылителя, но и в количестве воздуха, расходуемого на распыление. В форсунках высокого давления благодаря большой и постоянной скорости распыления, достигающей до 300 м/с, расход воздуха для распыления значительно меньше, чем форсунок низкого давления и составляет 8 – 12% от количества воздуха необходимого для горения.[3]. Остальной воздух (вторичный) необходимый для горения, инжектируется (подсасывается) из атмосферы или подается вентилятором. Использование форсунок высокого давления позволяет вторичный воздух подогревать до более высокой температуры, что способствует улучшению процесса горения.

Обилие конструкций форсунок затрудняет их выбор. При выборе форсунок необходимо придерживаться основного положения для нагрева металла - не нагревать металл факелом. Выполнения этого условия при нагреве в кузнечных печах легче добиться, применяя форсунки низкого давления. В больших печах, имеющих форкамеру, хорошие результаты в работе показывают форсунки высокого давления.

Сложность процесса распыления не дает возможности производить точный расчет форсунок. Размер выходного отверстия воздушной насадки соответственно количеству распыливающего воздуха и скорости его истечения приближенно определяется по формулам [1]:

для форсунки низкого давления:

$$d = \kappa \sqrt{\frac{Qa}{p}}$$

для форсунок высокого давления:

$$d = 1,49 \sqrt{\frac{Q}{p_o}}$$

где  $Q$  – расход мазута;

$p$  – давление воздуха в форсунке;

$a$  – отношение количества воздуха, идущего на распыление к общему количеству воздуха, идущего на горение;

$\kappa$  – коэффициент производительности равный 35 для простых форсунок и 38 для форсунок с внутренним распылением;

$p_o$  – абсолютное давление.

### *Сжигание газообразного топлива*

Газообразное топливо является наиболее удобным для сжигания в нагревательных устройствах, так как лёгкая смешиваемость газа с воздухом и возможность подогрева создают наиболее благоприятные условия для горения. Газообразное топливо сжигается факельным способом. На рисунках 3,4,5 представлены схемы горелок для сжигания газообразного топлива.

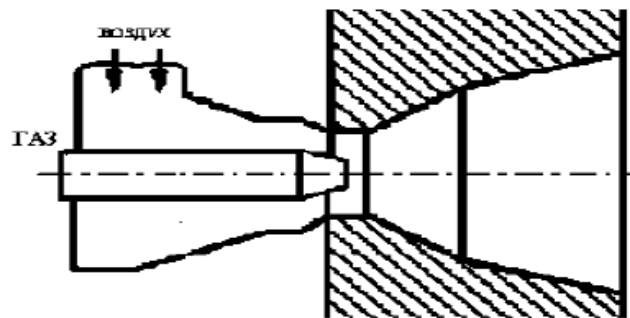


Рис.3. Газовая горелка внутреннего смешивания

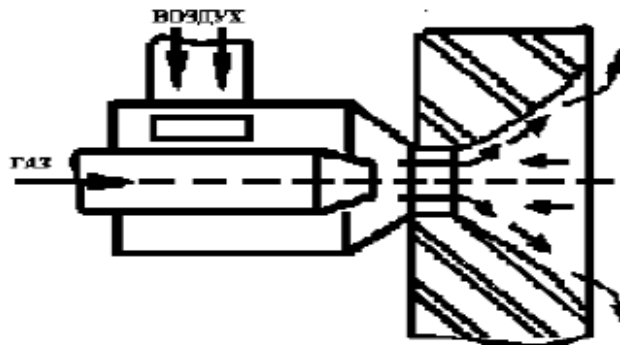


Рис.4. Газовая горелка предварительного смешивания

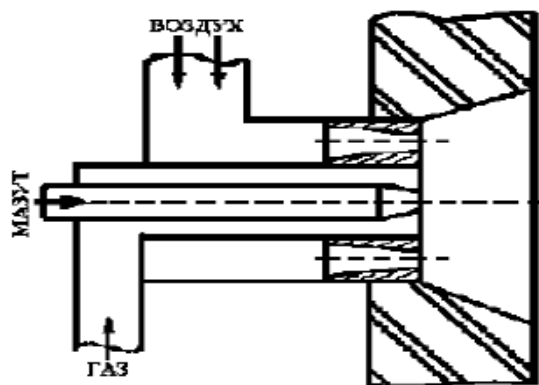


Рис.5. Газомазутные горелки

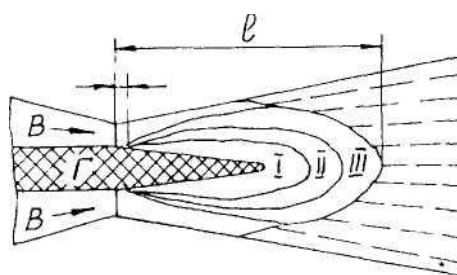


Рис. 6. Схема факела для газообразного топлива [6]

В – воздух; Г – газ; I,II,III – зоны продуктов горения.

Струя газа, вытекающая из сопла, перемешивается со струёй воздуха и превращается в зоне I в смесь газа с воздухом. Эта смесь в зоне II нагревается до температуры воспламенения. В зоне III происходит процесс активного горения. Зона горения обычно отрывается от сопла горелки на какое-то расстояние  $a$ , связанное со временем прогрева смеси до температуры воспламенения. Конфигурация и длина факела зависит в основном от условий перемешивания. Чем интенсивнее протекает процесс перемешивания газа с воздухом, тем короче и горячее факел.

Способы сжигания газа зависят от особенностей их поведения в процессе горения. По этому признаку газы делятся на теплоустойчивые и теплонеустойчивые.

К теплоустойчивым газам относятся газы, содержащие водород и окись углерода (генераторный газ). Благодаря теплоустойчивости водорода и окиси углерода такие газы сохраняют свою молекулярную структуру в процессе

горения, т.е. не подвергаются распаду на атомарный водород, углерод и кислород.

Отношение газа к той или иной группе существенно влияет на развитие процесса горения в целом и определяет технику сжигания и конструкцию горелки. Так, при сжигании теплоустойчивого природного газа при раздельном подводе газа и воздуха в рабочее пространство печи горение протекает только в местах контакта газового и воздушного потоков, т.е. горение протекает недостаточно быстро. При этом метан, со держащийся в газе, прогреваясь, подвергается распаду на водород и углерод. Последний выделяется в виде мелких частичек (сажистый углерод), которые, нагреваясь до высокой температуры, способствуют образованию ярко светящегося непрозрачного пламени. Такой процесс называется пламенным горением.

При предварительном смешении природного газа с воздухом, т.е. когда в рабочее пространство печи поступает газоздушная смесь, наблюдается беспламенное горение, так как в этом случае горение протекает одновременно во всём объёме смеси, без распада метана, практически мгновенно, заканчиваясь у устья горелки, и пространство печи заполняется раскалёнными прозрачными продуктами горения с высокой температурой.

Если сжигается теплоустойчивый газ, то независимо от способа смешения газа с воздухом наблюдается беспламенное горение.

Между этими крайними положениями (пламенное и беспламенное горение), определяющими характер горения, могут быть промежуточные положения, обусловленные составом сжигаемого газа и качества смешения газа с воздухом, при этом пламя будет различной степени светимости (прозрачности) [7].

Процесс сжигания газообразного топлива осуществляется с помощью специальных устройств - горелок, которые можно классифицировать по двум признакам:

- по месту смешения газа и воздуха;
- по давлению газа.

В зависимости от места смешения газа с воздухом горелки могут быть:

- внешнего смешения, когда в рабочее пространство поступают отдельные потоки газа и воздуха и смесеобразование происходит вне горелки;
- внутреннего смешения, когда смесеобразование происходит или полностью внутри горелки или частично;
- предварительного смешения в специальных смесителях до поступления в горелку.

По давлению газа горелки могут быть низкого и высокого давления. Горелки с внешним и внутренним смешением газа и воздуха относятся к горелкам низкого давления. В них газ подается под давлением до 0,02 ат, а воздух – до 0,03 ат.

Горелки с предварительным смешением газа с воздухом относятся к горелкам высокого давления. Они работают с давлением газа до 1,5 ат.[6].

Горелки с внутренним смешением газа и воздуха дают короткий факел и поэтому их иногда называют беспламенными. Горелки с внешним и предварительным смешением газа и воздуха дают сравнительно длинный факел – их называют пламенными.

Выбор горелки для сжигания газообразного топлива обуславливается взаимосвязью технологических, эксплуатационных и экономических условий. При проектировании нагревательных печей обычно выбирают форсунки и горелки, используя нормализованные их ряды по каталогам [4, 14]. В настоящее время запрещается использование топливосжигающих устройств, не прошедших государственное испытание.

### **Лекция № 3**

#### **План лекции:**

*Движение газов в рабочем пространстве. Отвод дымовых газов из нагревательного устройства. Основные способы передачи тепла. Теплообмен в рабочем пространстве печи. Движение газов в рабочем пространстве нагревательного устройства*



При сжигании топлива образуются продукты горения (дымовые газы), которые являются основными теплоносителями. От характера их движения зависят распределение температуры и давления в рабочем пространстве нагревательного устройства, интенсивность теплообмена, т.е. характер движения дымовых газов во многом определяет степень полезного использования тепла, качество нагрева металла и производительность нагревательного устройства [1]. Таким образом, горение топлива и движение дымовых газов – это основные факторы, от которых зависит тепловая работа нагревательного устройства. Движение газов в нагревательных устройствах может быть свободным (естественным) и вынужденным.

Свободное движение газов в печах происходит на основе разности удельных весов газов вследствие разности температур в различных точках рабочего пространства. Свободное движение газов наблюдается преимущественно в печах с самотягой, работающих на твердом топливе, т.е. когда воздух подается из атмосферы под колосниковую решетку естественным напором [6]. Чем больше разность температур в отдельных частях печной системы, тем больше геометрические напоры и тем интенсивнее движение газов. Схема печной установки со свободным движением газов, работающая на твердом топливе, показана на рис. 7

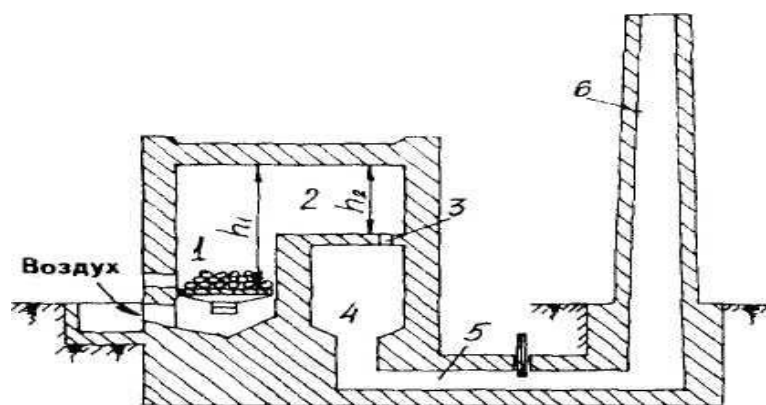


Рис.7. Схема печной установки с естественным движением газов

При работе печи все рабочее пространство заполнено продуктами горения топлива, которые непрерывно движутся из топки 1 в рабочую камеру 2, отсюда через каналы 3 в подподовую камеру 4 и по дымоходу 5 через трубу 6 в

атмосферу. Такое движение газов возникает благодаря напору, который образуется столбами газов за счет разности их температур и высот. Для нормальной работы печи необходимо полное равномерное заполнение ее рабочей камеры, что во многом зависит от правильного расположения каналов. Если в самом нагревательном устройстве движение газов происходит за счет естественного напора, то за печью в дымоходе движение дымовых газов происходит за счет разряжения, создаваемого дымовой трубой. Тяга создается дымовой трубой вследствие того, что горячие газы в ней легче окружающего атмосферного воздуха и поэтому поднимаются по трубе вверх и выбрасываются в атмосферу; внизу трубы это вызывает разряжение, которое будет тем больше, чем выше труба и температура дымовых газов [6].

Однако в большинстве современных нагревательных устройств происходит принудительное (вынужденное) движение газов, создаваемое струями, выходящими из горелок (форсунок), а также разностью давлений газов, которая создается вентилятором, дымовой трубой или дымососом.

Вынужденное движение газов отличается от свободного не только по причинам, вызывающим его, но и по своему режиму и форме. При малых скоростях газовый поток состоит как бы из отдельных струек, движущихся параллельно друг другу. Такое движение называется ламинарным. Наблюдается оно при свободном движении газов в печах и сопровождается незначительным смешением газовой среды за счет диффузии. При больших скоростях движение становится беспорядочным, вихреобразным и называется турбулентным. При турбулентном режиме смешение протекает энергично не только за счет диффузии, но и турбулентности.

При вынужденном движении газов атмосфера рабочего пространства нагревательного устройства приобретает движение, интенсивность которого зависит от соотношения размеров рабочей камеры и струи, направления ее, расположения горелок (форсунок), скорости струи.

При большом объеме рабочей камеры нагревательного устройства, когда размеры (поперечное сечение) струи газов невелики по сравнению с камерой,

наблюдается резко очерченная форма струи. При выходе струи из горелки (форсунки), по мере ее удаления от сопла, скорость струи уменьшается, а площадь поперечного сечения увеличивается. Такое изменение, происходящее со струей, объясняется действием сил трения поверхностного слоя движущегося потока с окружающей неподвижной средой. Скорость истечения струи по ее сечению неодинаковая. Внешний слой движется с меньшей скоростью. Вследствие этого внешние слои будут отставать от струи и перемещаться к месту ее выхода из сопла, т.е. туда, где возникает пониженное давление. Атмосфера нагревательного устройства приобретает движение, интенсивность которого зависит от соотношения размеров рабочей камеры и струи. Таким образом, размеры рабочей камеры должны быть такими, чтобы вся атмосфера печи была в движении.

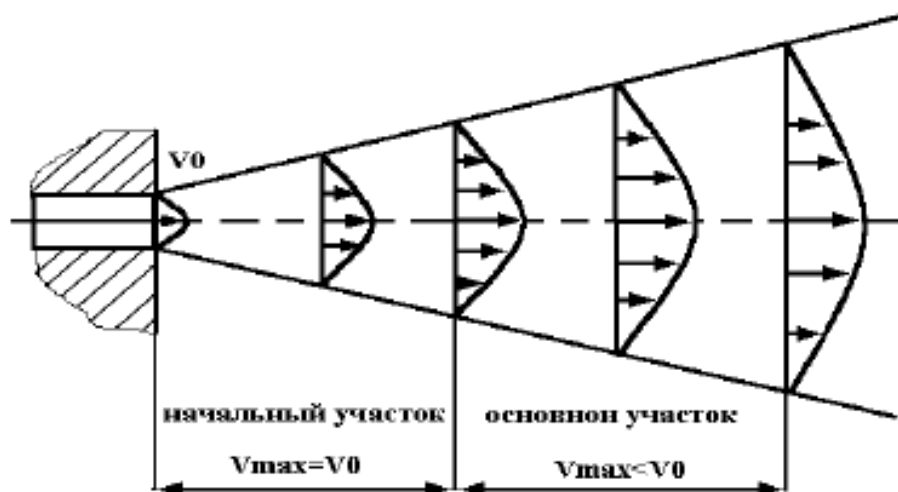


Рисунок 8 - Схема движения газов в свободном пространстве

Важное значение для более интенсивного движения газов печной атмосферы имеет расположение горелок (форсунок). На рис. 9 показаны возможные варианты расположения горелок (форсунок).

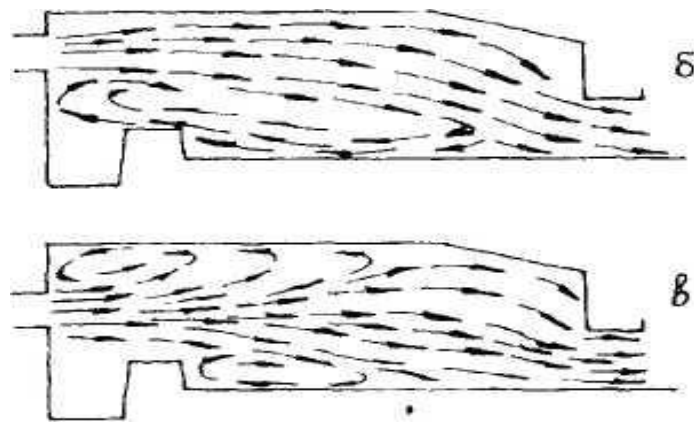


Рис.9 Схема движения газов в зависимости от расположения горелок или форсунок

При низком расположении горелок (форсунок) будет происходить неравномерный нагрев металла вследствие прямого действия факела. При высоком расположении горелок (форсунок) (см. рис.9,б) газовый поток не нагревается полностью, так как уходит прямо в дымоход, и происходит повышенное разрежение на поду печи и, следовательно, подсос холодного воздуха. Рациональным расположением горелок (форсунок) является их расположение посередине высоты рабочего пространства печи (см. рис.9,в).

На движение атмосферы в рабочем пространстве нагревательного устройства оказывает, и скорость истечения струи. Чем выше скорость истечения струи, тем интенсивнее ее циркуляция. Однако с увеличением скорости струи резко повышается разность давлений по длине рабочей камеры, а это может привести к отрицательному давлению на поду печи.

Как показывает практика, для хорошей работы печи необходимо, чтобы давление на поду печи было несколько выше атмосферного, т.е. печь работала с "положительным давлением", а давление на поду печи растет пропорционально скорости истечения струи. Таким образом, давление на поду печи можно регулировать скоростью истечения струи.

В нагревательных устройствах с рабочими камерами относительно небольшого объема движение газов резко изменяется, так как на близком расстоянии от сопла форма струи быстро нарушается, и общая картина установившегося движения печной атмосферы не поддается расчёту.

### **Отвод дымовых газов из нагревательного устройства**

В основе динамики газов лежат уравнения неразрывности потока газа и движения газов. Уравнение неразрывности для двух любых сечений потока газа имеет вид [6]:

$$\rho_1 F_1 \omega_1 = \rho_2 F_2 \omega_2;$$

где  $\rho_1; \rho_2$  – плотность газа в 1-м и 2-м сечениях;

$F_1; F_2$  – площади сечений;

$\omega_1; \omega_2$  – скорости истечения газового потока.

Если пренебречь изменением плотности газа и принять приближённо, что плотность газа для двух сечений потока равна, то согласно закону неразрывности движения произведение площади поперечного сечения на среднюю скорость потока есть величина постоянная и равная расходу:

$$F_1 \omega_1 = F_2 \omega_2 = V_c = Const;$$

где  $V_c$  – секундный расход газовой среды.

Тогда средняя скорость движения газа в любом сечении потока будет равна [7]:

$$\omega_{cp} = \frac{V_c}{F}$$

Таким образом, закон неразрывности потока газа связывает два параметра движения: площадь поперечного сечения и скорость. Однако в переменном сечении изменяется и давление. Для расчёта необходимого давления в рабочем пространстве нагревательного устройства при движении газов в нём с относительно небольшой скоростью применимо уравнение движения для потока реального газа (уравнение Бернулли): [1]

$$Z_1 \rho + P_1 + \frac{\omega_1^2 \rho}{2q} = Z_2 \rho + P_2 + \frac{\omega_2^2 \rho}{2q} + h_{nom}$$

где  $Z_1 \rho; Z_2 \rho$  – геометрические напоры, выражающие энергию положения, отнесенную к 1 м<sup>3</sup> движущегося газа, для первого и второго сечения каналов;  $P_1; P_2$  – статические или пьезометрические напоры, выражающие энергию давления;

$\frac{\omega_1^2 \rho}{2g}, \frac{\omega_2^2 \rho}{2g}$  – динамические или скоростные напоры, выражающие кинетическую энергию;

$h_{nom}$  – потеря напора на преодоление сопротивлений движению газов на пути от первого до второго сечения канала.

Приведенное уравнение может быть применено только для участков с относительно небольшим изменением температуры.

Потерянный напор определяется как сумма потерь напоров на трение газа о стенки канала, местные сопротивления (потери давления на поворотах, в сужениях и расширениях, шиберах, заслонках и т.д.), а также геометрический напор:

$$h_{nom} = h_{mp} + h_{mc} + h_z$$

Потери давления на трение по длине прямолинейного участка равны разности потенциальной энергии в начальном и конечном сечениях, образующейся вследствие трения о стенки канала. Эти потери прямо пропорциональны длине участка, скоростному напору и плотности газа и обратно пропорциональны гидравлическому диаметру. Математически это выражается формулой Дарси [3]:

$$h_{mp} = \frac{\lambda \cdot L \omega^2 \rho}{d \cdot 2g}$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения, зависящий от критерия Рейнольдса и шероховатости стенок канала: для кирпичных стенок  $\lambda = 0.03 - 0.05$ , для металлических  $\lambda = 0.02 - 0.04$ ;

$L$  – длина выбранного участка;

$d$  – приведенный гидравлический диаметр канала.

Потери давления, связанные с преодолением местных сопротивлений, зависят от скоростного напора и особенностей местного сопротивления [7]

$$h_{mc} = \frac{\kappa_m \lambda L \omega^2 \rho_o (1 + \beta t)}{d 2g};$$

где  $\kappa_m$  – коэффициент местного сопротивления;

$\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения;

$t$  – средняя температура газовой среды.

Коэффициент местного сопротивления зависит от: вида местного сопротивления, геометрических размеров, степени открытия, критерия Рейнольдса (в некоторых случаях).

Потери геометрического давления, связанные с опусканием горячих газов вниз на глубину  $H$ , определяются по формуле [7]:

$$h_z = H(\rho_g - \rho_{cp}^2)g;$$

где  $\rho_g; \rho_{cp}^2$  – соответственно плотности атмосферного воздуха и дымовых газов.

Потери давления на трение и местные сопротивления складывается в соответствии с принципом наложения потерь, т.е. потери напора в канале равны арифметической сумме обоих видов потерь.

Современные нагревательные устройства работают с принудительным движением газов, которое осуществляется давлением, создаваемым горелками или форсунками. Этого давления вполне достаточно для преодоления сопротивления движения газов. Поэтому вполне достаточно рассчитать только ту часть нагревательной установки, которая отводит дымовые газы из рабочего пространства: сечение газовых каналов в поду рабочей камеры; дымохода, где газы движутся за счет разряжения, создаваемого дымовой трубой.

Сечение газовых каналов в поду печи и сечение дымоходов определяются исходя из средней, приведенной к нормальным условиям, скорости дымовых газов по формуле:

$$f = \frac{V_c}{\omega}$$

где  $f$  – площадь сечения каналов или дымохода,  $m^2$ ;

$V_c$  – количество дымовых газов, уходящих через каналы или дымоход (секундный расход),  $m^3/c$ ;

$\omega$  – средняя приведенная к нормальным условиям скорость дымовых газов,  $m/c$ .

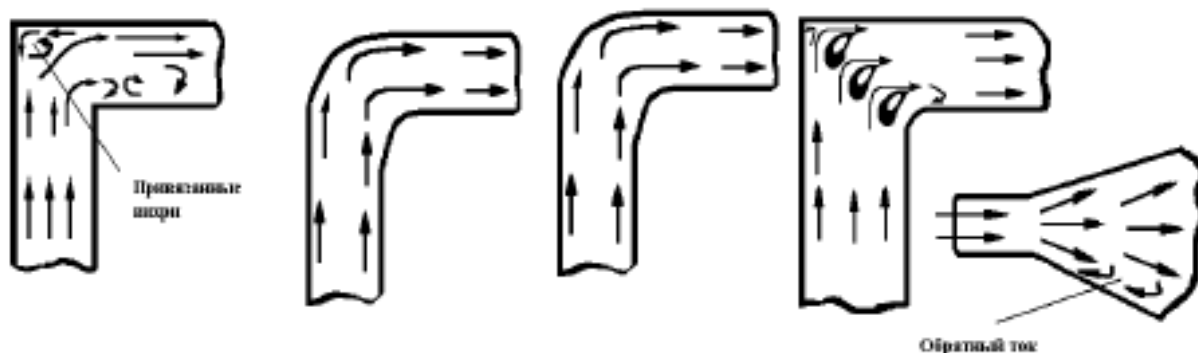


Рис.10. Движение газов в воздуховодах

При естественной тяге скорость движения дымовых газов принимают в каналах пода печи – 3...4 м/с, в дымоходах – 2...3 м/с. Сечение у основания дымовой трубы определяется исходя из скорости дымовых газов в нем, равной 2,5...3 м/с. Высоту трубы в первом приближении принимают равной 2-ти диаметрам трубы у основания или определяют по формуле Ланге [1]:

$$H = 15 \sqrt{\frac{4 \cdot f_o}{\pi}} + 10 \text{ м}$$

где  $f_o$  – площадь поперечного сечения трубы у основания.

Однако труба должна быть высотой не менее 16 м. Дымовые трубы могут быть кирпичные, металлические, железобетонные. Кирпичные трубы имеют конусообразную форму (диаметр у устья трубы в 1,5 раза меньше диаметра у основания). Они более долговечные, но и более дорогие. Высота дымовых труб для нагревательных печей обычно равна 30 – 70 м в зависимости от мощности печи. Основное назначение дымовой трубы – создать разрежение (тягу), необходимое для отвода продуктов горения топлива. Зная высоту трубы и пользуясь уравнением Бернулли, при условии, что температура в трубе постоянна и равна среднему значению температуры дымовых газов внизу и вверху трубы, определяем разрежение, создаваемое трубой, по формуле [1]:

$$\Delta P = H_{mp} (\rho_g - \rho_{cp}) - \frac{\omega_2^2 \rho_{cp}^2}{2g} + \frac{\omega_1^2 \rho_{cp}^2}{2g} - h_{nom};$$

Как видно из формулы, основное влияние на величину тяги оказывают высота трубы и разность плотностей воздуха и дымовых газов.



Если дымовая труба отводит дымовые газы от нескольких печей, то ее расчет производится по наибольшему необходимому разрежению, а не по сумме разрежений всех печей.

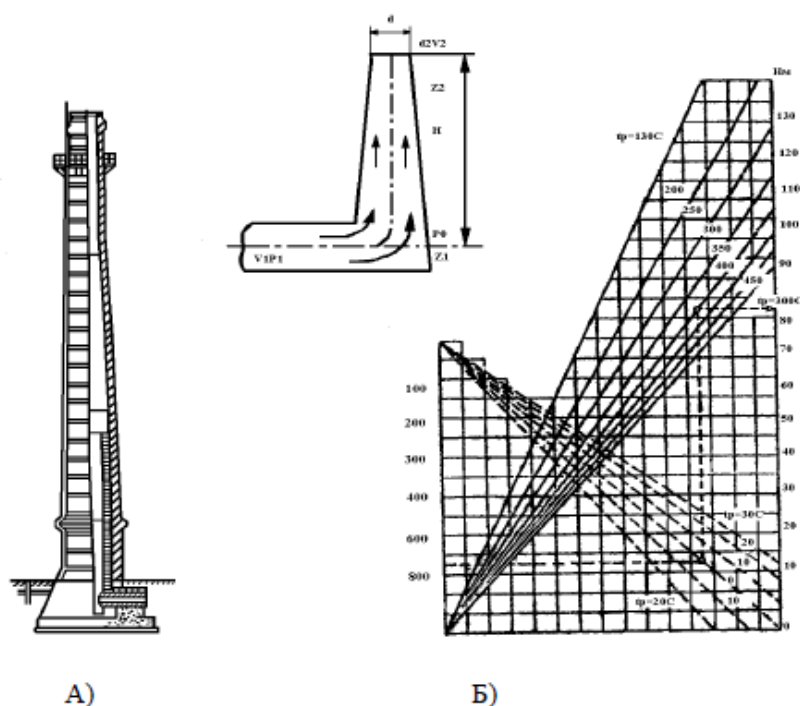


Рис. 11 – Схема движения газов в дымовой трубе; А. Кирпичная дымовая труба: 1-фундамент; 2-заземление; 3-ствол; 4- стяжные кольца; 5-токоотводящий кабель; 6-светофорная площадка; 7-мониеприемник; 8-футеровка; 9-подводящий боров, Б. График для определения высоты  $H$  дымовой трубы ( $\Delta h$  –разрежение). Температура продуктов горения по высоте

Разрежение, создаваемое дымовой трубой, оказывает существенное влияние на производительность нагревательного устройства. Так как для нагрева металла требуются определенные затраты топлива, то дымовой путь должен иметь определенную пропускную способность. Дополнительно повысить производительность печи можно в том случае, когда печь имеет запас тяги. Поэтому действительное разрежение, которое должна создать труба, принимается выше расчетного на 10-20 %.

В отдельных случаях для отвода дымовых газов от нагревательных устройств применяют искусственную тягу, которая может быть прямой или косвенной. В этом случае высота трубы не играет большой роли.

При прямой тяге дымовые газы из дымохода засасываются непосредственно вентилятором (дымососом) и выбрасываются в рядом стоящую дымовую трубу.

При косвенной тяге в дымовую трубу через коническую насадку вдувается вентилятором воздух. Благодаря конической насадке воздух поступает в трубу с большой скоростью, увлекая за собой дымовые газы. Искусственная тяга обычно применяется в тех случаях, когда дымовая труба не дает нужного разряжения.

### ***Основные способы передачи тепла***

Процесс теплопередачи, т.е. процесс распространения в пространстве тепловой энергии является одним из основных процессов, происходящих в нагревательных устройствах. Распространение тепловой энергии связано с распределением температуры в пространстве или с температурным полем. Температурное поле может изменяться не только в пространстве, но и во времени. Такое поле называется нестационарным или неустановившимся.

Тепло, как и всякий вид энергии, распространяется в направлении от более высокого потенциала к более низкому. Количество тепла, которое передаётся в температурном поле в каком-либо направлении, называется тепловым потоком и имеет размерность Вт /м.

Процессы теплопередачи и теплообмена, происходящие в природе вообще и в нагревательных устройствах в частности, очень сложны. С целью упрощения их изучения введено понятие о трёх видах теплопередачи: излучением, конвекцией и теплопроводностью, каждый из которых имеет свою природу и механизм переноса тепла.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения тепла посредством передачи энергии электромагнитными волнами через газовую среду или вакуум.

Конвекцией называется перенос теплоты от более нагретого тела к менее нагретому в результате движения теплоносителя (дымовых газов, воздуха,

жидкости). Интенсивность теплообмена конвекцией зависит от скорости и характера движения теплоносителя.

Теплопроводность – это процесс передачи тепла от более горячей части тела к более холодной за счёт увеличения интенсивности тепловых колебаний менее нагретых частиц тела при их взаимодействии с более нагретыми частицами.

Тепловое излучение свойственно всем телам и каждое из них излучает энергию в окружающее пространство. При попадании на другие тела эта энергия частично поглощается, частично отражается и частично проходит сквозь тело. Часть лучистой энергии, которая поглощается телом, снова превращается в тепловую энергию. Энергия, которая отражается, попадает на другие тела и поглощается ими. То же самое происходит и с той энергией, которая проходит сквозь тело. Таким образом, после ряда поглощений излучаемая энергия полностью распределяется между окружающими телами. Следовательно, каждое тело не только непрерывно излучает, но и непрерывно поглощает лучистую энергию. В результате этих процессов, связанных с двойным превращением энергии, и осуществляется процесс лучистого теплообмена.

Из всего количества попадающей на тело энергии  $Q$  часть её  $Q_A$  - поглощается, часть  $Q_K$  – отражается и часть  $Q_o$  проходит сквозь тело. На основании закона сохранения энергии запишем [1]

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q$$

Поделив равенство на  $Q$ , получим:

$$A + R + D = 1$$

где  $A$  – поглощательная способность тела;

$R$  – отражательная способность тела;

$D$  – прозрачность тела к тепловым лучам.

В природе нет тел с абсолютными свойствами; для реальных тел значения  $A$ ,  $R$ ,  $D$  всегда больше нуля и меньше единицы. Тела, поглощательная способность которых меньше единицы ( $A < 1$ ), называются серыми.

Количество лучистой энергии, проходящей через поверхность тела в единицу времени, называется тепловым потоком или мощностью излучения ( $Q$ ). Лучистый поток, отнесённый к единице поверхности, называется плотностью излучения или излучательной способностью ( $\varepsilon$ ) т.е.

$$\varepsilon = \frac{Q}{F}$$

Согласно закону Стефана - Больцмана, энергия излучения абсолютно чёрного тела определяется по формуле [1]:

$$E_o = C_o \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

где  $C_o = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела;

$T$  – температура тела в градусах по Кельвину.

Как видно из формулы, с повышением температуры интенсивность излучения растёт весьма быстро.

Закон Стефана - Больцмана применим для определения энергии излучения и серых тел, причём вместо коэффициента излучения чёрного тела в уравнение входит коэффициент излучения серого тела  $C$ , который зависит от степени черноты данного тела.

Степенью черноты серого тела называется соотношение энергии излучения при данной температуре серого тела к энергии излучения абсолютно чёрного тела:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_o}$$

Таким образом, степень черноты показывает, какую долю от энергии излучения чёрного тела составляет энергия излучения данного тела. Газы также обладают свойствами излучать и поглощать лучистую энергию, особенно многоатомные газы ( $CO$ ;  $H_2$ ,  $O$ ;  $SO_2$  и др.), входящие в состав печной атмосферы. В отличие от твёрдых тел газы излучают и поглощают энергию не

поверхностью, а всем объёмом, так как молекулы газа находятся друг от друга на расстоянии. Излучение и поглощение газов имеет избирательный характер, т.е. поглощают и излучают энергию лишь в определённом интервале. Излучательная способность газов определяется также степенью черноты. Степень черноты газа является функцией температуры газа и произведения парциального давления на толщину газового потока. Температура и парциальное давление обычно известны из расчёта горения топлива. Эффективная толщина газового слоя определяется по формуле:

$$L_{\text{эф}} = \frac{4M}{A};$$

где:  $M$  – площадь поперечного сечения рабочей камеры печи,  $\text{м}^2$ ;

$A$  – периметр сечения рабочей камеры печи,  $\text{м}$ .

Зная степень черноты печных газов, можно определить энергию излучения газа по формуле [1]

$$Q_{\text{э}} = \varepsilon_{\text{э}} C_{\text{о}} \left( \frac{T}{100} \right)^4;$$

Конвекция всегда связана с движением теплоносителя, которое может быть вызвано либо внешними силами, либо наличием подъёмной силы, возникающей вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц. Конвективный теплообмен зависит от характера движения среды и тела, их теплофизических свойств, температуры, а также от геометрической формы канала течения или обтекаемого тела.

Теплообмен между поверхностью твёрдого тела и движущимся потоком при воздействии на поток внешних сил называется вынужденной конвекцией. Если теплообмен происходит под влиянием разности плотностей нагретых и холодных частиц, то его называют свободной конвекцией. Обычно перенос теплоты осуществляется вынужденной и свободной конвекцией. Влияние первой будет тем больше, чем больше скорость вынужденного движения.

Количество теплоты, передаваемое конвекцией, определяется по формуле Ньютона - Рихмана:

$$Q = \alpha(t_{\text{э}} - t_{\text{м}})F$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопередачи;

$t_g; t_m$  – соответственно температура газового потока и температура поверхности потока;

$F$  – поверхность тела.

Коэффициент теплопередачи – это количество тепла, передаваемое поверхностью в один час при разности температур в один градус ( $1^\circ\text{C}$ ). Значения этого коэффициента могут колебаться в широком диапазоне.

При определении количества теплоты, передаваемого конвекцией, основную трудность представляет расчёт коэффициента теплопередачи, который зависит от большого числа факторов, определяющих процесс в целом; важнейшими из них являются температурный напор, скорость движения среды и теплофизические свойства материала. Наиболее надёжным путём для определения коэффициента теплопередачи является экспериментальный метод на базе моделирования и теории подобия. Критериальное уравнение типа:

$$N_u = f(F_o; Re; Pe; G_2; P_2) \quad (3)$$

представляет собой решение задачи по определению коэффициента теплопередачи конвективного теплообмена в общем виде. В уравнении (3)  $N_u, F_o; Re; Pe; G_2; P_2$  – обобщенные числа или критерии Нуссельта, Фурье, Рейнольдса, Пекле, Грасгофа, Прандтля.

Для определения коэффициента теплопередачи часто используют и эмпирические формулы [1, 14].

Передача тепла теплопроводностью происходит главным образом в твёрдых телах, когда в них возникает разность температур. Совокупность значений температуры в рассматриваемый момент времени для всех точек объёма нагреваемого тела называется температурным полем. Температурное поле характеризуется наличием изотермических поверхностей, которые получаются при соединении всех точек тела, имеющих одну и ту же температуру. Изотермические поверхности непрерывны и не пересекаются

между собой. Наибольший перепад температуры на единицу длины происходит в направлении перпендикулярном к изотермической поверхности.

Необходимое условие распространения теплоты – наличие в теле разности температур. Плотность теплового потока, передаваемого теплопроводностью, определяется законом Био - Фурье:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx};$$

где  $\frac{dt}{dx}$  – температурный градиент, – показывает приращение температуры на единицу расстояния в направление нормали к изотермической поверхности;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности – показывает количество тепла, передаваемого в 1 час через поверхность площадью в 1 м<sup>2</sup>, через толщину в 1 м при разности температур в 1°С.

В теории теплопроводности различают два случая передачи тепла – в нестационарном (неустановившемся) и в стационарном (установившемся) потоке тепла. В нестационарном потоке тепла температура в отдельных точках изменяется во времени. В стационарном потоке тепла температура в каждой точке нагреваемого тела остаётся постоянной во времени.

Любой случай распространения тепла теплопроводностью выражается общим дифференциальным уравнением Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности.

Решение уравнения теплопроводности в каждом конкретном случае позволяет определить потребное количество тепла и продолжительность нагрева изделий различной формы, а также их температурное поле, т.е. распределение температур по толщине сечения изделия.

### ***Теплообмен в рабочем пространстве печи***

Рассмотренные три способа передачи тепла в реальных условиях нагрева металла представляют в совокупности сложный теплообмен в системе,

состоящий из дымовых газов, кладки, нагреваемого металла и зависящий от многих факторов. На рис. 12 показана схема теплообмена в нагревательном устройстве.

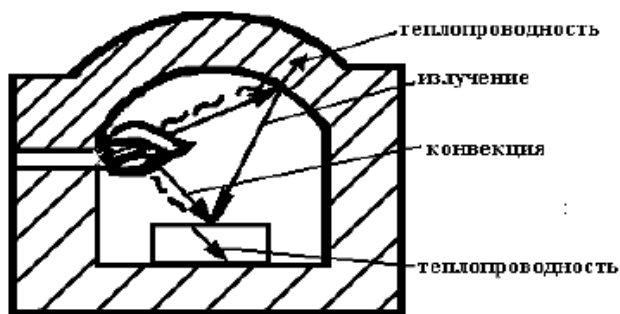


Рис. 12. Схема теплообмена в рабочей камере нагревательного устройства

Так как теплообмен в нагревательных устройствах не всегда поддается точному математическому расчёту, то допускается ряд упрощений, позволяющих приближённо определить количество тепла, воспринимаемое поверхностью нагреваемого металла. К этим допущениям относятся:

- температура газов одинакова во всём объёме рабочего пространства во времени;
- температура поверхности металла и кладки везде одинакова и постоянна;
- плотность лучистых потоков, отражённых от стен, как и от материала, равномерна по всей поверхности;
- поглощательная способность газа по отношению к собственному и отражённому излучению одинакова по всем направлениям;
- степень черноты газа относится к температуре газов, а не температуре стен или материала.

Тогда с учётом принятых допущений количество тепла, полученное поверхностью нагреваемого металла, определяется по формуле [1].

$$Q = C_{\text{г.кл.м}} \left[ \left( \frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{эф}} + \alpha_{\text{к}} (t_{\text{г}} - t_{\text{м}}) F_{\text{эф}};$$

где  $C_{\text{г.кл.м}}$  – коэффициент излучения между дымовыми газами, поверхностью кладки и поверхностью металла;



$T_{\text{г}}; t_{\text{г}}$  – температура дымовых газов, °K и °C;

$T_{\text{м}}; t_{\text{м}}$  – температура поверхности металла, K и °C;

$\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент теплопередачи конвекцией;

$F_{\text{эф}}$  – эффективная тепловоспринимающая поверхность металла.

В формуле первый член уравнения выражает количество тепла, передаваемое на поверхность металла излучением, а второй – тепло, передаваемое конвекцией.

Количество тепла, передаваемое нагреваемому металлу, можно определить по упрощенной формуле, выражающей закон излучения, сведенный к законам конвекции:

$$Q = \alpha_{\text{л+к}} (t_{\text{г}} - t_{\text{м}})_{\text{ср}} F_{\text{эф}}$$

где  $\alpha_{\text{л+к}}$  – приведенный коэффициент теплопередачи конвекцией с учетом излучения.

Для приближенного определения приведенного коэффициента теплопередачи существуют эмпирические формулы и графики. Так, при нагреве стальных заготовок в камерных печах:

$$\alpha_{\text{л+к}} = 0.09 \left( \frac{T}{100} \right)^3 + (10 \div 15);$$

в методических печах, работающих на газе:

$$\alpha_{\text{л+к}} = 50 + 0.3(t_{\text{г}} - 700)$$

В случае при сведении конвекции к законам излучения количество тепла определяется по формуле:

$$Q = C'_{\text{г.кл.м}} \left[ \left( \frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right]_{\text{ср}} F_{\text{эф}};$$

где  $C'_{\text{г.кл.м}}$  – приведенный коэффициент теплопередачи излучением с учетом конвекции.

Следует отметить, что при высоких температурах в рабочем пространстве нагреваемого устройства выше 1200°С количество тепла, передаваемое металлу излучением, составляет до 85 – 90 %. При низких температурах в рабочей

камере ниже  $700^{\circ}\text{C}$  количество тепла, передаваемого металлу конвекцией, может быть равно и даже больше количества тепла, передаваемого излучением.

## **Лекция № 4**

### **План лекции:**

*Нагрев металла. Явления, происходящие в металле при нагреве. Основные характеристики нагрева металла*

### **Нагрев металла**

Основное назначение нагрева перед ковкой и штамповкой заключается в том, чтобы изменить механические свойства металла, что будет способствовать более лучшему протеканию процессов ковки и горячей штамповки, так как пластичность металла с повышением температуры увеличивается, а сопротивление деформированию понижается примерно в 10 - 15 раз, чем при холодном деформировании. В этом заключается основное преимущество горячей обработки металлов давлением перед холодной. Поковка высокого качества получается только при правильном нагреве металла - это когда заготовка нагревается равномерно со всех сторон с определенной скоростью до определенной температуры и с минимальными потерями на угар.

### **Явления, происходящие в металле при нагреве**

Нагрев металла представляет собой сложный комплекс явлений, происходящих в металле. Он сопровождается изменением структуры, физических и механических свойств металла, окислением и обезуглероживанием, перегревом и пережогом. Рациональный нагрев металла можно выполнить только в том случае, когда известны явления, протекающие в нем при нагреве.

Изменение строения металла. Сталь и многие другие металлы и сплавы имеют кристаллическое строение, т.е. его атомы расположены в определенном

порядке, образуя пространственную атомно-кристаллическую решетку, характерную для каждого металла и сплава. В зависимости от температуры нагрева атомы могут менять свое расположение в решетке, что приводит к изменению строения, т.е. к структурным превращениям металла, обуславливающим изменение его свойств. Температура, при которой происходят структурные превращения, называется критической температурой.

В углеродистых сталях имеется две критические точки - нижняя и верхняя: нижняя соответствует температуре  $723^{\circ}\text{C}$  [12]; верхняя зависит от содержания углерода.

При нагреве стали до нижней критической точки ( $t = 723^{\circ}\text{C}$ ) атомы железа располагаются в ней, образуя объемно центрированную решетку. При нагреве стали до верхней критической точки происходит перегруппировка атомов железа с образованием гранецентрированной кубической решетки. Расположение атомов железа в пространственной решетке оказывает влияние на характер размещения углерода, что определяет структуру стали. При размещении углерода в пространственной решетке железа среди атомов углерод образует с железом твердый раствор.

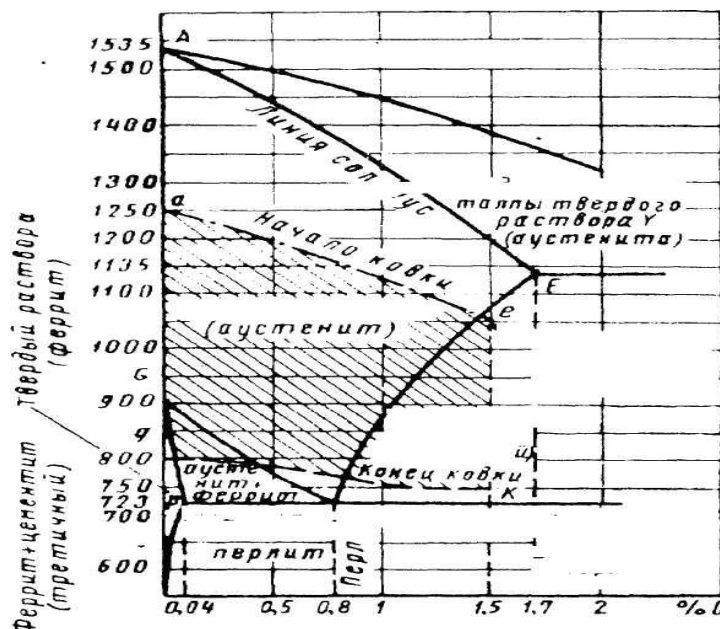


Рис.12 Диаграмма состояния железоуглеродистых сталей

Раствор углерода в  $\alpha$ -Fe называется ферритом; он пластичен и хорошо проводит тепло. Раствор углерода в  $\gamma$ -Fe называется аустенитом; он более твердый, чем феррит, но достаточно пластичен, хорошо деформируется и проводит тепло. Плотность аустенита больше феррита. Углерод может быть химически связан с железом, образуя карбид железа ( $FeC$ ), который называется цементитом. Цементит хрупкий, придаёт стали твердость и плохо проводит тепло. Смесь феррита с цементитом, состоящая из железа и 0,83 % углерода, называется перлитом.

Изменение структуры стали различного состава в зависимости от температуры определяется диаграммой состояния "железо - углерод" (рис.б).

Как видно из диаграммы, структурные превращения в углеродистых сталях при нагреве происходят в пределах температур между нижней и верхней критическими точками.

Рассмотрим изменение структуры при нагреве стали с содержанием углерода до 0,8%. Структура таких сталей состоит из перлита и феррита, которые сохраняются до температуры 723°C, при этом количественное соотношение перлита и феррита несколько изменяется (перлит в незначительном количестве при повышении температуры растворяется в феррите). При нагреве стали несколько выше нижней критической точки перлит переходит в аустенит, т.е. часть атомов железа, которые первоначально входили в состав перлита, меняют свою кристаллографическую решетку объемно центрированного куба на гранецентрированную, приобретая при этом способность растворять углерод и цементит, феррит же остается без изменений. Таким образом, при температурах, которые несколько выше нижней критической точки, структура изменяется: сталь уже состоит из аустенита и феррита. При дальнейшем нагреве феррит постепенно растворяется в аустените, т.е. происходит дальнейшее превращение  $\alpha$ -Fe в  $\gamma$ -Fe. Этот процесс заканчивается при температуре верхней критической точки. Таким образом, при

нагреве до температуры выше верхней критической точки сталь приобретает аустенитную структуру.

С увеличением углерода в стали до 0,83% температура верхней критической точки падает от 800°C до 723°C, а затем резко возрастает.

Структурные превращения стали обратимы, т.е. при охлаждении стали, они протекают последовательно в обратном порядке.

Следует отметить, что не все стали при нагреве, претерпевают структурные превращения. К таким сталям относятся стали аустенитного класса.

При нагреве сталей происходит изменение их физических свойств (параметров). К физическим параметрам, влияющим на процесс распространения тепла в заготовке относятся: теплопроводность ( $\lambda$ ), теплосодержание ( $i$ ), теплоёмкость ( $c$ ), плотность ( $\rho$ ), а также коэффициенты, составленные из этих величин - коэффициент температуропроводности ( $\alpha$ ) и коэффициент термоинерции ( $v$ ).

Коэффициент теплопроводности характеризует способность металла проводить тепло, которая связана с колебательным движением молекул, расположением атомов в кристаллической решётке и длиной свободного пути электронов. Теплопроводность чистых металлов и сплавов неодинакова. По сравнению со сплавами чистые металлы обладают большей теплопроводностью. Содержащиеся в сплавах примеси искажают расположение атомов в решётке и тем самым уменьшают теплопроводность.

У чистых металлов и углеродистых сталей теплопроводность с повышением температуры до 900°C понижается, а выше 900°C несколько возрастает. Коэффициент теплопроводности высоколегированных сталей, а также сплавов цветных металлов при повышении температуры несколько увеличивается. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в действительности очень сложная, поэтому при расчётах, в целях упрощения, её принимают прямолинейной. Коэффициент теплопроводности при какой-то температуре может быть приближенно определён по формуле [1]:

$$\lambda_t = \lambda_o \pm \epsilon t$$

где  $\lambda_o$  – коэффициент теплопроводности при  $0^\circ\text{C}$ ;

$t$  – температура,  $^\circ\text{C}$ ;

$\epsilon$  – величина, характеризующая увеличение или уменьшение теплопроводности в зависимости от температуры, отнесённая к одному градусу.

Коэффициент теплопроводности металлов и сплавов, а также их зависимость от температуры находят обычно опытным путём.

Теплопроводность оказывает большое значение на процесс нагрева. Металл нагревается тем быстрее, чем выше его теплопроводность, т.е. теплопроводность определяет скорость распространения тепла в металле, а отсюда, следовательно, продолжительность нагрева.

Теплосодержанием данного тела называется количество тепла, которое необходимо передать ему, чтобы повысить его температуру от  $0^\circ\text{C}$  до данной температуры

$$i = GC'_0 t;$$

где  $G$  – масса тела, кг;

$t$  – температура  $^\circ\text{C}$ ;

$C'_0$  – коэффициент пропорциональности, называемый средней удельной теплоёмкостью в пределах температур от  $0^\circ\text{C}$  до  $t$ .

При бесконечно малой разности температур  $dt$  бесконечно малом изменении теплосодержания  $di$  для тела массой в 1 кг, величина теплоёмкости может быть выражена:

$$C_t = \frac{di}{dt};$$

Эту величину принято называть истинной теплоёмкостью при данной температуре.

Теплоёмкость металлов и сплавов зависит в общем случае от давления, химического состава материала и температуры. При исследовании процесса нагрева металла рассматривают только химический состав и температурную зависимость теплоёмкости.

С повышением содержания углерода теплоёмкость повышается. С повышением температуры до 1000 °С теплоёмкость возрастает, а выше 1000°С несколько понижается. Наибольшего значения теплоёмкость достигает в области структурных превращений, так как переход из одного состояния в другое требует затрат тепла. Чем выше теплоёмкость металла, тем больше времени и тепла надо затратить на его нагрев.

На процесс нагрева металла влияет его плотность. С увеличением плотности возрастает количество тепла, поглощенного одним и тем же объёмом нагреваемого тела, следовательно, увеличивается продолжительность нагрева. С ростом температуры нагрева плотность нагреваемого металла понижается.

Способность металла проводить тепло определяется теплопроводностью. Однако при неустановившемся тепловом состоянии основную роль играет коэффициент температуропроводности, так как тепло нагреваемого металла распространяется с поверхности во внутрь не мгновенно, а с определённой скоростью, зависящей от температуропроводности данного металла.

Величина коэффициента температуропроводности определяется по формуле [12]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C\rho};$$

В общем случае с повышением температуры температуропроводность металлов понижается. Однако в области критических температур коэффициент температуропроводности может сильно меняться вследствие резкого изменения истинной теплоемкости металлов.

В некоторых случаях при расчете процесса нагрева металла приходится пользоваться так называемым коэффициентом термоинерции, который является функцией теплопроводности, теплоемкости и плотности и определяется по формуле [12]:

$$\epsilon = \sqrt{\lambda C\rho};$$

С повышением температуры коэффициент термостойкости углеродистых и малолегированных сталей изменяется в небольших пределах.

В процессе нагрева металла происходит изменение его механических свойств. С повышением температуры выше  $550^{\circ}\text{C}$  углеродистые стали теряют упругие свойства, уменьшается сопротивление деформированию, повышается пластичность. Для некоторых сталей характерно понижение пластичности в интервале температур  $200 - 300^{\circ}\text{C}$ , что соответствует так называемому явлению синеломкости. В некоторых случаях следует принимать во внимание возможное понижение пластичности стали в интервалах критических температур.

Нагрев металла является процессом не только физическим, но и химическим, так как газы печной атмосферы при высокой температуре вступают в активное взаимодействие с металлом. В результате происходит окисление железа, что приводит к потерям металла.

Сущность процесса окисления заключается в химическом взаимодействии железа с окисляющими газами (кислородом, углекислым газом, сернистым газом, водяным паром). Железо обладает большим сродством с кислородом и вследствие этого легко соединяется с ним, образуя  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Окисление металла представляет собой процесс диффузии атомов кислорода через слой окисла металла и диффузии атомов металла через слой окисла на его наружную поверхность. Однако при окислении основную роль играет процесс диффузии атомов железа наружу. Снаружи образуется высший окисел железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , а затем по убывающим степеням окисления  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{FeO}$ .

Процесс окисления начинается с поверхности металла и постепенно распространяется вглубь, причем по мере удаления от поверхности содержание кислорода в окислах уменьшается. При высоких температурах (выше  $1000^{\circ}\text{C}$ ) происходит быстрое окисление железа, сопровождающееся утолщением слоя окалины на поверхности металла. Распространению окисления железа с поверхности вглубь способствует непрерывное отделение окалины и обнажение поверхности нагреваемого металла, которое вызывается различием



коэффициентов расширения окалины и железа. Кроме этого водяной пар делает окалину рыхлой и легко отделимой.

На практике различают угар по весу, поверхностный угар, скорость окисления и толщину окалины.

Под весовым угаром понимают отношение количества металла, окисленного в процессе нагрева, выраженное в процентах к его первоначальному весу.

Поверхностный угар - это количество окисления металла, отнесенное к единице поверхности нагреваемого тела.

Скорость окисления - это отношение поверхностного угара ко времени нагрева. Толщину слоя окалины с поверхностным угаром связывают следующей формулой [12]:

$$S_{ок} = \frac{a_{ny}}{\rho_{ок} g_{Fe}};$$

где  $a_{ny}$  – поверхностный угар;

$\rho_{ок}$  – плотность окалины;

$g_{Fe}$  – среднее содержание железа в окалине.

Угар металла зависит от многих факторов: температуры и продолжительности, нагрева, состава печной атмосферы, вида топлива, марки стали, формы и размера заготовки, состояния поверхности.

При низких температурах до  $650^{\circ}C$  окисление железа протекает медленно и практического значения не имеет. Скорость окисления резко повышается с ростом температуры и наибольшего значения достигает при температурах, порядка  $1300^{\circ}C$ .

Угар металла находится в прямой зависимости от продолжительности нагрева: чем продолжительней нагрев, тем больше угар.

Существенное влияние на угар металла оказывает печная атмосфера, определяемая химическим составом топлива, коэффициентом расхода воздуха и совершенством конструкции топливосжигающих устройств, которая может быть окислительной, нейтральной или восстановительной. При сжигании

топлива с избытком воздуха печная атмосфера будет окислительная, и процесс окисления металла протекает достаточно интенсивно. При неполном горении топлива в рабочем пространстве печи образуется восстановительная атмосфера, которая практически полностью исключает угар металла.

Угар металла зависит и от химического состава металла - с повышением содержания углерода потери на угар уменьшаются.

Нагрев стали до высокой температуры наряду с процессом окисления сопровождается обезуглероживанием поверхностных слоев (частичное выгорание углерода) металла. Глубина обезуглероженного слоя достигает 2 мм. Обезуглероживание происходит за счет водяных паров, а затем по степени активности следуют  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ , вступающие в реакцию с углеродом, находящимся в виде химического соединения с железом ( $Fe_3C$ ). В начале нагрева скорость обезуглероживания выше, а затем замедляется. И при высоких температурах порядка  $1000^\circ C$  процесс обезуглероживания протекает значительно медленнее, чем процесс окисления. На процесс обезуглероживания оказывают влияние: атмосфера печи, температура и химический состав стали. С повышением температуры глубина обезуглероженного слоя увеличивается. Стали высокоуглеродистые подвергаются обезуглероживанию больше, чем низкоуглеродистые.

Обезуглероживание металла приводит к понижению механических свойств, короблению изделий, появлению трещин при последующей термической обработке.

Нагрев стали выше критической точки сопровождается быстрым ростом её зёрен. Чем выше температура и продолжительность нагрева, тем интенсивнее протекает рост зерен. Это явление называется перегревом.

Перегрев понижает качество поковок, так как крупное зерно в началековки при одних и тех же условиях придаёт поковке крупнозернистое строение. Склонность стали к перегреву зависит от химического состава.

Структура перегретой стали может быть восстановлена глубокой ковкой и соответствующей термической обработкой.

При повышении температуры нагрева стали близкой к температуре плавления, помимо роста зерен происходит окисление металла не только с поверхности, но и внутри по границам зёрен с частичным их оплавлением за счёт диффузии кислорода. Такое явление называется пережогом. В результате пережога связь между зёрнами нарушается настолько, что заготовка в процессе пластической деформации разрушается. Пережог является, как правило, результатом нарушения технологии нагрева.

### **Основные характеристики нагрева металла**

Нагрев металла обычно характеризуется скоростью, температурой и продолжительностью.

Скоростью нагрева называется увеличение температуры заготовки за единицу времени; она зависит от многих факторов: физических свойств материала; размеров и формы заготовки; способа расположения заготовки в нагревательном устройстве; температуры в рабочем пространстве.

При нагреве стальных заготовок следует различать допускаемую и технически возможную скорости нагрева.

Допускаемая скорость нагрева определяется величиной термических (температурных) напряжений и пластичностью нагреваемого металла. Величина термических напряжений зависит от температурного градиента по сечению заготовки, равномерности нагрева, температуры в рабочем пространстве в момент загрузки заготовки.

Известно, что металл при нагреве расширяется. Поверхностные слои металла, нагретые до более высокой температуры, расширяются больше. Однако расширение поверхностных слоев сдерживается соседними внутренними слоями, которые при этом будут растягиваться за счёт расширения наружных. В результате такого взаимодействия наружные слои будут испытывать сжимающие напряжения, а внутренние слои - растягивающие напряжения. Такого рода напряжения называются термическими (температурными) [12]. Чем

больше разница температур в различных частях материала заготовки, т.е. чем больше температурный градиент, тем больше термические напряжения.

При большой разности температур внутри металла температурные напряжения могут настолько возрасти, что это приведёт к образованию трещин внутри заготовки. Нагрев металла необходимо вести не только с определённой скоростью, но и по возможности равномерно со всех сторон. При неравномерном нагреве часть заготовки, обращенная к пламени, будет нагреваться быстрее, вследствие чего опять появляются температурные напряжения, которые станут причиной образования трещин в металле.

Скорость нагрева металла во многом зависит и от температуры в рабочем пространстве печи при загрузке, особенно при загрузке холодных или крупных заготовок. Посаженные в печь с высокой температурой слитки или заготовки благодаря большой разности температур печи и металла получают как бы температурный удар, т.е. происходит быстрое нагревание поверхностных слоев, в то время как внутренние слои имеют низкую температуру, а следовательно, возникают температурные напряжения, которые могут привести к образованию трещин в заготовке. В связи с этим допускаемая скорость нагрева обуславливается величиной термических напряжений, особенно в первый период нагрева, когда металл находится ещё в упругом состоянии, т.е. в интервале температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $750^{\circ}\text{C}$ .

При достижении температуры  $750^{\circ}\text{C}$  наблюдается значительное повышение пластичности стали, и поэтому нагрев можно вести с технически возможной скоростью, не опасаясь образования трещин. Технически возможная скорость нагрева зависит, в первую очередь, от температурного напора, т.е. от разности температур в рабочем пространстве печи и конечной температуры нагреваемой заготовки, которая должна составлять  $100 - 150^{\circ}\text{C}$ .

Под температурой нагрева металла подразумевают конечную температуру поверхности слитка или заготовки в момент их выдачи из нагревательного устройства. При этом необходимо учитывать неравномерность нагрева, определяемую перепадом температур по сечению, периметру и длине

заготовки или слитка. Допускаемая неравномерность нагрева связана с особенностями технологического процесса, для которого производится нагрев материала.

Для получения поковок высокого качества необходимо правильно назначить температуру нагрева, обеспечивающую наибольшую пластичность материала.

Область температур, при которых материал находится в наиболее пластичном состоянии и имеет наименьшее сопротивление деформированию, называется температурным интервалом ковки и штамповки. Температурный интервал ковки и штамповки представляет собой область температур от начала до конца ковки или штамповки и должен обеспечивать однофазное состояние металла на протяжении всего периода пластической деформации. При ковке или штамповке низкоуглеродистых сталей возможно окончание обработки при температуре, соответствующей двухфазному состоянию, так как эти стали обладают достаточной пластичностью при температуре порядка  $750^{\circ}\text{C}$ .

Различают оптимальный и технологически необходимый температурные интервалы ковки и штамповки.

*Технологически необходимый* интервал ковочных температур всегда лежит в пределах оптимального температурного интервала.

*Оптимальный температурный интервал* ковки и штамповки определяется температурами начала и конца ковки или штамповки, которые устанавливаются отдельно на основании конкретных данных о поведении металла при различных температурах. Однако точно установить эти температуры можно лишь при наличии данных о металле с металлургической, металловедческой, эксплуатационной точек зрения. Поэтому указывают ориентировочные температуры начала и конца ковки и штамповки, которые затем подлежат уточнению, исходя из конкретных обстоятельств.

Технологически необходимый интервал температур ковки и штамповки определяется временем, необходимым для выполнения данной операции или её части.

Температурный интервалковки и штамповки стали зависит от её химического состава и состояния (слиток или деформированная заготовка) и имеет верхний и нижний предел.

Под верхним пределом следует понимать максимально допустимую температуру нагрева металла, а не температуру началаковки или штамповки. Определяется предел из следующих соображений: стремлением повысить его для улучшения деформируемости материала, уменьшения усилия и расхода энергии на обработку; необходимость снижения его в связи с тем, что с повышением температуры возрастает окалинообразование и обезуглероживание поверхностного слоя.

При назначении нижнего предела температурного интервалаковки и штамповки исходят из стремления окончить обработку при температуре, обеспечивающей уменьшение опасности образования трещин. Однако необходимо считаться не только с маркой стали, но и с объемом, и качеством обработки поковки, способом охлаждения, а также с требованиями к механическим свойствам металла с учетом характера эксплуатации детали.

Для углеродистых сталей теоретической основой при выборе температурного интервалаковки и штамповки является диаграмма железоуглеродистых сплавов. На рис. 6 показана область ковочных температур углеродистых сталей. Как видно из диаграммы, максимальный интервал ковочных температур для низкоуглеродистых сталей составляет  $600^{\circ}\text{C}$ , для эвтектоидных сталей –  $450 - 400^{\circ}\text{C}$ , для заэвтектоидных сталей –  $200 - 250^{\circ}\text{C}$ , для высоколегированных сталей – порядка  $100 - 150^{\circ}\text{C}$ .

Температурные интервалыковки и штамповки для наиболее распространенных марок стали даны в соответствующих справочниках. Для сталей и сплавов, новых марок оптимальные температурыковки или штамповки устанавливаются по результатам комплексных испытаний [11].

## Лекция № 5

### План лекции:

*Продолжительность нагрева. Режим нагрева. Способы защиты металла от окисления. Охлаждение металла*

Нагрев заготовок под ковку или штамповку в общем случае сводится к определению продолжительности нагрева этих заготовок до заданной температуры. Таким образом, продолжительность нагрева – это время, которое необходимо для нагрева по заданному режиму до требуемой температуры. Продолжительность нагрева непосредственно связана с производительностью нагревательного устройства: чем меньше продолжительность нагрева, тем выше производительность нагревательного устройства при прочих равных условиях. Продолжительность нагрева металла зависит от многих факторов: марки стали; формы и геометрических размеров заготовки; способа укладки заготовок на поду печи; теплофизических свойств материала; температуры рабочего пространства нагревательного устройства и конечной температуры нагрева металла. Связь между перечисленными факторами весьма сложная, и поэтому определение продолжительности нагрева требует тщательного анализа в каждом конкретном случае.

При нагреве тел в зависимости от перепада температур по их сечению они могут быть разделены на "тонкие" и "массивные" тела. При нагреве тонкого тела разность температур по сечению очень мала и ею можно пренебречь, считая, что в каждый момент по всей массе она равна температуре поверхности. Нагрев тонкого тела определяется теплопередачей на поверхности тела.

Нагрев массивных тел происходит при наличии значительного перепада температур между поверхностью и центром и поэтому при расчете нагрева необходимо учитывать не только процесс теплопередачи на поверхность, но и процесс распространения тепла внутрь тела.

Граница между тонкими и массивными телами определяется критерием Био, показывающим соотношение между количеством тепла, полученного поверхностью тела, и количеством тепла, отведенного во внутрь:

$$Bi = \frac{\alpha_{\lambda+\kappa} S}{\lambda};$$

где  $\alpha_{\lambda+\kappa}$  – приведенный коэффициент теплопередачи конвекцией с учетом излучения конвекцией на поверхность тела;

$S$  – половина толщины пластины (или  $R$ -радиус цилиндра), обогреваемой с обеих сторон одинаково;  $\lambda$  -коэффициент теплопроводности материала.

Чем больше критерий Био, тем массивнее тело. Теоретические и экспериментальные данные показывают, что массивными являются тела, у которых критерий Био при нагреве равен или больше 0,5, а тонкими, у которых критерий Био не превышает 0,25. Интервал значений  $0,25 < Bi < 0,5$  представляет переходную область, которую при точном расчете относят к массивным телам, а при приближенном - к тонким. Деление тел на тонкие и массивные является условным, так как одно и то же тело при нагреве в среде с низкой температурой может быть отнесено к тонким телам, а при нагреве в среде с высокой температурой - к массивным.

Решение задачи о нагреве тонких тел при постоянной температуре в нагревательном устройстве было выполнено Б. В. Старком. Дифференциальное уравнение, отражающее процесс нагрева таких тел, имеет вид [11].

$$q_{\text{г.кл.м}} F_{\text{эф}} dt = g c d\tau;$$

где  $q_{\text{г.кл.м}}$  – тепловой поток на поверхности металла;

$F_{\text{эф}}$  – эффективная тепловоспринимающая поверхность;

$g$  – масса нагреваемого металла;

$c$  – теплоемкость;

$\tau$  – продолжительность нагрева;

$t$  – температура нагрева.



Величина теплового потока может иметь различные значения в зависимости от способа передачи тепла. Подставляя значения теплового потока, при передаче тепла на поверхность нагреваемого тела по законам конвекции с учетом излучения, в основное дифференциальное уравнение и решая его относительно продолжительности нагрева, получим [12]:

$$\tau = \frac{Vc\rho}{F_{эф}\alpha_{л+к}} \cdot \ln \frac{t_n - t_M^H}{t_n - t_M^K};$$

Это уравнение показывает, что продолжительность нагрева таких тел прямо пропорционально линейному размеру тела, объемной теплоемкости ( $с\rho$ ), логарифму отношения начальной и конечной разности температур и обратно пропорционально коэффициенту теплопередачи конвекции с учетом излучения.

Коэффициент теплопередачи обычно определяется по эмпирическим формулам или из графиков [11].

Аналогичные формулы получены для определения продолжительности нагрева тонких тел и при тепловом потоке подчиняющейся законам излучения. Эти формулы дают более точное значение продолжительности нагрева, но они очень громоздки.

Нагрев тонких тел может осуществляться и при переменной температуре в нагревательном устройстве. Если температура в рабочем пространстве изменяется по линейному закону

Если температура печи меняется во времени по какой-то кривой, заменяя кривую отрезками прямых, можно вести расчет нагрева тонкого тела по выше предложенной формуле.

Процесс нагрева массивных тел (крупных заготовок и слитков) является более сложным, и его расчеты основаны на решении дифференциального уравнения теплопроводности (уравнения Фурье).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right);$$

При нестационарном температурном поле уравнение Фурье для одномерного теплового потока, принимая вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

имеет ряд решений. Поэтому для получения однозначного решения необходимо знать начальные и граничные условия.

Начальными условиями называются распределения температуры в теле в какой-либо момент времени (обычно в начальный момент), при

$$\tau = 0 \Rightarrow t = t_n = const$$

Граничными (или поверхностными) условиями называются условия, характеризующие изменение температуры на поверхности тела или тепловое взаимодействие поверхности тела с окружающей средой. Различают следующие граничные условия:

- первого рода - если задано распределение температуры на поверхности тела как функция координаты времени;
- второго рода - если известна величина теплового потока на поверхности тела;
- третьего рода - если задана температура среды, окружающей тело, и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Для определения продолжительности нагрева массивных заготовок предложена формула [16], полученная из уравнения теплопроводности в предположении, что температура поверхности тела изменяется по линейному закону:

$$\tau = \frac{\Phi S^2 (t_m^k - t_m^H)}{\alpha \Delta t}$$

где  $\Phi$  - коэффициент формы заготовки, определяется по таблице [1];

$S = \mu d$  - расчетная толщина нагреваемого тела;

$d$  - действительная толщина тела;

$\mu$  - коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева заготовки, обусловленного расположением ее на поду печи;

$\alpha$  - коэффициент температуропроводности;

$\Delta t$  - конечная разность температур поверхности и центра нагреваемой заготовки.

Если нагрев осуществляется с выдержкой в конце процесса, то продолжительность выдержки определяется по формуле [1]:

$$\tau = e \frac{S^2}{\alpha};$$

где  $e$  – коэффициент, зависящий от степени выравнивания температур по сечению; определяется по графику [1].

**Графоаналитический метод расчета** [17] продолжительности нагрева массивных тел (слитков) из углеродистой стали ведется на основе критериальных уравнений, которые приведены в виде номограмм, разработанных Д.В. Будриным. На оси ординат этих номограмм откладывается температурный критерий  $Q$ , а на оси абсцисс – критерий Фурье ( $Fo$ ) в зависимости от величины критерия Био. Температурный критерий определяется для поверхности  $Q_n$  и центра  $Q_u$ .

$$Q = \frac{t_n - t_m^k}{t_n - t_m^u};$$

где  $t_n$  – температура в рабочем пространстве печи.

Сущность расчета заключается в следующем: определяют критерий Био и температурный критерий на поверхности нагреваемой заготовки. По ним с помощью номограммы определяют критерий Фурье. Затем по известным критериям Био и Фурье определяют температурный критерий для центра заготовки, потом температуру центра заготовки, разность температур, после чего среднюю температуру. Для средней температуры слитка или заготовки определяют теплопроводность, теплоемкость, коэффициент температуропроводности. По критерию Фурье определяют продолжительность нагрева:

$$\tau = F_o \frac{S^2}{\alpha};$$

Для того чтобы погрешность расчета была как можно меньше, весь период нагрева делят на отдельные температурные периоды, расчет при этом ведут для каждого периода отдельно. Общая продолжительность нагрева равна сумме продолжительностей всех периодов.

Рассмотренные теоретические методы расчета нагрева массивных тел исходят из постоянства температуры среды - температуры в рабочем пространстве нагревательного устройства. На практике в большинстве случаев температура в рабочем пространстве меняется, т.е. нагрев слитков и заготовок под ковку и штамповку значительно чаще бывает при переменной температуре печи. Методы расчета, применяемые при переменной температуре печи, авторы работы [3] рекомендуют разделить на две группы:

- первая группа - известен закон изменения температуры печи во времени;
- вторая группа - задан режим изменения температуры поверхности и центра нагреваемого тела.

При решении задач первой группы все время нагрева делят на несколько участков и температуру печи в каждом участке принимают постоянной и равной среднему значению, т.е. плавную кривую заменяют ломанной кривой. Затем определяют температуру поверхности и центра заготовки для каждого участка как при нагреве массивных заготовок с постоянной температурой в рабочем пространстве нагревательного устройства. Полученные результаты наносят на график таким образом, чтобы начало отрезка кривой последующего участка соответствовало температуре поверхности и центра тела в конце предыдущего участка. Соединив точки, получим график изменения температуры поверхности и центра заготовки по времени при переменной температуре в рабочем пространстве печи.

Сущность решения задач второй группы сводится к следующему: график изменения температуры поверхности нагреваемого тела разбивают на периоды, а затем для каждого периода, используя уравнения и графики для расчета нагрева тел при изменении температуры поверхности по линейному закону, определяем температуру в центре заготовки и изменение теплового потока, по которому определяем температуру печи. По полученным данным строим кривые изменения температуры в центре заготовки и температуры в рабочем пространстве печи, обеспечивающей заданный режим нагрева.

Режим нагрева - это график изменения температуры в рабочем пространстве нагревательного устройства и металла в процессе нагрева.

В понятие "режим нагрева" входят: *начальная температура нагревательного устройства и нагреваемого металла; количество интервалов нагрева и скорость нагрева в каждом интервале; конечная температура нагрева и допускаемая неравномерность нагрева; продолжительность каждого интервала и общая продолжительность нагрева; температурный и тепловой режим работы нагревательного устройства.*

Режим нагрева слитков и заготовок устанавливают в зависимости от физических свойств материала, формы и размеров слитков и заготовок, начальной температуры, а также типа и конструкции нагревательного устройства. Основой выбранного режима нагрева является максимально допускаемая скорость нагрева, которая обеспечивает высокую производительность нагревательного устройства наряду с высоким качеством нагрева при минимальной затрате тепловой энергии.

При нагреве под ковку и штамповку можно применять одноступенчатый, двухступенчатый и трехступенчатый режимы.

*Одноступенчатый режим предполагает постоянную температуру нагревательного устройства в течение всего нагрева.* Продолжительность нагрева определяется разностью температур в рабочем пространстве и поверхности нагреваемого металла в конце нагрева. Одноступенчатый нагрев не позволяет регулировать температуру по сечению и поэтому его применяют при нагреве мелких и средних заготовок, расположенных на поду печи в определенном порядке.

*Двухступенчатый режим состоит из двух периодов – нагрева и выдержки.* В первом периоде происходит нагрев слитка или заготовки до требуемой температуры на их поверхности; во втором периоде происходит выравнивание температуры по сечению и массе при постоянной температуре на поверхности.

Этот режим применяется при нагреве пакетов листов, прутков, мелких заготовок на поддонах (в навал), небольших и средних слитков из углеродистой стали в камерных печах, а также при нагреве небольших слитков и заготовок в методических печах.

*Трехступенчатый нагрев включает периоды медленного и ускоренного нагрева и выдержки.* Первый период характеризуется медленным подъемом температуры, определяемой допускаемой скоростью нагрева, и заканчивается при переходе металла в пластическое состояние. Второй период - период форсированного нагрева, обусловленный технически возможной скоростью нагрева металла. Третий период - период выдержки такой же, как и при двухступенчатом режиме, отличающийся постоянной или несколько снижающейся температурой в рабочем пространстве нагревательного устройства к концу процесса. Этот режим применяют при нагреве крупных и средних слитков из углеродистой и легированной сталей в методических и камерных печах.

Нагрев слитков из высокоуглеродистых и высоколегированных сталей предусматривает более сложные режимы - четырех-, пятиступенчатые и более, связанные с изменением механических свойств и структуры металла в процессе нагрева.

Исходя из вышеизложенного следует, что нагрев под ковку и штамповку может быть разделен на нагрев мелких и средних заготовок в камерных печах, нагрев крупных заготовок и слитков в камерных печах, нагрев слитков и крупных заготовок в методических и полуметодических печах.

### ***Практика нагрева заготовок под ковку и штамповку***

Процесс нагрева под ковку и штамповку должен обеспечивать получение требуемой температуры и равномерного распределения ее по сечению нагреваемого тела.

Нагрев мелких и средних заготовок в камерных печах с постоянной температурой имеет большое распространение в кузнечно-штамповочных

цехах. Расчет нагрева в этом случае можно вести по формулам для тонких тел. Однако в практике широко применяются эмпирические формулы для приближенного определения продолжительности нагрева. При нагреве в камерных печах с температурой 1300 – 1350°С заготовок из мало - и среднеуглеродистых сталей применяется формула, предложенная Н.Н. Доброхотовым:

$$\tau = 10\kappa D^{1.5};$$

где  $D$  – диаметр или толщина заготовки, м;

$\kappa$  – коэффициент, учитывающий влияние взаимного расположения заготовок на поду печи [12].

Коэффициент загрузки пода оказывает существенное влияние на продолжительность нагрева и производительность нагревательного устройства. При малом коэффициенте загрузки, когда заготовки уложены на поду на большом расстоянии друг от друга, продолжительность нагрева сокращается, но зато уменьшается и производительность нагревательного устройства. Поэтому необходимо выбирать коэффициент загрузки такой, чтобы обеспечивалась достаточная производительность нагревательного устройства. Процесс нагрева крупных заготовок и слитков под ковку и штамповку в камерных печах является более сложным, чем нагрев мелких заготовок, так как с увеличением размеров нагреваемой заготовки увеличивается разность температур по сечению, и появляется опасность возникновения трещин за счет появления температурных напряжений. Эта опасность особенно велика при нагреве слитков, так как металл слитка неоднороден. Кроме того, в слитках возможны остаточные напряжения, возникающие при затвердевании и охлаждении слитка. В связи с этим появилась необходимость учета температурных напряжений при расчете процесса нагрева, особенно в первый период. Решая совместно дифференциальные уравнения упругости с уравнением передачи тепла теплопроводностью, Н.Ю. Тайц получил выражения для определения максимальных температурных напряжений, позволившие проводить расчет процесса нагрева крупных заготовок и

слитков с учетом температурных напряжений на первом периоде нагрева. Им были предложены формулы для определения продолжительности нагрева в каждом периоде при трехступенчатом режиме [9].

Нагрев крупных заготовок и слитков под ковку может осуществляться в методических и полуметодических печах. По температурному режиму эти печи делятся на двухзонные и трехзонные. Рабочее пространство двухзонных методических печей делятся на методическую часть (подогревательную камеру), в которой температура поднимается по ходу перемещения металла от температуры уходящих газов до температуры следующей зоны, так называемой сварочной камеры (или зоны высоких температур). В зависимости от расположения топливосжигающих устройств в сварочной зоне может быть либо постоянная температура, либо снижающаяся. В первом случае обеспечивается большой тепловой напор-порядка 100 – 150°С. Большое влияние на температурный напор оказывает относительная длина сварочной зоны. Чем она больше, тем больше температурный напор и тем меньше время нагрева заготовок. Продолжительность нагрева в методической печи приближенно можно определить по формуле, предложенной Н.Ю. Тайцем [9]:

$$\tau = (7 + 0,05S)S, \text{ мин}$$

где  $S$  – толщина заготовки, см.

Нагрев крупных слитков обычно производится в трехзонных методических печах, имеющих нагревательную камеру, камеру высоких температур, где температурный напор составляет 200 – 250°С и камеру выдержки, в которой происходит выравнивание температур по сечению нагреваемого слитка. Наиболее целесообразно в трехзонных методических печах нагревать слитки из легированных сталей, так как для них требуется более точный нагрев.



### ***Способы защиты металла от окисления и обезуглероживания при нагреве***

Нагрев металла под ковку или штамповку сопровождается некоторыми отрицательными явлениями такими, как окисление и обезуглероживание поверхности нагреваемых заготовок.

Для полной или частичной защиты поверхности нагреваемого металла от окисления и обезуглероживания применяют способы, которые можно разделить на две группы.

Первую группу составляют различные приемы обслуживания и эксплуатации нагревательных печей. К ним относятся: улучшение условий сжигания топлива; улучшение обслуживания и эксплуатации печей; скоростной нагрев.

Любое топливо, применяемое для нагрева, необходимо сжигать с минимальным избытком воздуха, т.е. минимальным содержанием свободного кислорода в продуктах горения, что способствует уменьшению угара металла. Мерами улучшения условий сжигания жидкого топлива являются выбор наилучшего типа форсунок, очистка и подогрев мазута, применение для сжигания топлива подогретого воздуха до температуры 300 -400°С. При сжигании газообразного топлива рекомендуется применять беспламенные горелки с предварительным смешением газа и воздуха, подогрев воздуха за счет использования тепла уходящих дымовых газов.

Наличие в рабочей камере нагревательного устройства разряжения на поду печи сопровождается увеличением содержания свободного кислорода, что способствует интенсивности окисления металла. Самым эффективным способом борьбы с подсосом холодного воздуха является автоматическое регулирование давления в рабочем пространстве печи. При эксплуатации нагревательных устройств следует обращать внимание на качество и состояние огнеупорной кладки и теплоизоляции. Положительное влияние на сокращение угара металла оказывает и автоматизация теплового режима работы нагревательного устройства.

Эффективным способом борьбы с потерями металла в окалину является скоростной нагрев, сущность которого заключается в поддержании во время нагрева температурного напора до 300 - 400°С, за счёт чего время нагрева сокращается в 2 - 4 раза. Скоростной нагрев осуществляется в полностью механизированных и автоматизированных нагревательных устройствах.

Однако эффективность способов защиты металла от окисления и обезуглероживания первой группы невелика, т.е. потери металла в лучшем случае сокращаются вдвое.

Способы борьбы с угаром, отнесённые ко второй группе, отличаются большей эффективностью, так как они позволяют устранить угар полностью или свести его к минимуму. К ним относятся: нагрев металла в восстановительной печной атмосфере; безокислительный нагрев в муфельных печах с использованием защитных газовых сред; нагрев с применением защитных покрытий.

Эффективным способом борьбы с окислением металла является нагрев металла в открытых печах с восстановительной атмосферой. Сущность этого процесса заключается в следующем [11]: в обычных нагревательных печах, но частично видоизменённых в конструктивном отношении, искусственно создают условия для неполного горения топлива с таким расчётом, чтобы в составе продуктов горения было от 10 до 14%  $CO$  и 12%  $H_2$ . Продукты горения с таким содержанием окиси углерода и водорода при отсутствии воздуха создают условия для безокислительного нагрева. Для получения необходимых температур нагрева металла и устранения отрицательного влияния на расход топлива химической неполноты горения продукты горения направляются в специальные камеры на дожигание. В эти камеры подаётся воздух в количестве, необходимом для полного сжигания окиси углерода и водорода. В результате температура продуктов горения повышается до 1400 – 1600°С. Затем дымовые газы с высокой температурой направляют в регенераторы, в которых за счёт тепла уходящих газов подогревают воздух, расходуемый на неполное горение топлива, до высоких температур 1000 - 1100°С. Высокая

температура воздуха, подаваемого в рабочее пространство, создает условия для получения высоких рабочих температур.

Безокислительный процесс нагрева в муфельных пламенных печах основан на применении газовых контролируемых сред, обладающих защитными свойствами от окисления и обезуглероживания. Состав защитных газов может быть самый разнообразный в зависимости от неполного сжигания различных видов топлива. Для получения безокислительного нагрева необходимо рабочее пространство печи заполнить нейтральным газом и на протяжении всего периода нагрева поддерживать принятый состав атмосферы.

Уменьшение угара металла может быть достигнуто путем применения защитных покрытий, нанесенных на поверхность заготовок. Эти покрытия защищают поверхность металла от окисления и обезуглероживания при высоких температурах. В качестве защитных покрытий применяют жидкое стекло и литий.

Защитная обмазка из стекла приготавливается в виде стеклянной суспензии на водном или спиртовом растворе и наносится тонким слоем на поверхность холодной заготовки. Тонкий слой расплавленного стекла не только защищает поверхность заготовки, но и служит хорошей смазкой при штамповке.

При нагреве заготовок с защитой поверхности металла окислами лития в атмосферу нагревательного устройства вводят пары лития, которые активно взаимодействуют с  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и др., образуя окись лития. Окись лития конденсируется на поверхности более холодной заготовки, образуя защитное покрытие.

### ***Охлаждение металла***

Охлаждение металла начинается с момента выдачи заготовки из нагревательного устройства и продолжается в процессековки или штамповки, причем до температуры концаковки или штамповки оно происходит постепенно, а после обработки давлением — более интенсивно до температуры окружающего пространства. Продолжительность охлаждения металла в

процессековки или штамповки определяется продолжительностью самого процесса обработки. Во время охлаждения поковок в результате перепада температур между центром и поверхностью возникают внутренние напряжения. Чем быстрее происходит процесс охлаждения, тем больше перепад температур, и тем больше может быть величина внутренних напряжений. Остаточные напряжения могут возникнуть вследствие структурных превращений, происходящих при охлаждении.

Неправильное охлаждение поковок может привести к их короблению, поверхностной твёрдости, а при очень быстром охлаждении - к образованию трещин как внутренних, так и поверхностных.

Выбор способа охлаждения поковок следует производить исходя из марки и свойств стали. Поковки из низкоуглеродистых сталей независимо от их размеров можно охладить на воздухе, не прибегая ни к каким средствам, направленным на замедление процесса охлаждения. Охлаждение поковок из высокоуглеродистых и легированных сталей следует производить на стеллажах, в штабелях, ящиках с песком, необогреваемых колодцах, хорошо изолированных от окружающей среды. Поковки из высоколегированных сталей охлаждают в специальных отапливаемых колодцах или вместе с нагревательным устройством. Замедленное охлаждение необходимо в интервалах температур структурных превращений.

Расчёт продолжительности охлаждения поковок на воздухе ведут по той же методике, что и их нагрев, т.е. с учётом "тонких" и "массивных" тел.

## **Лекция № 6**

### **План лекции:**

*Нагревательные устройства и требования, предъявляемые к ним. Их классификация. Камерные печи. Устройство и их работа. Классификация камерных печей. Методические печи.*

## НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

К средствам нагрева металла относятся нагревательные устройства, с помощью которых осуществляется нагрев заготовок и их транспортирование.

Нагревательное устройство – это устройство, в котором в результате горения топлива или преобразования электроэнергии выделяется теплота, используемая для нагрева металла. Оно является одновременно и технологическим аппаратом и энергетическим устройством. К нагревательным устройствам предъявляются следующие основные требования: высокая производительность при заданных технологических условиях нагрева; минимальный удельный расход топлива; универсальность, т.е. возможность изменения сортамента нагреваемых заготовок; наличие механизации загрузки и выгрузки изделий; возможность автоматического управления тепловой работой; простота и безопасность обслуживания.

Все нагревательные устройства, применяемые в машиностроении, можно классифицировать по трём основным признакам: *по источнику тепла; температурному и технологическому режимам.*

По источнику тепла нагревательные устройства подразделяются на *пламенные, работающие на твёрдом, жидком, газообразном топливах и электрические.*

По температурному режиму нагревательные устройства делятся на два класса: *нагревательные устройства с постоянной температурой в рабочем пространстве;*

*нагревательные устройства с переменной температурой в рабочем пространстве.*

Температурный режим определяет конструктивные особенности нагревательных устройств. Так, к первому классу относятся камерные печи, а ко второму – методические и полуметодические печи.

По технологическому признаку нагревательные устройства подразделяют на печи *обыкновенного нагрева, безокислительного и малоокислительного нагрева.* К печам безокислительного нагрева относятся печи, в которых угар

металла составляет 0 – 0,3 % от массы заготовки. В малоокислительных печах угар металла составляет от 0,3 до 0,7%. Множество других признаков классификации нагревательных устройств имеют второстепенное значение.

**Камерные печи.** Камерная печь – это нагревательное устройство, в котором температура в любой точке рабочего пространства в данный момент времени примерно одинаковая. Они достаточно универсальны, просты по своей конструкции, удобны в обслуживании; работают в основном на жидком и газообразном топливе. На рис. 12 представлена камерная нагревательная печь.

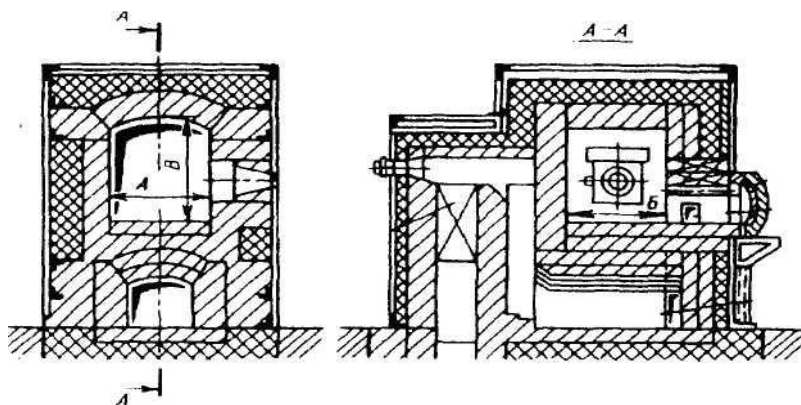


Рис. 12. Камерная нагревательная печь

Основными элементами камерной печи являются: *каркас, футеровка, под, свод, дымовые каналы и дымоходы, фурнитура.*

Каркас является важной частью печи и служит для скрепления кладки, а также для восприятия усилий, возникающих в кладке, и передачи их на фундамент. Кроме того, каркас служит для монтажа топливосжигающих устройств, заслонок, механизма подъёма заслонок. Конструкция каркаса определяется типом и конструкцией печи и состоит из стоек, стянутых продольными и поперечными балками. Каркасы небольших печей выполняются в виде сплошных кожухов из листовой стали.

Футеровка представляет собой рабочую камеру (рабочее пространство), которая состоит из пода, свода и стенок. Под - это нижняя часть печи, на которой размещают нагреваемые заготовки. Он подвергается давлению нагревательных заготовок, ударам, химическому воздействию окислы и шлаков. Поэтому под выкладывают из высокопрочного огнеупорного кирпича

толщиной в пределах 200 - 700 мм в зависимости от размеров рабочего пространства и температуры печи. Рабочее пространство печи сверху перекрывается сводом, который оказывает существенное влияние на процесс нагрева, так как быстро нагревается и непрерывно излучает тепло на нагреваемые заготовки. По конструкции своды бывают плоские и арочные. Для кузнечных печей применяют преимущественно арочные своды. Арочный свод представляет собой арку с постоянным радиусом кривизны. Они просты по конструкции, надежны в эксплуатации, но требуют обязательного применения каркаса для восприятия горизонтальной силы. Кладка свода выполняется из прямого и клинового кирпича. Для уменьшения потерь тепла своды хорошо теплоизолируются. Стены нагревательных печей состоят из внутренней (огнеупорной) и внешней (теплоизоляционной) кладки. Причём каждый слой выкладывается самостоятельно. При кладке стен высотой более 1,5 м огнеупорная часть кладки соединяется с внешним слоем посредством выпусков огнеупорного кирпича в наружный слой.

Дымоходы в нагревательных устройствах служат для отвода дымовых газов из рабочего пространства в дымовую трубу или под зонт над печью. Дымоходы строятся обычно в системах больших стационарных печей.

Фурнитура - это металлические части, входящие в конструкцию нагревательных печей: заслонки, подъёмные механизмы, задвижки, шиберы и т.д.

Камерные печи могут быть с периодической и непрерывной загрузкой заготовок в рабочее пространство. В свою очередь камерные печи с периодической загрузкой делятся на очковые, щелевые, печи со стационарным подом, печи с выдвижным подом.

Очковые печи предназначены для нагрева концов заготовок диаметром до 25 мм под высадку. Выполняются они в виде камеры, в стенках которой имеются круглые или прямоугольные отверстия для загрузки заготовок. Очковые печи могут быть стационарные и поворотные. В стационарных печах рабочая камера имеет прямоугольную форму, в которой с одной стороны устанавливают горелки

(форсунки), а остальные стенки служат для загрузки. Во вращающихся печах горелку устанавливают снизу или сверху. Производительность очковых печей достаточно высокая, но коэффициент полезного действия очень низкий порядка 10%.

Щелевые печи применяются для нагрева концов длинных прутков и штанг диаметром до 80 мм под высадку на ГКМ.

Щелевые печи выполняются в сварных кожухах, имеют прямоугольную форму. В одной из длинных сторон устраивается невысокое окно без заслонки (щель) для загрузки заготовок. Горелки устанавливаются по боковым стенкам. Для защиты обслуживающего персонала от излучения щель снабжается водяной завесой. Продукты горения удаляются под вытяжной зонт. Эти печи удобны тем, что их можно переносить. КПД щелевых печей также невысок - порядка 12%.

Камерные печи со стационарным подом можно разделить на малые, средние и крупные. Малые камерные печи с площадью пода 0,3 - 1,5 м<sup>2</sup> служат для нагрева под ковку и штамповку заготовок весом до 1,5 - 2,0 кг. Чаще всего эти печи оборудуются рекуператорами, обеспечивающими подогрев воздуха до температуры 350 - 400°С. Эти печи имеют довольно высокий КПД - порядка 25%.

Средние камерные печи имеют площадь пода 1,5 - 5 м<sup>2</sup> и предназначены для нагрева заготовок массой от 2 до 15 кг. Кладку печей выполняют чаще всего в жестких каркасах. Эти печи могут иметь несколько загрузочных окон, отвод дымовых газов в них может быть под зонт или в дымовую трубу, обслуживающую несколько печей. Чаще печи этого типа делают двухкамерными, чтобы повысить их производительность.

Большие камерные печи (с площадью пода более 5 м<sup>2</sup>) применяются для нагрева крупных заготовок и слитков под ковку. Строят эти печи в жестких каркасах на массивных фундаментах. Продукты горения отводятся через дымовую трубу. Печи оборудованы несколькими загрузочными окнами больших размеров с



футерованными водоохлаждающими заслонками, подъём и опускание которых механизированы с помощью пневматических или гидравлических цилиндров.

Камерные печи с выдвижным подом предназначены для нагрева крупных слитков и заготовок под ковку. Преимуществом этих печей по сравнению с большими стационарными камерными печами является удобство загрузки и выгрузки нагретых слитков и заготовок. По расположению пода печи могут быть тупиковые, когда под выдвигается в одну сторону, и проходные - под выдвигается в обе стороны. Печи с выдвижным подом в большинстве случаев работают с отводом дымовых газов в дымовую трубу.

Механизированные камерные печи с непрерывной загрузкой делятся на проходные, толкательные, перекатные с наклонным подом, карусельные, конвейерные, с шагающим подом. Основным назначением этих печей является уменьшение трудоемкости процесса нагрева и обеспечения определённого режима работы основного кузнечного оборудования. Заготовки в печах перемещаются от места загрузки к месту выдачи различными способами. За время перемещения они нагреваются до заданной температуры.

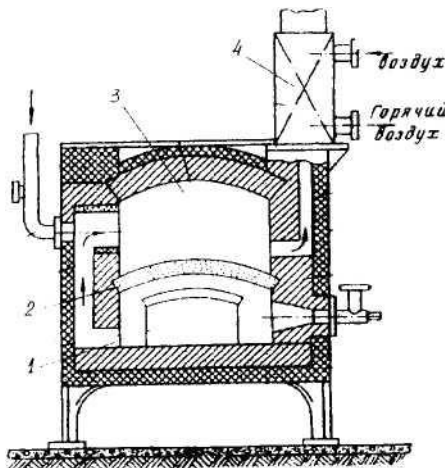
Печи с наклонным подом применяются для нагрева цилиндрических заготовок диаметром более 40 мм и длиной до 600 мм под штамповку. Заготовки извлекаются из печи специальным механизмом, позволяющим скатываться им по одной к месту выдачи.

Толкательные камерные печи применяются для нагрева квадратных и прямоугольных заготовок. Печи с шагающим подом предназначены для нагрева листового, полосового и длинного сортового материала. Печи с боковыми конвейерами позволяют нагревать концы заготовок под высадку. Карусельные печи применяют для нагрева под штамповку заготовок самой различной формы.

К механизированным камерным печам относятся и печи скоростного нагрева, которые работают со значительным температурным напором (до 400°C). Они предназначены для нагрева мелких заготовок под штамповку

Время нагрева в этих печах строго регламентировано во избежание перегрева и пережога. Угар металла в этих печах в 1,5 - 2 раза меньше, чем в обычных камерных печах. Тепло уходящих дымовых газов используют в рекуператорах, так как температура их очень высока - порядка 1350 - 1450°C.

В целях уменьшения потерь металла от окисления при нагреве под ковку и штамповку применяют камерные печи безокислительного нагрева (рис. 8).

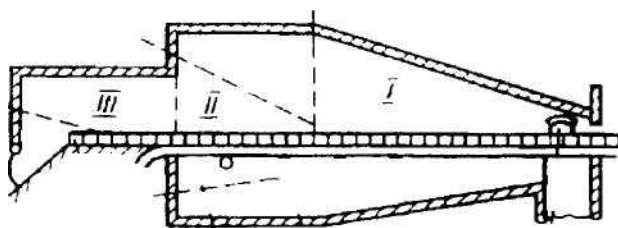


#### Схема камерной печи безокислительного нагрева

Рабочее пространство печи разделено на две камеры специальным сводом, изготовленным из теплопроводящего материала - карборунда. Нижняя камера служит для нагрева металла в восстановительной атмосфере, которая создаётся путём неполного сжигания топлива. Продукты неполного сжигания топлива по специальным каналам из нижней камеры попадают в верхнюю. Благодаря горячему воздуху, подаваемому по трубопроводу, происходит дожигание топлива, сопровождающееся выделением большого количества тепла с повышением температуры до 1300 - 1500°C. Вследствие высокой температуры

карборундовый свод быстро нагревается и излучает тепло на заготовки, расположенные на поду нижней камеры, нагревая их до необходимой температуры. В печах безокислительного нагрева обязательным условием является поддержание на поду положительного давления.

Методические и полуметодические печи – это нагревательные устройства, в которых режим по зонам рабочего пространства является постоянным, а нагреваемые заготовки непрерывно перемещаются. Одной из основных особенностей методических печей является противоточные движения дымовых газов и металла. Методические печи имеют вытянутую в длину форму рабочего пространства, при чем отношение длины пода к ширине равно 6:1. Полуметодические нагревательные печи в отличие от методических имеют укороченную относительную длину, которая составляет 4:1. К преимуществам методических и полуметодических печей относятся более высокая производительность, равномерный нагрев и высокий термический КПД.



По тепловому и температурному режимам и форме рабочего пространства методические печи бывают двухзонные и трехзонные (рис. 9).

Рис. 9. Схема трехзонной методической печи

В двухзонных печах обычно имеются две температурные зоны: подогревательная камера (методическая часть), в которой температура печи, (по ходу металла) поднимается от температуры уходящих газов до температуры следующей зоны, и сварочная камера (зона высоких температур), в которой температура почти постоянна и на 100 - 150 °С выше температуры нагрева металла. Двухзонные печи обычно используются для нагрева средних заготовок и мелких слитков.

Нагрев крупных слитков и заготовок производят в трехзонных методических печах, имеющих три температурные зоны: подогревательную камеру, камеру высоких температур, в которой температура на 200 -250°С выше температуры нагреваемого металла, и камеру выдержки, предназначенную для выравнивания температур по сечению нагреваемого слитка или заготовки при температуре, незначительно превышающей температуру нагрева металла.

В целях повышения производительности, снижения неравномерности нагрева и уменьшения угара металла двухзонные и трехзонные методические печи строятся с нижним обогревом.

Существующие конструкции методических и полуметодических печей отличаются большим разнообразием.

#### Лекция № 7

План лекции: Материалы, применяемые для строительства печей.

Основы тепловой работы нагревательных устройств. Основные показатели работы печи.

Материалы, применяемые для строительства печей

Нагревательные устройства работают в крайне неблагоприятных условиях: резкое изменение температур, кладка подвергается давлению нагреваемых заготовок, ударам при загрузке, разрушающему действию окалины и шлака. Все это предъявляет повышенные требования к материалам, из которых изготавливаются нагревательные устройства. Для строительства нагревательных печей используются огнеупорные, теплоизоляционные и общестроительные материалы.

Огнеупорными материалами (огнеупорами) называются неметаллические строительные материалы способные противостоять воздействию высоких температур и физико-химическим процессам, протекающим при этих температурах. Огнеупоры предназначены для изготовления внутреннего слоя рабочего пространства нагревательного устройства. Исходя из условий работы нагревательной печи, огнеупоры должны быть достаточно прочными, обладать высокой температурой расплавления, противостоять резким колебаниям

температур, разрушающему воздействию окислы и шлака, сохранять постоянство объема. Многочисленность требований и сложность их выполнения обусловили создание большого числа различных видов огнеупора. Поэтому правильный выбор огнеупора для строительства нагревательного устройства во многом определяет успех его работы.

Огнеупорные материалы характеризуются рабочими и физическими свойствами. К рабочим свойствам относятся: огнеупорность, механическая прочность, деформация под нагрузкой, термостойкость, шлакоустойчивость, постоянство объема.

Огнеупорность - это способность огнеупоров противостоять действию высоких температур. Огнеупорность зависит от химико-минералогического состава огнеупора. В зависимости от температуры оплавления огнеупоры делятся на 3 группы: огнеупоры ( $1580 - 1770^{\circ}\text{C}$ ), высокоогнеупорные ( $1700 - 2000^{\circ}\text{C}$ ), высшей огнеупорности (более  $2000^{\circ}\text{C}$ ). Термостойкость - это способность огнеупоров выдерживать колебания температур не разрушаясь, т.е. не образуя трещин.

Способность огнеупоров сопротивляться разрушению от химического воздействия окислы, шлаков и печной атмосферы называется шлакоустойчивость. Наиболее интенсивно огнеупоры разрушаются шлаками при высоких температурах (выше  $1200^{\circ}\text{C}$ ).

К физическим свойствам огнеупоров относятся: теплопроводность, пористость, газопроницаемость и др.

Пористость - это отношение объема пустоты ко всему объему огнеупорного изделия. Пористость выражается в процентах и колеблется в широких пределах.

Газопроницаемость - способность огнеупоров пропускать газ. Она зависит от природы огнеупорного материала, его обработки, температуры и давления.

Газопроницаемость находится в прямой зависимости от пористости огнеупора.

Огнеупоры являются плохими проводниками тепла. Теплопроводность зависит от вида огнеупора, его температуры и пористости. С повышением температуры теплопроводность большинства огнеупоров снижается.

Необходимо отметить, что все рабочие и физические свойства огнеупоров регламентированы ГОСТами.

По форме огнеупоры делятся на нормальный кирпич, клиновой и фасонные изделия.

В зависимости от химико-минералогического состава огнеупоры могут быть: кислые, в которых преобладает кислый окисел ( $\text{SiO}_2$ ); основные, в которых преобладает основной окисел ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); нейтральные, когда кислый окисел нейтрализуется основным, то есть состоящие из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; индифферентные - не имеющие ни кислых, ни основных свойств (хромистые, углеродистые, и др.).

Для футеровки нагревательных устройств применяются следующие огнеупорные изделия: шамотные, диасовые, магнезитовые, тальковые и др.

Шамотный кирпич самый распространенный огнеупорный материал, содержащий окись алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ), имеет светложелтый цвет и равномерный зернистый излом. По огнеупорности делится на три класса. Размягчается при температуре  $1360^\circ\text{C}$ , обладает высокой термостойкостью, но низкой шлакоустойчивостью. Применяется шамотный кирпич для футеровки стенок, сводов нагревательных печей, дымоходов, дымовых труб.

Диасовый кирпич изготавливают путем обжига сырца из кварцита, содержащего не менее 94 - 95% окиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Он белого или слегка желтоватого цвета, в изломе видны зерна кварца. Имеет высокую огнеупорность, деформацию под нагрузкой, достаточно стойкий к кислым шлакам. Недостатки - большое увеличение линейных размеров, плохая стойкость к основным окислам. Применяют в отдельных случаях для кладки топки, свода и стенок сварочных камер методических и полуметодических печей.

- Магнезитовый кирпич изготавливают из магнезита ( $\text{MgO}$ ), который вначале обжигают для удаления  $\text{CO}_2$ , а затем, обожженную массу, состоящую из окиси магнезии ( $\text{MgO}$ ), размалывают, смешивают с огнеупорной глиной и получают смесь для формовки кирпича. Магнезитовый кирпич имеет темно-коричневый

цвет, обладает высокой огнеустойчивостью, хорошей химической стойкостью. К недостаткам следует отнести низкую термостойкость, значительное расширение объема, разрушающее действие на шамот. Применяется для кладки ответственных элементов рабочего пространства в зонах высоких температур и пода нагревательных устройств.

Тальковый кирпич выпиливают из естественного талькового камня, а затем подвергают обжигу. Он обладает высокой огнеустойчивостью, хорошей химической стойкостью. Применяется для футеровки пода нагревательных устройств.

Хромитовый кирпич изготавливают из хромистого железняка. Обладает высокой огнеупорностью, термоустойчивостью, постоянством объема. Применяется для футеровки топочных камер, кладки стен сводов высокотемпературных печей скоростного нагрева.

Карборундовый кирпич получают из смеси чистого кварца и кокса путем обработки в электрических печах. Обладает высокой огнеупорностью, прочностью, теплостойкостью, повышенной теплопроводностью. Применяется для изготовления муфелей, нагревательных элементов электропечей сопротивления.

Для уменьшения тепловых потерь наружные стены, своды нагревательных устройств выполняют из теплоизоляционных материалов, которые должны обладать низкой теплопроводностью, достаточной теплоустойчивостью и небольшим объемным весом. К теплоизоляционным материалам относятся: легковесные огнеупоры, теплоизоляционный кирпич, шлаковые и зольные засыпки, железобетон, шлаковая вата, асбест. Шлаковые и зольные засыпки применяют только для изоляции сводов нагревательных устройств.

Кроме теплоизоляционных материалов при строительстве нагревательных устройств используют и общестроительные материалы: черные металлы в виде сортового и листового проката, строительный кирпич, бутовый камень, гравий, песок, цемент. Песок применяется для приготовления различных растворов для кладки печи. Растворы по своему составу и свойствам должны быть одинаковы с

теми материалами, из которых строится печь. В зависимости от назначения раствора определяется его состав.

#### Основы тепловой работы нагревательных устройств

- Для анализа тепловой работы нагревательного устройства и определения основных показателей служит тепловой баланс. Тепловой баланс составляется, исходя из равенства приходящего тепла в печь от отдельных источников и суммы расходуемого тепла в печи, т. е.:

$$Q_{np} = Q_{pac}$$

Приходящая часть теплового баланса складывается из следующих составляющих:

1. Тепло, полученное в результате горения топлива:

$$Q_m = B_m \cdot Q_n^p$$

где  $B_m$  - расход топлива (чаще всего искомая величина);  $Q_n^p$  - теплота сгорания топлива.

2. Тепло, вносимое подогретым воздухом (физическое тепло воздуха):

$$Q_{\epsilon} = B_m \cdot c_{\epsilon} \cdot t_{\epsilon} \cdot L_o$$

Где  $c_{\epsilon}$  - средняя теплоемкость воздуха при температуре подогрева;  $t_{\epsilon}$  - температура подогрева воздуха;  $L_o$  - действительный расход воздуха на единицу сжигаемого топлива.

3. Тепло, вносимое подогретым топливом (физическое тепло топлива):

$$Q_m = B_m \cdot c_m \cdot t_m$$

Где  $c_m$  - средняя теплоемкость топлива при температуре подогрева;  $t_m$  - температура подогрева топлива.

Тепло, выделяющееся при угаре металла:

$$Q_{\epsilon k} = 56.52 \cdot G \cdot \delta$$

Где  $G$  - весовая производительность печи;  $\delta$  - угар металла в процентах.

Расходная часть теплового баланса нагревательного устройства складывается из следующих составляющих:



Количество полезно использованного тепла (тепло истраченное на нагрев металла)

$$Q_1 = G \cdot (c_M^K \cdot t_M^K - c_M^H \cdot t_M^H)$$

где  $G$ - масса нагреваемого металла (весовая производительность печи);  $c_M^K; c_M^H$  - средняя теплоемкость металла при конечной и начальной температуре нагрева;  $t_M^K; t_M^H$  - конечная и начальная температура нагреваемого металла.

2. Потери тепла с уходящими дымовыми газами:

$$Q_2 = B_m \cdot c_g \cdot t_g \cdot V_g$$

где  $V_g$  - количество дымовых газов при сгорании единицы топлива;  $c_g$  - средняя теплоемкость дымовых газов;  $t_g$  - температура дымовых газов.

3. Потери тепла от химической неполноты горения жидкого или газообразного топлива или механической неполноты горения твердого топлива:

$$Q_3 = m \cdot B_m \cdot Q_n^p$$

где  $m$  - процент потерь от теплоты сгорания топлива при горении. Принимается до 5%.

4. Потери тепла в окружающее пространство складываются из потерь через кладку, открытие окна и потерь с охлаждающей водой: потери тепла через кладку печи:

$$Q_4^{кл} = K \cdot F_4$$

Где  $K$  - коэффициент теплопередачи теплопроводностью через свод, под, стенки печи;  $F_4$  -сумма площадей свода, пода, стенок печи;  $t_g; t_n$  - разность температур внутри и снаружи печи;

Потери тепла излучением через окна:

$$Q_4^o = C_o \cdot F_{ок} \cdot \tau \cdot f \cdot \left( \frac{T}{100} \right)$$

где  $C_o$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $F_{ок}$  - площадь окна;  $\tau$  - время, когда открыто окно;  $f$  - поправочный коэффициент на потери тепла в самом окне в зависимости от толщины стенки,  $T$  - температура печи по Кельвину;

Потери тепла с охлаждающей водой

$$Q_4^s = D \cdot c_{вод} \cdot (t_2 - t_1)$$

Где  $D$  – расход охлаждающей воды;  $c_{вод}$  – теплоемкость воды;  $(t_2 - t_1)$  – разность температур, выходящей и входящей воды.

5. Потери тепла на разогрев кладки при неустановившемся режиме:

$$Q_5 = \frac{V_{кл} \cdot \rho_{кл} \cdot c_{кл} \cdot (t_{кл}^H - t_{кл}^K)}{\tau_{раз}}$$

Где  $V_{кл}$  – объем кладки;  $\rho_{кл}$  – плотность материала кладки;  $c_{кл}$  – теплоемкость материала кладки,  $(t_{кл}^K - t_{кл}^H)$  – усредненная разность конечной и начальной температуры кладки  $\tau_{раз}$  – продолжительность разогрева кладки.

б. Неучтенные потери тепла, к которым относятся потери через форсуночные отверстия, неплотности закрытия заслонок и др., принимаются до 10% от теплоты сгорания расходуемого топлива.

После определения всех составляющих приходящего и расходуемого тепла для подстановки их в уравнения теплового баланса можно найти расход топлива или выполнить анализ тепловых потерь для улучшения использования топлива и работы нагревательного устройства в целом.

Основные показатели работы печи

К основным показателям работы нагревательных устройств относятся: производительность, удельный расход топлива и коэффициент полезного действия.

Производительность нагревательного устройства определяется весом нагреваемого металла и рассчитывается по формуле:

$$G = \frac{K_{под} \cdot F_{под} \cdot g}{f \cdot \tau}$$

Где  $K_{под}$  – коэффициент загрузки пода печи;  $F_{под}$  – площадь пода печи;  $g$  – масса нагревательной заготовки;  $f$  – проекция нагреваемой заготовки на под печи;  $\tau$  – продолжительность нагрева.

Однако, для сравнительной оценки работы нагревательных печей служит удельная производительность или напряженность пода печи, которая определяется отношением:

$$P = \frac{G}{F_{\text{под}}}$$

Напряженность пода печи - это количество металла, нагреваемого на одном квадратном метре площади пода печи за один час.

Величина напряженности пода печи является определяющим фактором при оценке экономичности работы нагревательного устройства.

Вторым важным показателем работы нагревательного устройства является расход топлива, который зависит от конструкции печи, напряженности пода, степени использования тепла уходящих газов. Показателем использования тепла в нагревательных устройствах является удельный расход топлива (условного топлива), который определяется по формуле:

$$b = \frac{B_m \cdot Q_n^p}{Q_{\text{yn}} \cdot G}$$

где  $Q_{\text{yn}}$  - теплота сгорания условного топлива, которая равна 29330 КДж/кг.

Различают удельный расход топлива "нетто" и "брутто". Удельный расход топлива "нетто" - это расход топлива при установившемся режиме работы нагревательного устройства, т.е. без учета расхода топлива на разогрев, холостую работу печи. Он позволяет сравнивать в теплотехническом отношении различные нагревательные устройства одинакового назначения.

Удельный расход топлива "брутто" позволяет оценить экономичность работы в реальных условиях эксплуатации, т.е. учитывает весь процесс работы печи. При хорошей организации работы в кузнечном цехе удельный расход топлива "брутто" не должен превышать удельный расход топлива "нетто" больше чем на 30% [1].

Существенное влияние на удельный расход топлива оказывает напряженность пода. С увеличением напряженности пода печи уменьшается удельный расход топлива.

Коэффициент полезного действия нагревательного устройства (термический) есть отношение количества тепла, полученного металлом к количеству тепла, полученного в результате сжигания топлива:

$$\eta = \frac{Q_m}{Q_t}$$

Значения коэффициента полезного действия колеблются в широких пределах в зависимости от размеров и особенности нагревательного устройства, условий его эксплуатации. КПД для камерных печей колеблется от 8 до 20%, а методических и полуметодических - от 15 до 40%.

## Лекция № 8

План лекции: Основы проектирования нагревательных устройств. Повышение эффективности работы нагревательных устройств.

### Основы проектирования нагревательных устройств

Современное нагревательное устройство представляет собой сложный тепловой агрегат, состоящий из собственно нагревательной печи и вспомогательных устройств для ее обслуживания. Главная часть нагревательного устройства - это рабочая камера, где осуществляется нагрев металла. Поэтому при проектировании нагревательного устройства необходимо учитывать следующие основные положения:

во-первых, нагрев заготовок под ковку и штамповку один из ответственных этапов в получении качественных поковок;

во-вторых, необходимо не только разбираться в конструкции нагревательного устройства, но и хорошо знать протекающие в нем процессы.

Правильный выбор вновь проектируемого нагревательного устройства определяет степень использования основного кузнечного оборудования. Поэтому при выборе конструкции нагревательного устройства решающими факторами являются: способ изготовления поковок; характер производства; вид нагреваемого материала, его форма и размеры; вид энергоносителя.

Так в индивидуальном и мелкосерийном производствах, где основным технологическим процессом являетсяковка, нагревательные устройства должны обладать универсальностью, так как размеры и формы нагреваемых заготовок изменяются в широких пределах. Наиболее полно этим требованиям отвечает камерная печь, однако, периодичность загрузки в какой-то степени снижает эффективность основного кузнечного оборудования. В случае нагрева крупных заготовок и слитков целесообразно устанавливать методические печи.

В крупносерийном и массовом производствах, где основным технологическим процессом является горячая штамповка, применяют механизированные, как камерные, так и методические нагревательные печи. Так, при штамповке на ГКМ нагрев заготовок и прутков целесообразно осуществлять в щелевых и очковых или механизированных печах конвейерного типа.

Многообразие технологических процессов изготовления поковок требует в каждом конкретном случае индивидуального подхода к выбору конструкции нагревательного устройства.

После выбора конструкции нагревательного устройства выполняется его расчет. Для выполнения расчета необходимо задание, которое должно включать: производительность печи в (кг/час) или количество заготовок нагреваемых в час; марку материала нагреваемых заготовок, их массу и размеры; температуру нагрева металла; вид топлива.

Расчет нагревательного устройства выполняется в следующей последовательности:

1. Расчет процесса горения топлива с определением количества и состава продуктов горения, температуры горения топлива и анализа возможности использования данного топлива для нагрева металла, т.е. обеспечивает ли данное топливо необходимую температуру нагреваемому материалу;

Расчет продолжительности нагрева заготовок. Для этого необходимо знать способ размещения заготовок на поду нагревательного устройства и теплофизические свойства нагреваемого материала. Затем определяем критерии

Био и исходя из этого значения, выбираем необходимую методику расчета продолжительности нагрева и перепада температуры по сечению заготовки; Определение размеров рабочего пространства нагревательного устройства. Рабочая камера должна удовлетворять двум основным требованиям; длина и ширина пода должны обеспечивать заданную производительность, а высота должна быть такой, чтобы обеспечивалось полное сгорание топлива и интенсивный теплообмен между дымовыми газами и нагреваемым металлом. Размеры пода печи зависят от продолжительности нагрева, и поэтому по заданной производительности и рассчитанной продолжительности определяется количество заготовок, одновременно находящихся в печи [1]:

По вычисленной ширине и длине определяется площадь пода нагревательного устройства. Высоту рабочего пространства нагревательного устройства находим по формуле [15]:

$$H = H_1 + h_{\text{заг}}$$

Где  $H_1$  - высота рабочего пространства над заготовками, которая определяется в зависимости от ширины пода и температуры дымовых газов:

$$H_1 = 0.001 \cdot (0.6 + 0.05 \cdot B) \cdot t_{\text{г}}$$

$h_{\text{заг}}$  - высота заготовки; для цилиндрических заготовок равна диаметру.

4. Составление эскиза нагревательного устройства с указанием толщины кладки пода, стен и свода; габаритных размеров печи; выбранных огнеупорных и теплоизоляционных материалов. На эскизе указываются места расположения топливосжигающих устройств, рабочих и кантовочных окон, каналов для отвода продуктов горения. Кроме этого указывается тип и место установки рекуператора или регенератора и наносятся элементы каркаса нагревательного устройства.

Расчет теплового баланса нагревательного устройства, который необходим для определения расхода топлива.

Определение основных показателей работы нагревательного устройства.

Выбор типа контрольно-измерительных и регулирующих приборов и схем автоматики.

При проектировании необходимо предусмотреть удобство обслуживания и управления работой нагревательного устройства, а также меры по технике безопасности.

Повышение эффективности работы нагревательных устройств

Эффективность работы нагревательного устройства связана с производительностью, тепловым коэффициентом полезного действия, удельным расходом топлива и уменьшением потерь металла на угар.

Повышение эффективности тепловой работы нагревательных устройств возможно за счет сокращения непроизводительных процессов, модернизации и замены устаревших топливосжигающих устройств, автоматизации, улучшения теплоизоляции и главным образом осуществления рекуперации и утилизации тепла уходящих дымовых газов [17].

Тепло уходящих дымовых газов может быть утилизировано в различных теплоиспользующих устройствах: рекуператорах, регенераторах, котлах - утилизаторах, водонагревателях.

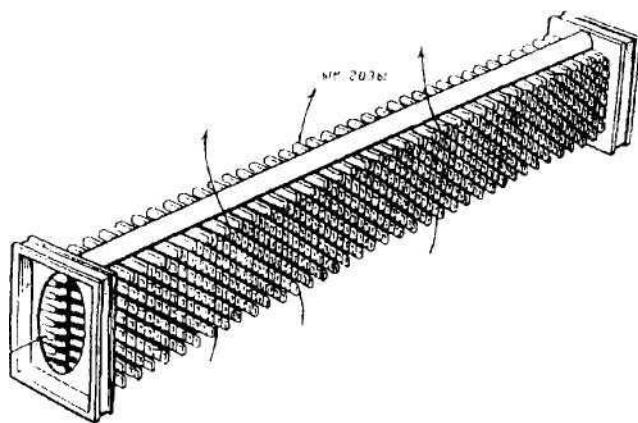
В нагревательных устройствах кузнечно-штамповочного производства используются в основном рекуператоры, позволяющие за счет подогрева воздуха, поступающего на горение топлива, сократить расход топлива, совершенствовать технологию нагрева металла, уменьшая угар, и несколько улучшить воздушную атмосферу на рабочих местах.

Рекуператоры - это теплообменные аппараты или устройства с непрерывным движением дымовых газов через систему каналов, а через другую систему каналов течет тепловоспринимающий поток (воздух или топливо). Передача тепла от одного движущегося потока к другому осуществляется через разделяющую стенку. По материалу изготовления рекуператоры могут быть керамическими и металлическими. В керамических рекуператорах подогрев воздуха осуществляется до температуры 800 - 1100°C, а в металлических до температуры 600 - 800°C. Однако применение керамических рекуператоров несколько ограничено из-за низкой газоплотности и их громоздкости.

При подогреве воздуха до температуры не выше 350 - 400°C рекуператоры можно изготавливать из серого чугуна или углеродистой стали. При более высоких температурах (600 - 800°C) подогрева рекуператоры изготавливают из жаропрочных сталей. Благодаря высокому коэффициенту теплопередачи, металлические рекуператоры компактны, герметичны, что позволяет использовать их и для подогрева топлива. Кроме того, металлические рекуператоры можно применять в нагревательных устройствах с низкой температурой уходящих дымовых газов (500 - 600°C), что расширяет область их применения.

По конструкции металлические рекуператоры можно классифицировать на трубчатые, игольчатые, типа термоблок, радиационные.

Трубчатые рекуператоры изготавливаются из гладких стальных труб диаметром от 15 до 100 мм с толщиной стенки 2 - 5 мм. Подогреваемый воздух в них движется внутри труб, а дымные газы - снаружи. Устанавливают эти рекуператоры на крупных нагревательных печах, они просты в изготовлении, недороги, легко доступны для замены.



Основным элементом игольчатого рекуператора является чугунная труба овального сечения с наружными и внутренними иглами (рис.10).

Рис.10. Труба игольчатого рекуператора

Воздух движется внутри трубы, а дымовые газы омывают трубу снаружи. Трубы нормализованы и выпускаются длиной 880, 1135 и 1640 мм. Двухсторонние игольчатые трубы выпускаются двух типов: 17.5 и 28, что соответствует расстоянию между осями игл на наружной стороне, конструкция внутренней



игольчатой поверхности одинаковая для всех типов труб. Из труб собирают вначале секции, а затем из секций собирают рекуператор. Секция, через которую воздух проходит один раз, называется "ходом". Выбор числа "ходов" игольчатого рекуператора определяется давлением дутья, температурой подогрева воздуха и возможностью компактного соединения труб. Игольчатые рекуператоры могут быть одно-, двух-, трех- и четырехходовыми. Для нагрева воздуха до  $200^{\circ}\text{C}$  обычно используют одноходовой игольчатый рекуператор. Основным недостатком игольчатых рекуператоров является недостаточная герметичность, возрастающая с увеличением количества труб в них. Устанавливают их в методических и полуметодических печах, работающих с относительно невысокой температурой уходящих дымовых газов.

Рекуператоры типа термоблок представляют собой пространственную решетку стальных труб диаметром 12 - 18 мм (для воздуха) и 25 - 30 мм (для дымовых газов), пространство между которыми залито чугуном. Монолитная конструкция термоблока обеспечивает достаточную газоплотность, однако, она обладает большой относительной массой. Поэтому рекуператоры типа термоблок устанавливают на малых камерных печах с температурой дымовых газов порядка  $1200 - 1300^{\circ}\text{C}$ .

Радиационные рекуператоры по конструкции могут быть щелевые и трубчатые [17]. Щелевые радиационные рекуператоры состоят из двух концентрических цилиндров. Внутренний цилиндр изготавливают из жаростойких сталей, а наружный - из углеродистых (рис. 11).

Дымовые газы, проходя по внутреннему цилиндру со скоростью 0,5-20 м/с, нагревают стенку излучением и конвекцией, а она излучает тепло на наружный цилиндр. Воздух движется со скоростью 20 - 40 м/с в кольцевой щели между внутренним и наружным цилиндрами и нагревается только за счет конвекции. Ширина кольцевой щели от 10 до 70 мм. На концах рекуператора устанавливаются коробки, через одну из которых подводится холодный воздух, а через другую отводится нагретый воздух. Основным преимуществом радиационных рекуператоров является то, что они способны длительное время

эксплуатироваться при высоких температурах продуктов горения (до 1400 - 1500°С) и подогревать воздух до 800°С и более. Поэтому радиационные рекуператоры используются в нагревательных печах с высокой температурой уходящих дымовых газов.

Эффект тепловой работы рекуперативных нагревательных печей во многом определяется правильным выбором типа рекуператора и местом его установки. Выбор рекуператора определяется размерами нагревательного устройства и его конструктивными особенностями, определяющими место установки, температурой нагрева воздуха и видом топлива. Место установки рекуператора определяется системой отвода дымовых газов и нагревательного устройства.

Расчет рекуператора в общем случае сводится к определению поверхности нагрева. Исходными данными для расчета рекуператора являются: часовой расход топлива  $B_{\text{ч}}$ ; количество нагреваемого воздуха; температура воздуха начальная и конечная; количество дымовых газов; температура газов при выходе из нагревательного устройства. Поверхность нагрева рекуператора определяется по формуле [1]:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t}$$

Где  $Q$  - количество тепла, передаваемого воздуху в рекуператоре;  $k$  - средний коэффициент теплопередачи;  $\Delta t$  - средняя логарифмическая разность температур.

Компоновка элементов в рекуператоре представляет собой конструкторскую задачу, которая должна решаться с учетом конкретных условий.

## Лекция № 9

План лекции. Электронагрев – сущность процесса. Преимущества и недостатки электронагрева. Область применения. Нагрев в печах электросопротивления. Нагрев в электролите.

## ЭЛЕКТРОНАГРЕВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Электронагрев металлов - это один из прогрессивных методов нагрева, соответствующий достижению лучших показателей работы основного кузнечно-прессового оборудования. При этом значительно улучшаются условия труда и повышается культура производства.

Применение электрической энергии для нагрева металлов началось с 1803 года, когда была опубликована работа русского академика В.В. Петрова. Однако в то время в условиях незначительной выработки электроэнергии не было возможностей для промышленного развития электронагрева. И только во второй половине XX века стало возможным использование электрической энергии в различных электротермических процессах, в том числе и в кузнечно-штамповочном производстве.

Применение электронагревательных устройств для нагрева заготовки под ковку и штамповку обусловлено рядом преимуществ электронагрева:

сокращение продолжительности нагрева, значительное снижение окалинообразования и отсутствие обезуглероживания;

улучшение качества (равномерности) нагрева;

возможность более точного регулирования температурного режима и процесса нагрева в целом;

возможность получения в рабочем пространстве любой атмосферы (нейтральной, восстановительной);

высокий коэффициент полезного действия установок;

- уменьшение габаритных размеров нагревательных устройств, что приводит к сокращению производственных площадей;

- легкость механизации и автоматизации управления работой всей установки.

Названные преимущества электронагрева проявляются в различной степени в зависимости от способа электронагрева, размеров и материала заготовок. Однако нагрев в электронагревательных установках обходится дороже, чем в пламенных печах из-за высокой стоимости электрической энергии.

В настоящее время в кузнечном производстве наиболее широко используются следующие способы косвенного и сквозного электронагрева:

нагрев в электрических печах сопротивления;

нагрев в электролите;

электроконтактный нагрев;

индукционный нагрев.

Нагрев в электрических печах сопротивления

В электрических печах сопротивления металл нагревается за счет передачи тепла от нагревательных элементов и кладки печи излучением, а выравнивание температуры по сечению заготовок происходит за счет теплопроводности металла, т.е. процессы нагрева в электрических печах сопротивления сходны с процессами нагрева в пламенных печах.

Электрические печи сопротивления получили широкое распространение для нагрева стальных изделий под термическую обработку и цветных металлов и сплавов под последующую пластическую деформацию (прессование, штамповку). Основными преимуществами электропечей косвенного нагрева являются: возможность равномерного нагрева при соответствующем расположении нагревательных элементов; удобство автоматического регулирования температурного режима; возможность применения защитных атмосфер и средств механизации загрузки, выдачи и перемещения заготовок в печи. Однако эти печи имеют ряд недостатков таких, как затраты электроэнергии на разогрев печи; относительно низкий коэффициент полезного действия по сравнению с индукционным и контактным нагревом.

Электрическая энергия в печах сопротивления преобразуется в тепловую с помощью нагревательных элементов. Нагревательные элементы изготавливаются из металлических, металлокерамических и карбидокремниевых материалов.

Металлические электронагревательные элементы изготавливают из сплавов, имеющих высокое электрическое сопротивление - нихромы (с рабочей температурой 800 - 1100°C). По конструкции эти элементы могут быть в виде

спирали, изготовленной из проволоки диаметром 3-15 мм, или зигзагообразные из ленты толщиной более 1 мм и шириной до 10 толщин. Диаметр спирали, шаг, высоту зигзагов выбираем из соображений их механической прочности при рабочей температуре и рациональном размещении на внутренней поверхности кладки печи. Для нихромовой проволоки отношение диаметра спирали к диаметру проволоки следует принимать не более 6-8, а для фехралей - 4 - 6. Шаг спирали принимается равным примерно два диаметра проволоки.

Металлокерамические нагреватели изготавливают из дисилицида молибдена ( $\text{MoSi}_2$ ). Нормальный интервал рабочих температур этих нагревателей составляет 1400 - 1450°C. Максимально допустимая температура может быть до 1700°C. С повышением температуры нагревателя от нормальной температуры и выше электрическое сопротивление возрастает в 12 раз.

Карбидкремниевые (карборундовые) нагреватели ( $\text{SiC}$ ) используются при температуре печи не выше 1400°C, что соответствует температуре нагревателя 1450 - 1500 °C. При нагреве удельное электрическое сопротивление этих нагревателей снижается. Отрицательное свойство карборунда - это склонность к старению, что приводит к увеличению сопротивления.

По конструкции электропечи сопротивления самые разнообразные. Однако их можно классифицировать по температуре нагрева: низкотемпературные (<700°C ), среднетемпературные (700 - 1250°C), высокотемпературные (больше 1250°C). В кузнечном производстве чаще применяется средне- и высокотемпературные электропечи. В этих печах теплопередача происходит главным образом за счет излучения.

Среднетемпературные электропечи выполняют с металлическими элементами сопротивления в виде проволочных спиралей или ленты. Они бывают камерные, шахтные и проходные. Проходные могут быть толкательные, конвейерные, с вращающимся подом. Используются эти электропечи для нагрева заготовок и слитков из цветных металлов и сплавов под обработку давлением.

Высокотемпературные электропечи выполняют с металлокерамическими и карборундовыми нагревателями. Печи могут быть как камерными, так и методическими и работать с защищенной атмосферой. Высокотемпературные электропечи применяются для нагрева мелких и средних стальных заготовок под горячую штамповку.

Расчет электрических печей сопротивления включает определение размеров рабочего пространства, тепловой мощности печи и размер нагревательных элементов.

Размеры пода электропечи определяются по тем же формулам, что и для пламенных печей.

Мощность электропечи находим по формуле:

$$N = Q_{рас} \cdot K \text{ кВт},$$

Где  $Q_{рас}$  - общий расход тепла, который определяется путем составления теплового баланса печи:

Расчет элементов сопротивления является основной частью расчета электрической печи сопротивления. Исходными величинами для расчета нагревательных элементов являются мощность электропечи; напряжение питающей сети; температура нагрева металла; количество фаз и групп нагревательных элементов, а также схема включения нагревателей. Методика расчета нагревателей электропечей сопротивления состоит в следующем:

определяют мощность, приходящуюся на один элемент:

$$N_{эл} = \frac{N}{n \cdot m}$$

находят реальную удельную поверхностную мощность нагрева-

$$W = a \cdot W_u,$$

где  $W_u$  - идеальная удельная поверхностная мощность на нагревание, которая определяется по графикам в зависимости от металла, степени черноты поверхности и температуры нагрева;  $a$  - коэффициент, который зависит от материала нагревателей, конструкции и размещения нагревателей в печи, температуры нагрева.

Затем выбирают материал нагревательного элемента и его характеристики - удельное сопротивление при максимальной температуре. Таким образом, зная все параметры, можно определить диаметр (или толщину) и длину нагревателей.

#### Нагрев в электролите

Для нагрева заготовок перед обработкой давлением используют электролитические (соляные) ванны. Принцип нагрева металла таким способом заключается в следующем (рис. 12).

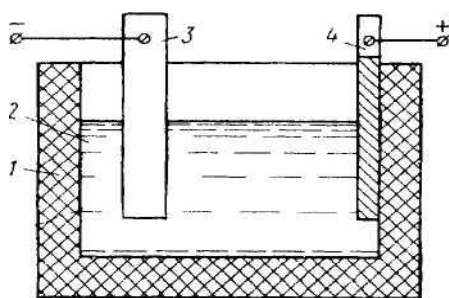


Рис. 12. Схема нагрева заготовки в электролите

В ванну 1 с электролитом 2, в качестве которого используются растворы солей (хлористого бария  $BaCl_2$  и хлористого натрия  $NaCl$ ), помещается нагреваемая заготовка 3, являющаяся катодом. Анодом - специальный электрод 4. При пропускании через электролит тока необходимой плотности достигается сравнительно быстрый нагрев заготовок в расплавленном растворе солей.

Протекание через электролит постоянного тока напряжением 200 - 250 В сопровождается выделением на поверхности заготовки газообразного водорода, проводимость которого ниже проводимости электролита, что способствует

повышенному выделению тепла в газовой оболочке, а следовательно, и в заготовке.

Эффективный нагрев заготовки достигается за счет того, что ее площадь значительно меньше площади анода, следовательно, плотность тока в заготовке будет больше, температура и скорость нагрева зависит от состава и концентрации электролита, его температуры, величины подводимого напряжения, соотношения поверхностей катода и анода.

Установлено, что интенсивность нагрева заготовки увеличивается с повышением температуры электролита от 25° до 50°С ; при дальнейшем повышении температуры интенсивность нагрева не увеличивается. Поэтому обычно температура электролита поддерживается в пределах 30 - 50°С с точностью 5 - 10 °С специальной системой охлаждения. Если концентрация и температура электролита поддерживаются постоянными, то режим нагрева регулируется за счет подводимого напряжения и продолжительности нагрева.

Очевидно, что до заданной температуры нагревается та часть заготовки, которая погружается в электролит (непогружаемая часть заготовки нагревается за счет теплопередачи теплопроводностью и имеет меньшую температуру). Это позволяет осуществлять местный нагрев концов заготовки. Торцевая часть погруженной заготовки в электролит подвергается более интенсивному нагреву за счет большей плотности тока, что может привести к неравномерному нагреву заготовки. С увеличением длины нагреваемой части неравномерность нагрева становится существенной и для устранения этого явления применяют нагрев с экранированием. В качестве экранов используются изоляционные материалы (огнеупоры, фторопласт). Экранирование позволяет выравнивать температуру нагрева как при большой глубине погружения, так и при нагреве заготовок сложной формы.

Нагрев заготовок может осуществляться в соляных электропечах переменного тока. В них заготовка нагревается в расплавленном электролите, температура которого достигает 1300°С за счет прохождения электрического тока. В зависимости от конструкции и мощности печи принимается однофазная или



трехфазная схема питания переменным током. Электроды, к которым подводится напряжение, вводятся в ванну через футеровку.

Однако нагрев заготовок в электролите и соляных печах имеет ряд недостатков: повышенный удельный расход электроэнергии на единицу нагреваемого металла; низкая стойкость электродов.

Несмотря на недостатки этот способ нагрева применяется в кузнечно-штамповочном производстве особенно при нагреве инструментальных, жаропрочных и других специальных сталей, так как обеспечивает практически безокислительный нагрев, высокую скорость и равномерность нагрева, пленка соляного раствора на заготовке предохраняет ее от окисления не только при нагреве, но и при передаче к основному кузнечному оборудованию и обработке давлением, сравнительно простой контроль температуры и продолжительности нагрева, возможность автоматизации подачи и выгрузки заготовок.

#### Лекция № 10

План лекции: Электроконтактный нагрев – сущность процесса. Электроконтактные установки и их классификация. Расчет электроконтактного нагрева. Индукционный нагрев – сущность процесса. Основные элементы индукционной установки. Выбор способа нагрева заготовок под ковку и штамповку

#### Электроконтактный нагрев

За последние годы достаточно широкое применение в кузнечно-штамповочном производстве получил метод сквозного электроконтактного нагрева. Электроконтактный нагрев - это технологический процесс сквозного нагрева заготовки за счет тепловой энергии протекающего по металлу электрического тока. Количество тепла, выделившегося в заготовке в соответствии с законом Джоуля-Ленца, может быть определено

по формуле [1]:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau$$

Где  $I$  - сила тока, А;  $R$  - сопротивление заготовки, Ом;  $\tau$  - продолжительность нагрева, с.

Схема установки для контактного электронагрева заготовок под штамповку показана на рис. 13,

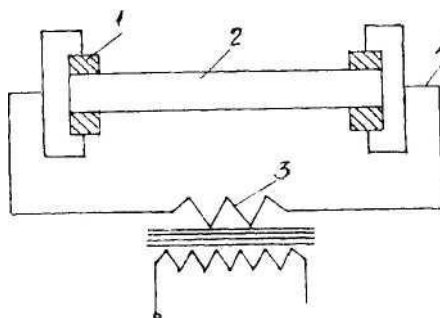


Рис.13. Схема установки электроконтактного нагрева [1]: 1 - контакты; 2 - заготовка; 3 - трансформатор; 4 - подводящие провода

Установка питается переменным током промышленной частоты. Применение трансформатора позволяет регулировать и получать требуемое напряжение на нагреваемой заготовке при больших значениях силы тока в ней. Заданная температура заготовки измеряется фотопирометром и при достижении ее, ток автоматически отключается. После нагрева заготовка специальным приспособлением выталкивается из контактов [22].

В зависимости от требуемой производительности электроконтактная установка может быть многопозиционной с последовательным или параллельным включением заготовок в нагревательную цепь [18].

Технически целесообразно применять установки с последовательным включением нагревательных позиций в цепь, так как процесс нагрева легко

поддается автоматизации. Кроме того, такие нагрузки на контакты значительно меньше, чем при других схемах включения.

При электроконтактном нагреве независимо от схемы включения нагревательных позиций большое значение имеет число контактов или точек подвода тока к каждому концу нагреваемой заготовки, так как величина токовой нагрузки оказывает существенное влияние на процесс нагрева. Чем больше точек подвода тока к заготовке, тем лучше технологические показатели нагрева.

Электроконтактный нагрев применяется в крупносерийном и массовом производстве при нагреве пруткового материала диаметром до 70 мм и отношением длины к квадрату диаметра заготовки равным и больше единицы. К недостаткам этого нагрева относят трудность в достижении равномерного нагрева концов заготовок, зажатых в медные или медно-графитовые контакты [15].

На процесс электроконтактного нагрева существенное влияние оказывают магнитная проницаемость и удельное электросопротивление нагреваемого материала, так как они влияют на электросопротивление заготовки, а следовательно, и на количество тепла, выделившегося в ней при прохождении тока.

Влияние магнитной проницаемости объясняется следующим: толщина поверхностного слоя заготовки, в котором концентрируется ток, тем меньше, чем больше магнитная проницаемость. Обычно толщина поверхностного слоя, по которому идет ток, равна глубине проникновения тока:

Глубина проникновения тока зависит от удельного электросопротивления и магнитной проницаемости, которые, в свою очередь, зависят от температуры. Так, при достаточно высоких температурах (близких к температуре потери металлом магнитных свойств) магнитная проницаемость уменьшается, в то время как удельное электросопротивление углеродистых сталей резко возрастает с ростом температуры.

При электроконтактном нагреве заготовка нагревается неравномерно по сечению. Это связано с неравномерностью распределения переменного тока

вследствие поверхностного эффекта, т.е. плотность тока по сечению заготовки неодинаковая и изменяется в зависимости от температуры. Толщина поверхностного слоя, по которому идет ток, равна глубине проникновения тока. В начале нагрева ток сосредоточен в тонком поверхностном слое, который в результате значительной плотности тока быстро нагревается, а внутренняя зона заготовки остается холодной, т.е. возникает значительный перепад температур. С повышением температуры возрастает глубина проникновения тока, что приводит к более равномерному распределению тока по сечению и, кроме того, теплота от нагретого поверхностного слоя за счет теплопроводности передается в более глубокие слои заготовки. В результате температура внутренней зоны быстро возрастает и сравнивается с температурой поверхностного слоя. Очевидно, разность температур по сечению заготовки сильнее сказывается с увеличением диаметра заготовки, при повышении удельной тепловой энергии и уменьшении продолжительности нагрева. Таким образом допустимый перепад температур обуславливает скорость электроконтактного нагрева.

При электроконтактном нагреве неравномерность распределения температуры наблюдается не только по сечению заготовки, но и по ее длине. Как правило, средняя часть заготовки нагревается равномерно, а температура ее концов и мест под контактами значительно отличается от средней части. Распределение температуры по длине заготовки зависит от материала и размеров заготовки; материала, формы и качества обработки поверхности контактов; усилия прижима и интенсивности охлаждения контактов; расположения концов заготовки в зажимных контактах. Повышение сопротивления и плотности тока в контактной зоне, а следовательно, выделение теплоты под контактами приводит к повышению температуры концов заготовки и вызывает необходимость интенсивного охлаждения контактодержателей, которые должны изготавливаться из материалов с высоким коэффициентом теплопроводности. Увеличение давления на контакты и повышение чистоты соприкасающихся

поверхностей контакта и заготовки приводят к снижению температуры в контактной зоне.

Таким образом, электромагнитные характеристики нагреваемых заготовок оказывают влияние на режим нагрева.

Эффективность электроконтактного нагрева во многом зависит от конструкции установки и ее характеристик, которые делятся на электрические и технологические.

К электрическим характеристикам электроконтактных установок относятся: мощность нагреваемой установки; сила тока в нагрузке: напряжение на нагрузке и коэффициент мощности. Мощность нагреваемой установки определяют из условия равенства тепловой энергии, необходимой для нагрева массы металла до заданной температуры, и тепловой энергии электрического тока, выделяемой в ней. Полная мощность, потребляемая из сети электроконтактной установкой, может быть определена по формуле [18]:

$$W = \frac{c \cdot n \cdot (t_k - t_n)}{\eta \cdot \tau \cdot \cos \varphi}$$

Изменение мощности в процессе нагрева определяется зависимостью теплоемкости и электросопротивления нагреваемого металла от температуры. Разница значений между начальной и конечной мощностью в процессе нагрева зависит как от вида нагреваемого материала, размеров заготовки и времени нагрева, так и от режима нагрева и числа позиций установки.

При электроконтактном нагреве сила тока, потребляемая из сети, и сила тока, протекающего по нагреваемой заготовке, различны. Для надежности работы установки при заданной производительности необходимо стремиться к тому, чтобы оба тока были минимальные. Сила тока в нагреваемой заготовке должна быть больше при минимальном токе, потребляемом из сети. Сила тока существенно изменяется в процессе нагрева, особенно на однопозиционных установках, причем в начале нагрева она имеет наибольшее значение. Разница между начальной и конечной силой тока зависит от поперечного сечения

нагреваемой заготовки, конструктивного устройства электрической вторичной цепи, а также от конструкции трансформатора.

Для нагрева заготовки с заданной скоростью и производительностью к ней должно быть подведено определенное электрическое напряжение, значение которого зависит от физических параметров материала, геометрических размеров заготовки и продолжительности нагрева. Напряжение увеличивается к концу нагрева при росте удельного электросопротивления. В то же время напряжение на нагрузке пропорционально длине заготовки и не зависит от поперечного сечения. За счет повышения напряжения на заготовке без увеличения силы тока можно существенно повысить производительность электроконтактной установки.

Коэффициент мощности является важным техническим показателем всей установки, так как он характеризует ее с энергетической точки зрения, и зависит от большого числа факторов не только физического, но и конструктивного характера, то есть: типа заготовки, типа конструкции силового трансформатора, конструкции установки, особенно ее электрической части. Коэффициент мощности электроконтактной установки определяется по формуле [18]:

$$\cos\varphi = \frac{r_m}{z_m}$$

Коэффициент мощности повышается к концу нагрева и изменяется в больших пределах тем быстрее, чем меньше поперечные размеры нагреваемой заготовки.

К основным технологическим параметрам электроконтактных установок относятся: скорость нагрева, производительность, коэффициент полезного действия.

Скорость нагрева заготовок при электроконтактном нагреве имеет определенный предел, который зависит от допускаемого перепада температур по сечению и длине нагреваемой заготовки, т.е. неравномерности нагрева. Температурный перепад по сечению и длине нагреваемой заготовки зависит от многих факторов: электромагнитных и тепловых характеристик заготовки,

силы тока давления на контакты, типа и материалов контакта, интенсивности их охлаждения и остояния контактных поверхностей.

Производительность электроконтактных установок зависит от числа позиций в установке, времени нагрева заготовки и времени, затрачиваемого на операцию замены нагретой заготовки холодной.

Коэффициент полезного действия установки можно представить следующим образом [19]:

$$\eta = \eta_{mp} \cdot \eta_z \cdot \eta_t$$

Для выбора и эксплуатации электроконтактных нагревательных установок достаточно воспользоваться зависимостью общего КПД от отношения длины нагреваемой заготовки к квадрату его диаметра. Установки электроконтактного нагрева, применяемые в машиностроении, можно классифицировать по трем признакам: по электрическим схемам; по технологически процессам, осуществляемым на них; по конструктивному устройству.

По электрическим схемам электроконтактные нагревательные установки могут быть однофазные и трехфазные. При однофазной схеме нагрузкой таких установок может быть одна заготовка или несколько заготовок, включенных последовательно и состоящих из двух и более нагреваемых зон заготовки.

Электроконтактные трехфазные четырехпозиционные установки, нагрузку которых составляет четыре нагреваемых заготовки, одна из которых служит нулевым проводом при соединении остальных трех в звезду, находят широкое применение в различных отраслях машиностроения. В этих установках первичная обмотка трансформатора может быть соединена как в звезду, так и в треугольник. По какой схеме включать трансформатор зависит от типа нагреваемых заготовок. Важно чтобы установка обеспечивала широкие пределы регулирования вторичного напряжения трансформатора.

По технологическому процессу электроконтактные установки могут быть разделены на четыре группы.

К первой группе относятся установки обособленного нагрева, т.е. установки, где происходит только нагрев заготовок, а последующая обработка их продолжается на другом оборудовании.

Вторую группу составляют установки, в которых операция нагрева совмещена с последующей обработкой давлением, но смещена во времени. К этой группе относятся полуавтоматы для изготовления коленчатых валов комбайнов, швейных машин [18].

К третьей группе относятся установки, в которых операции нагрева совмещаются с операциями обработки давлением в пространстве и времени. К этой группе относятся электровысадочные машины.

Четвертую группу составляют установки непрерывного нагрева без выключения тока при движении нагреваемой заготовки в неподвижно закрепленных контактах.

По конструктивному устройству электроконтактные установки могут быть самыми разнообразными, в которых в различном сочетании применяются электрические схемы и технологические процессы.

Расчет электроконтактных нагревательных установок заключается в определении продолжительности нагрева заготовок, производительности установки, параметров, необходимых для подбора или конструирования силового трансформатора.

Исходными данными для расчета являются: материал и размеры заготовок, подлежащих нагреву; температура нагрева заготовок; допускаемое время пауз, режим работы установки и напряжения сети, питающей ее.

Продолжительность нагрева заготовок:

$$\tau = \frac{0.32 \cdot d^2 \cdot \rho \cdot c \cdot (t_k - t_n)}{N}$$

где  $d$  - диаметр заготовки в м;  $c$  - средняя теплоемкость металла при заданной температуре нагрева;  $\rho$  - плотность металла заготовки;  $t_k$  и  $t_n$  - конечная и начальная температура нагрева;  $N$  - оптимальная электрическая мощность



подводимая к заготовке (принимается равной 16.7 - 25 кВт).

Производительность электроконтактной установки:

$$П = \frac{3.6 \cdot n \cdot G}{\tau_n + \tau_m}$$

где п - число позиций установки; т,, - время, затраченное на операцию замены нагретой заготовки холодной.

Исходными параметрами, необходимыми для подбора или конструирования силового трансформатора, являются мощность трансформатора и среднее напряжение, подводимое к заготовке.

Расчетная мощность силового трансформатора:

$$P_{рас} = \frac{0.42 \cdot l \cdot d \cdot \rho \cdot c \cdot (\tau_n + \tau_m)}{\tau_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi}$$

Величина среднего напряжения, подводимого к заготовке:

$$U_{cp} = 7.07 \frac{l}{\eta \cdot \sqrt{\tau_n}}$$

После выполняемых расчетов производится конструирование электроконтактной установки и разрабатывается техническая характеристика.

### Индукционный нагрев

При индукционном способе заготовки нагреваются за счет введения тепла непосредственно в металл при прохождении по нему электрического тока, который передается за счет явления электромагнитной индукции.

Процесс индукционного нагрева заключается в следующем: если проводник (заготовку) поместить внутри катушки (индуктора), по виткам которой протекает переменный ток, то создаваемое катушкой переменное магнитное поле будет проходить через заготовку, индуцируя в ней электродвигающую силу (э.д.с). Под действием э.д.с. в заготовке потечет переменный ток, который вызовет нагрев заготовки в соответствии с законом Джоуля-Ленца, причем все необходимое для нагрева тепло возникает в самой заготовке.

Переменный ток как в индукторе, так и в нагреваемой заготовке распределяется по сечению неравномерно. Плотность тока имеет наибольшее значение на их поверхности и спадает к центру. Чем выше частота тока, тем быстрее

снижается плотность тока от поверхности к центру. Если условно считать, что вся энергия выделяется в определенном слое, толщину которого называют глубиной проникновения тока, то его величина в индукторе и нагреваемой заготовке будет различна и зависит от удельного электросопротивления, магнитной проницаемости и частоты тока.

В то же время в процессе нагрева заготовок происходит изменение магнитной проницаемости и удельного электросопротивления материала заготовка. Так, магнитная проницаемость материала зависит от температуры и напряженности магнитного поля. С ростом напряженности магнитного поля магнитная проницаемость сначала быстро возрастает, достигая максимума, а затем резко падает. При увеличении температуры до 600 - 700 С магнитная проницаемость остается неизменной, а при температуре около 800 С резко спадает [21].

Удельное электросопротивление большинства металлов с увеличением температуры возрастает в несколько раз.

Таким образом, суммарное влияние изменения магнитной проницаемости и удельного электросопротивления сказывается на глубине проникновения тока, которая увеличивается в несколько раз. Все это вызывает и соответствующее распределение температуры по сечению заготовки.

Существенное влияние на энергетические параметры нагрева и его производительность оказывает частота тока, от которой зависит электрический КПД индуктора и время нагрева.

Основным параметром, определяющим выбор частоты является отношение диаметра заготовки к глубине проникновения тока.

Для обычных стальных заготовок, нагретых до ковочных температур, глубина проникновения тока может быть определена по формуле [20]:

$$\delta = \frac{0.6}{\sqrt{f}}$$

Практически можно считать, что выбор частоты тока будет удовлетворительный, если отношение диаметра заготовки к глубине проникновения тока будет лежать в пределах 2,5...6. Пользуясь этим

соотношением, можно определить пределы целесообразного применения стандартных частот тока для индукционного нагрева цилиндрических заготовок с различными диаметрами, которые приведены в таблице.

Частота	1000	8000	4000	2500	1000	500	50
Диаметр	18-	21-	32-	39-	60-	88-	50 и

Время, необходимое для нагрева стальных заготовок до ковочных температур, зависит от диаметра нагреваемой заготовки и частоты тока и определяется по графикам [9].

Процесс нагрева металла индукционным способом можно рассматривать как нагрев металла, расположенного в пределах глубины проникновения тока, происходящий непосредственно за счет прохождения тока и нагрева металла, расположенного в центре заготовки, за счет теплопроводности от поверхностных слоев. Уменьшение времени нагрева может быть достигнуто за счет сокращения нагрева глубинных слоев заготовки, а это ведет к увеличению перепада температур по сечению заготовки, который при нагреве под штамповку может быть не более 100°C.

Индукционный нагрев токами повышенной частоты используется для нагрева стальных заготовок главным образом цилиндрической формы под штамповку в крупносерийном и массовом производствах. Это связано с рядом преимуществ индукционного нагрева по сравнению с пламенным нагревом: большая скорость нагрева, сокращающая время нагрева в несколько раз; значительное уменьшение окалинообразования, которое составляет в среднем до 1% от массы нагреваемого металла; компактность установок и возможность встраивания нагрева в зону штампового пространства, улучшающие условия труда.

К недостаткам индукционного нагрева можно отнести значительные капитальные затраты на основное оборудование, большую сложность, а в некоторых случаях невозможность нагрева заготовок фасонного профиля.

Простейшая схема индукционного нагревательного устройства, представленная на рис. 14, состоит из индуктора 1, в котором производится нагрев заготовок 2; высокочастотного трансформатора 3; конденсаторной батареи 4; генератора 5, обеспечивающего питание установки; комплекта измерительных приборов 6; токопроводов 7.

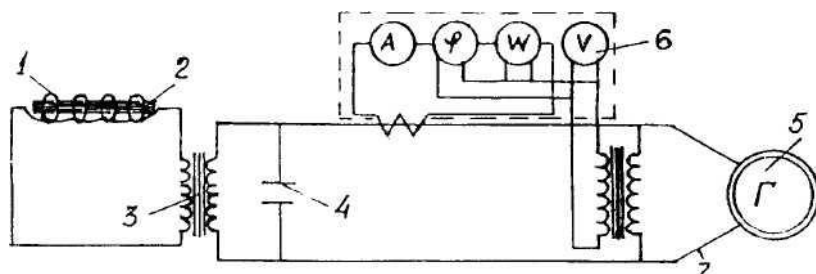


Рис. 14. Схема индукционного нагревательного устройства

Индуктор является основным элементом индукционного нагрева и представляет собой агрегат, состоящий из индуктирующего провода (медной трубки), навитого в виде спирали или иным образом в зависимости от назначения; футеровки, направляющих и распределительных колодок водяного охлаждения. Основные параметры индуктора можно разделить на геометрические и энергетические, которые тесно взаимосвязаны.

К геометрическим параметрам индуктора относятся внутренний диаметр спирали и размеры сечения ее трубки. Энергетическими параметрами индуктора являются напряжение на зажимах спирали, потребляемая мощность при данном напряжении, КПД индуктора и удельный расход электроэнергии, которые в большей степени зависят от теплофизических свойств нагреваемого металла, времени нагрева, а следовательно, и производительности. В практике нагрева под штамповку применяются индукторы самой различной формы.

Конденсаторная батарея служит для повышения коэффициента мощности установки. Если индуктор выполняет роль своеобразного аккумулятора электромагнитной энергии, то батарея конденсаторов является накопителем электростатической энергии. Применение конденсаторной батареи в индукционном нагревателе обеспечивает повышение номинальной активной мощности генератора, что в значительной степени повышает коэффициент полезного действия всей нагревательной установки [1].

Высокочастотные трансформаторы применяются в индукционных установках и предназначены для изменения напряжения, подводимого к индуктору. В практике индукционного нагрева используются автотрансформаторы и понижающие трансформаторы.

Автотрансформаторы обеспечивают полное или ступенчатое изменение напряжения и тем самым регулирование мощности, потребляемой индуктором. Они применяются тогда, когда требуется менять темп подачи заготовок к основному кузнечному оборудованию.

Понижающие трансформаторы применяются в тех случаях, когда напряжение на индукторе должно быть ниже напряжения на питающих шинах. Такая необходимость возникает, когда расчетное число витков не укладывается в индукторе заданной длины. Понижающий трансформатор не обеспечивает изменения напряжения на выходе.

В комплект измерительных приборов входит высокочастотная аппаратура для контроля тока, напряжения и мощности, подводимых к индуктору, а также аппаратура для измерения частоты тока генератора. Кроме этого в индукционных установках применяются приборы для измерения температуры нагреваемой заготовки - термопары и фотопирометры.

Токопроводы, предназначенные для передачи электрической энергии повышенной частоты от генератора к индуктору, выполняются из многожильного кабеля или металлических (медных) шин. При использовании полосовых токопроводов толщина полос должна быть не менее 1,5...1,6 глубины проникновения тока рабочей частоты.

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

Принципиально любой индукционный нагреватель представляет собой металлический шкаф, в нижней части которого чаще всего располагают конденсаторную батарею, а в верхней - индуктор и механизм подачи заготовок.

В нижней боковой части шкафа располагают аппаратуру управления, а в верхней половине - измерительную и контрольную.

В зависимости от режима нагрева индукционные нагреватели делятся на нагреватели методического и периодического действия.

В методических индукционных нагревателях в индукторе нагревается одновременно несколько заготовок, последовательно перемещаемых по направляющим через определенные интервалы времени. При смене заготовок индуктор не отключается. Разновидностью нагревателей методического действия являются проходные нагреватели, в которых заготовка в виде прутка или штанги непрерывно или прерывисто проходит через индуктор.

В нагревателях периодического действия в индукторе нагревается одна или несколько заготовок, При смене заготовок индуктор отключается.

Расчет индукционных нагревательных устройств сводится к определению мощности и типа генератора, размеров и числа витков индуктора, сечения трубки индуктора, а также реактивной мощности и количества банок конденсаторов. Методика расчета индукционных нагревательных устройств изложена в работе [1].

## ВЫБОР СПОСОБА НАГРЕВА ЗАГОТОВОК ПОД КОВКУ И ШТАМПОВКУ

Выбор способа и средств нагрева металла под ковку и штамповку является достаточно сложной задачей, требующей учета всех конкретных технологических исходных данных и местных условий. В общем случае выбор рационального способа нагрева определяют технологические исходные данные, энергоноситель и технико-экономические показатели работы нагревательного устройства.

Исходными данными для выбора способа нагрева являются: сведения о нагреваемых заготовках (материал, вид и размеры заготовки); годовая программа; требования к механизации и автоматизации средств нагрева; сведения об энергоносителях (виды энергоносителей, которые могут быть использованы, их стоимость).

Методика выбора способа нагрева заготовок под ковку и штамповку сводится к определению типа нагревательного устройства. Для этого:

устанавливается тип производства для данной группы заготовок; по таблицам для соответствующего типа производства и другим исходным данным определяется нагревательное устройство для каждого из возможных видов энергоносителя;

- по руководящим материалам [23] выбираются размеры нагревательной установки для заданной производительности и размеров нагреваемых заготовок.

Если при выборе окажется единственный тип нагревательного устройства, то на этом выбор способа нагрева заготовок под ковку и штамповку заканчивается.

В случае, когда для нагрева заготовок под ковку и штамповку подходят два или несколько типов нагревательных устройств, необходимо в качестве окончательного решения выбирать нагревательное устройство с лучшими экономическими показателями. В качестве критерия принимается сумма приведенных затрат. Нагревательное устройство будет наиболее выгодно то, где эта сумма будет наименьшей.

Сумма приведенных затрат складывается из капитальных затрат и себестоимости нагрева заготовок.

Капитальные затраты в кузнечно-штамповочном производстве состоят из стоимости изготовления нагревательных установок, включая все вспомогательное оборудование, стоимости транспортирования оборудования к месту установки и его монтаж.

Себестоимость нагрева определяется как сумма энергетических затрат, связанных с использованием энергоносителя для осуществления процесса, и технологических затрат.

Энергетические затраты представляют собой стоимость энергоносителя, необходимого для нагрева единицы массы металла.

В технологические затраты входят следующие статьи расхода: заработная плата нагревателей; стоимость воздуха, воды для работы нагревательной

установки; амортизационные отчисления; стоимость металла, потерянного на окалину в процессе нагрева; стоимость ремонта нагревательного оборудования. Расчет статей расхода технологических затрат выполняются в соответствии с методикой, предложенной в работе [23].

### Литература

1. Ульянов В.А., Гущин В.Н. Нагрев и нагревательные устройства (учеб.пос.) // М. Академия, 2010
2. Околович Г.А. **Нагрев и нагревательные устройства:** Учебное пособие предназначено для студентов специальности 150201 "Машины и технология обработки металлов давлением"/ Алт. гос.техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во Алт ГТУ, 2010.-172с.
3. Касенков М.А. "Нагревательные устройства кузнечного производства". М.: Машгиз, 1962
4. Кузелев М.Я., Скворцов А.А. "Нагрев металла под ковку и штамповку в пламенных печах". – Л.: Судпромгиз, 1960
5. Шипулин А.И., Шипулин И.А. "Нагрев и нагревательные устройства". Учебное пособие. – Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2000
6. Выбор методов и средств нагрева металла под обработку давлением". – ОМТР–2302–011–65–М.: НИИИМ, 1965
7. Кривандин В.А., Филимонов Ю.П. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. Теория и конструкции металлургических печей. Т.1 / Под ред. В.А. Кривандина. - М.: Металлургия, 1978
8. Скворцов А.А., Акименко А.П., Кузелев М.Я. Нагревательные устройства. - М.: Высш. шк., 1965
9. Филиппев О.В. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов. Киев: Высшая школа, 1976.
10. Гусовский В.Л. Газогорелочные устройства и системы отопления нагревательных и термических печей - М., "Металлургия", 1967.



11. Дорофеев К.П. Основы автоматизации производства в термических цехах и контрольно-измерительные приборы -М., "Машиностроение", 1970.
12. Золотухин Н.М. Нагрев и охлаждение металла - М., "Машиностроение", 1973.
13. Казанцев Е.И. Промышленные печи. -М., "Металлургия", 1975.
14. Кацевич Л.С. Расчет и конструирование электрических печей - М., Госэнергоиздат, 1959.
15. Сатановский Л.Г., Мирский Ю.А. Нагревательные и термические печи в машиностроении - М., "Металлургия", 1971.
16. Телегин А.С., Лебедев Н.С. Конструкция и расчет нагревательных устройств - М., "Машиностроение", 1975.
17. Пуговкин А.У. Рециркуляционные пламенные печи - Л., "Машиностроение", 1975.
18. Безручко И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки - Л., "Машиностроение", 1987.
19. Исаченко В.П., Осипова В.А. Теплопередача -М. Энергия, 1975.
20. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов - М., "Металлургия", 1969.
21. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов - М., "Машиностроение", 1981.
22. Михеев М.А. Михеева И.М. Основы теплопередачи - М., Энергия, 1977.
23. Павлов Н.А. Инженерные тепловые расчеты индукционных нагревателей - М., Энергия, 1978.