НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.И. Попелюх

ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

(конспект лекций)

УДК 621.78.084

В учебном пособии рассмотрены основные вопросы тепло- и массо-обмена в печах, методы расчета термических устройств, проанализированы и изложены основные конструктивно-технологические схемы современного термического оборудования и средства автоматизации процессов тепловой обработки материалов. Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Технологические процессы производства изделий из материалов и наноматериалов»

Новосибирский государственный
технический университет, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1.	**Введение. Тенденции развития тепловой обработки материалов и изделий**	**7**
2.	**Организация процессов тепловой обработки**	**9**
2.1	Этапы внедрения новых технологических процессов и функции специалиста по тепловой обработке материалов	**9**
2.2	Организационные формы выполнения процессов тепловой обработки	**12**
2.3	Особенности выполнения термических операций	**14**
2.4	Выбор организационных форм выполнения термических операций	**15**
2.5	Число технологических стадий выполняемых на одной позиции	**17**
2.6	Синхронизация операций тепловой обработки	**19**
3.	**Качество и технологичность термически упрочняемых изделий**	**22**
3.1	Показатели качества термически упрочняемых изделий	**22**
3.2	Общие показатели технологичности изделий	**23**
3.3	Обеспечение технологичности объемно упрочняемых изделий	**26**
3.4	Обеспечение технологичности изделий, подвергаемых индукционному нагреву	**27**
3.5	Обеспечение технологичности используемых материалов	**27**
4	**Расчеты тепловых процессов**	**28**
4.1	Особенности печи как объекта управления	**28**
4.2	Основные законы и виды теплообмена	**30**
4.3	Теплопередача при стационарном режиме	**36**
4.4	Теплопередача при нестационарных режимах	**37**
5	**Способы определения времени нагрева изделий**	**46**
5.1	Методы, основанные на среднестатистических показателях времени нагрева типовых деталей	**47**
5.2	Упрощенные методы, учитывающие важнейшие характеристики детали	**48**
5.3	Точные расчетные методы	**50**

5.4	Расчет времени нагрева термически тонких изделий	**51**
5.5	Расчет времени нагрева термически массивных изделий	**55**
5.6	Определение времени нагрева экспериментально-расчетными методами	**59**
5.7	Определение времени нагрева экспериментальными способами	**60**
5.8	Особенности теплообмена в высокотемпературных печах ваннах	**61**
6.	**Допустимая и возможная скорость нагрева**	**62**
7	**Виды и конструкции термического оборудования**	**64**
7.1	Маркировка термического оборудования	**64**
7.2	Печи периодического действия	**68**
7.3	Печи непрерывного действия	**75**
7.4	Печи- ванны	**83**
8	**Топливо и устройства для его сжигания**	**86**
8.1	Основные характеристики топлива	**87**
8.2	Устройства для сжигания топлива	**92**
9.	**Материалы, используемые для изготовления термических устройств**	**96**
9.1	Огнеупорные материалы	**96**
9.2	Теплоизоляционные материалы	**108**
9.3	Металлические материалы нагревательных элементов	**113**
9.4	Карборундовые огнеупорные изделия	**116**
9.5	Силициды	**117**
9.6	Тугоплавкие карбиды	**118**
9.7	Высокоогнеупорные оксиды	**119**
9.8	Тугоплавкие металлы	**120**
9.9	Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы	**121**
9.10	Огнеупорные изделия на основе углерода	**122**
10	**Расчеты термических устройств**	**123**
10.1	Уравнение теплового баланса	**124**

10.2 Футеровка термических печей и ее расчет **129**
11 **Нагревательные устройства** **134**
11.1 Классификация нагревательных элементов **134**
11.2 Трубчатые нагревательные элементы **135**
11.3 Радиационные трубы **138**
11.4 Открытые нагревательные элементы **139**
11.5 Расчет электрических нагревательных элементов **142**
11.6 Выбор и расчет горелочных устройств **148**
12 **Термическая обработка с индукционным нагревом** **162**
13 **Устройства электроконтактного нагрева** **177**
14 **Нагрев в электролите** **179**
15 **Пламенный нагрев** **179**
16 **Плазменный нагрев** **182**
17 **Оборудование для обработки холодом (криогенное оборудование)** **184**
18 **Дополнительное и вспомогательное оборудование** **193**
18.1 Оборудование для очистки окалины **193**
18.2 Моечные машины **199**
18.3 Оборудование для правки изделий **201**
19 **Охлаждающие среды и устройства для охлаждения** **202**
19.1 Классификация охлаждающих сред **202**
19.2 Водные закалочные среды **205**
19.3 Охлаждение в водных растворах солей кислот и щелочей **207**
19.4 Охлаждение в водно-масляных эмульсиях **209**
19.5 Охлаждение в водных растворах полимеров **210**
19.6 Охлаждающие среды на основе масел **212**
19.7 Охлаждение в расплавах солей и щелочей **216**
19.8 Закалка в расплавах легкоплавких металлов **218**
19.9 Охлаждение в газовых средах **218**
19.10 Охлаждение во взвешенных средах **220**

19.11 Основы выбора охлаждающих сред **222**
19.12 Закалочные баки и машины **223**
19.13 Расчет закалочного бака **229**
20 **Грузоподъемные и транспортирующие механизмы** **230**
20.1 Универсальные механизмы **230**
20.2 Специализированные транспортные устройства **232**
20.3 Выбор подъемно-транспортных механизмов **238**
21 **Автоматическое управление процессами тепловой обработки** **239**
21.1 Элементы систем автоматического управления **239**
21.2 Принципы автоматического управления **241**
21.3 Датчики автоматических систем **245**
21.4 Исполнительные механизмы **265**
21.5 Методы регулирования температуры в термических печах **269**
21.6 Автоматические регуляторы температуры **281**
22 **Нормирование термических операций** **285**
23 **Оформление технологической документации** **289**
23.1 Виды описания технологического процесса **290**
23.2 Виды технологических документов **291**
23.3 Титульный лист **295**
23.4 Основная надпись на технологических документах **296**
23.5 Карта эскизов **298**
23.6 Маршрутная карта **300**
23.7 Формы и требования к заполнению и оформлению документов на технологические процессы термической обработки **305**
24 **Технологическая оснастка. Основы конструирования и выбора** **311**
24.1 Классификация и виды приспособлений **311**
24.2 Установочные элементы приспособлений **315**
24.3 Зажимные устройства **316**
25 **Планировка термических участков** **322**
Литература **337**

1. Введение. Тенденции развития тепловой обработки материалов и изделий

В настоящее время тепловая обработка является неотъемлемой частью большинства технологических процессов изготовления материалов и изделий. Термической обработке подвергается до 30% деталей в автомобильной промышленности и сельскохозяйственном машиностроении [1]. В середине прошлого в развитых промышленных странах термическая обработка материалов выделилась в отдельную часть промышленного бизнеса. Появились компании, для которых технологические процессы упрочнения, нанесения защитных и износостойких покрытий являлись коммерческим продуктом. В настоящее время услугами заводов коммерческой термической обработки (ЗКТО) пользуются большинство мелких и средних предприятий машиностроительного профиля в западной Европе и северной Америке. Как правило, заводы коммерческой термической обработки это предприятия численностью 25-50 человек. Они работают в круглосуточном режиме в 3 смены одним выходным днем или без выходных, останавливаясь на планово-профилактический ремонт на 2-3 дня в месяц. ЗКТО могут быть универсальными, оказывающими широкий спектр услуг по термической или химико-термической обработке или специализированными, выполняющими обработку определенного вида, например по наплавку износостойких покрытий. В связи с тем, что спектр упрочняющих технологий неуклонно расширяется, все более актуальной становится тенденция специализации предприятий по отельным областям тепловой обработки. Термообработка на специализированных заводах имеет ряд достоинств. Обеспечивается более высокое качество продукта за счет:

- высококвалифицированного персонала;
- отработанных режимов обработки;
- отлаженного оборудования;
- эффективных методов оценки качества.

Как правило, термообработка на ЗКТО обладает более низкой себестоимостью из-за:

- более высокого коэффициента использования печей и термического оборудования;
- автоматизации и механизации процессов тепловой обработки;
- высокой организации производства;
- меньшей численности персонала и высоких показателей его эффективности.

На существующих крупных зарубежных предприятиях наблюдается тенденция расформирования крупных термических производств, которые были созданы в послевоенное время. Это обусловлено расширением ассортимента выпускаемой продукции, в том числе изготавливаемой под заказ, повышением мобильности и гибкости производств, уменьшением затрат на складирование и консервацию деталей. С этой целью наиболее рациональным является выполнение тепловой обработки деталей на небольших участках на универсальном оборудовании с большим количеством приспособлений. В этом случае затраты на переоснащение производства при переходе на новые материалы или новые виды обработки являются минимальными.

В нашей стране первые попытки создания регионального центра коммерческой термической обработки были сделаны в девяностых годах прошлого века [2]. Анализ рынка московской области показал, что основные потребности машиностроительных предприятий в технологиях упрочнения распределялись следующим образом. Традиционные виды объемной термической обработки занимали 84 % от общего портфеля заказов. Из них услуги по отжигу и нормализации деталей составляли около 20%, закалка с отпуском - около 50 %, доля термической обработки с использованием индукционного нагрева (закалка ТВЧ) составляла около 10%. На долю технологий напыления приходилось 4 % портфеля заказов, около 2 % заказов были связаны с лазерными технологиями. В связи с кризисом в машиностроительной отрасли России в девяностые годы проект создания регионального центра термической обработки не был осуществлен. Однако в последнее десятилетие в Российской федерации начали появляться специализированные предприятия, для которых тепловая обработка и процессы упрочнения материалов являются основным коммерческим продуктом

(компании Термомет, Термохим, НПО Магнетрон и т.д). В портфеле заказов заводов коммерческой термической обработки объем технологических процессов упрочнения, связанных с передовыми процессами нагрева постоянно растет, однако традиционные виды объемной тепловой обработки остаются основными.

2. Организация процессов тепловой обработки

2.1. Этапы внедрения новых технологических процессов и функции специалиста по тепловой обработке материалов

Для выпуска новых изделий необходима предварительная подготовка документации, материальных, финансовых, энергетических и трудовых ресурсов, т так же средств технического оснащения. В подготовке производства можно выделить ряд этапов [3]. Основанием для принятия решений о выпуске изделий или предоставлении услуг является бизнес-план (технико-экономическое обоснование), который включает в себя программу пошаговых действий для реализации нового проекта и оценку эффективности достижения поставленных целей. Бизнес-план должен быть пессимистичным, гибким и легко корректируемым. Он включает в себя следующие основные разделы:

- предположительные объемы продукции (услуг) и способы достижения заданных объемов;
- способы продвижения продукта на рынок;
- предполагаемую цену реализуемой продукции;
- анализ основных потребителей продукции;
- оценку сезонности продаж;
- оценку конкурентов и их возможной реакции на ваши действия;
- анализ сырьевой базы;
- анализ трудовых ресурсов и ситуации на рынке труда;
- оценку финансовых затрат и возможных источников инвестиций;
- оценку возможных рисков;

На начальном этапе составления бизнес-плана задачи специалиста-технолога заключаются в помощи специалисту - маркетологу при анализе рынка и расчете параметров себестоимости получаемой продукции. При принятии положительного решения на реализацию проекта начитается разработка конструкции изделия (разработка технического задания и составление рабочих чертежей).

На втором этапе инженер- технолог консультирует конструктора по вопросам использования материалов, их свойствам и возможным способам обработки. Он проводит анализ конфигурации деталей с точки зрения технологичности изготовления и тепловой обработки, а так же оценку возможности возникновения дефектов. Результатом работы является согласие технолога в виде визы на рабочих чертежах в разделе технологического контроля.

Третий этап работ заключается в непосредственной разработке технологии изготовления изделия и составления пакета технологической документации. На этом этапе инженер-технолог производит разработку технологии процесса производства изделий и осуществляет:

- выбор заготовок;
- выбор технологических баз;
- подбор типового или составление нового технологического процесса;
- определение последовательности и содержания технологических операций;
- определение, выбор или конструирование новых средств технологического оснащения (в том числе средств контроля и испытания);
- назначение и расчет режимов обработки;
- нормирование производства;
- выбор средств механизации и автоматизации технологических процессов;
- синхронизацию операций, определение технологических заделов.

Результатом работ на третьем этапе является пакет технологической документации на производство изделия.

Следующий этап работ заключается в проектировании участка производства изделий. На этом этапе инженер-технолог принимает участие:

- в проектировании участка, расстановке оборудования и составлении планировок;
- в адаптации транспортного и грузоподъемного оборудования, средств автоматизации и механизации к конкретным технологическим процессам;
- в выборе тары и способов упаковки изделия;
- в согласовании вопросов со смежными подразделениями и подрядчиками (строителями, энергетиками, экологами) и адаптации технологии к их требованиям.

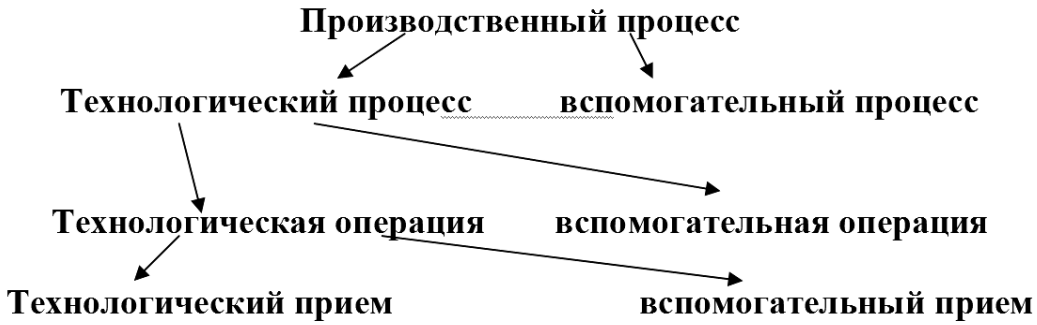
В процессе пуско-наладочного этапа инженер-технолог выдает рекомендации в приобретении оборудования, его монтаже, проводит доводку технологии изготовления, корректировку конструкторской и технологической документации, оценивает технологичность процесса при выпуске опытной партии изделий, проводит выявление дефектов и устранение узких мест в технологии изготовления детали.

Статистика показывает, что технологический и пуско-наладочный этап являются наиболее трудоемкими и занимают 60-75 % всего времени на внедрение новой продукции [3]. Ускорение процессов ввода в производство новой продукции возможно за счет внедрения систем автоматизированного проектирования (особенно на первом, втором и третьем этапах) с использованием баз данных по бизнес-планированию, типовым конструкциям, технологиям, оборудованию, оснастке, планировкам и расчетам потребных мощностей. Системы автоматизированного проектирования позволяют осуществлять многовариантное проектирование, что упрощает выбор наиболее рационального процесса производства изделий, однако при принятии окончательного решения важнейшим фактором является квалификация инженера-технолога. В результате выполнения работ на предприятии формируется пакет технической документации, который выполняется в соответствии требованиями единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП) и единой системы технологической документации (ЕСТД) [4, 5]. Наличие на участках и рабочих

местах технологической документации при производстве изделий является обязательным условием.

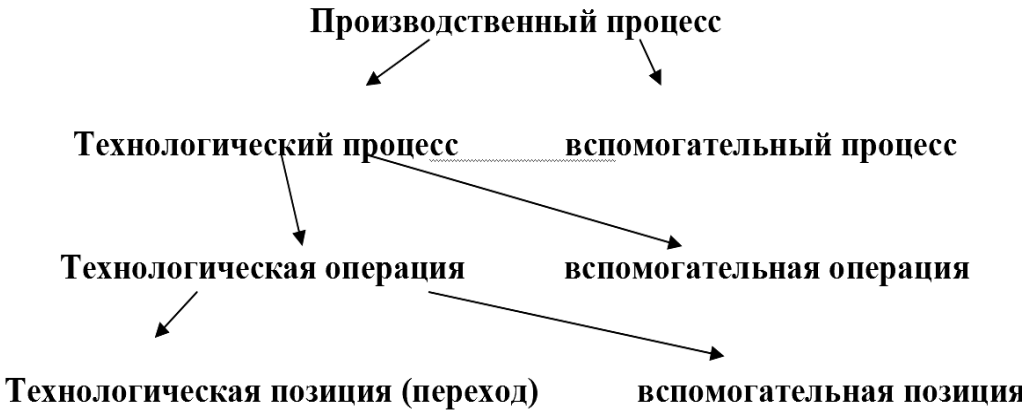
2.2. Организационные формы выполнения процессов тепловой обработки

Производственным процессом называется совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых для выпуска или ремонта изделий. Он может быть рассмотрен с различных точек зрения. С технологической точки зрения производственный процесс может быть представлен следующим образом.



Технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению состояния предмета труда. С технологической точки зрения под операцией подразумевают часть технологического процесса, отличающаяся по виду воздействия на материал. Технологический прием (стадия) – это часть операции, связанная с манипулированием изделием. К вспомогательным процессам относят операции и приемы, которые непосредственно не связаны с формообразованием деталей и изменением их свойств, но необходимы для выполнения основного технологического процесса. Например, типичным вспомогательным процессом при термической обработке деталей является приготовление защитной или охлаждающей среды.

С организационной точки зрения производственный процесс может быть представлен следующим образом.



Организационно под понятием технологической операции подразумевается законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте связанная с изменением формы и (или) свойств предмета труда. Под технологическим переходом понимают законченную часть операции, выполняемую одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке. Вспомогательная операция или переход это законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте не связанная с изменением формы и (или) свойств предмета труда, но обеспечивающая более качественное выполнение основных технологических операций или переходов (например, мойка или правка изделий).

При термической обработке технологический процесс включает в себя группы операций, которые можно подразделить на:

- подготовительные, включающие в себя комплекс мероприятий для предотвращения образования дефектов;
- основные, предназначенные для изменения формы и (или) свойств объекта;
- отделочные, служащие для улучшения качества поверхности деталей или изделии;
- контрольные, в ходе которых осуществляется контроль качества изделия.

По характеру воздействия на деталь термические операции подразделяются на:

- объемную обработку, в ходе которой изделие прогревается насквозь;
- поверхностную обработку, при которой у детали нагреваются только

поверхностные слои;

- локальную обработку, направленную на упрочнение отдельных частей детали;
- последовательные операции, при которой деталь нагревается последовательно путем перемещения в источнике нагрева.

По месту в технологическом процессе термические операции подразделяются на:

- предварительные, выполняемы в начале технологического процесса (например, операция отжига перед механической обработкой);
- промежуточные, находящиеся в его середине (например, операции промежуточного отжига при операциях обработки давлением);
- окончательные (например, операции светлой закалки, после которых изделие дополнительной обработке не подвергается);
- комбинированные, выполняемы на различных стадиях изготовления детали (в технологический процесс изготовления детали входит несколько различных операций термической обработки).

По связанности со смежными процессами термические операции бывают:

- преемственные, следующие друг за другом в строгой последовательности;
- совмещаемые, при которых операции обработки могут меняться местами в зависимости от производственной ситуации.

2.3. Особенности выполнения термических операций

Термические операции имеют ряд специфических особенностей.

1. Управление ходом операции осуществляется по косвенным признакам. При термической обработке основной контролируемой величиной является температура в объеме детали. Однако осуществлять контроль температуры внутри детали без ее повреждения практически невозможно. При выполнении операции термической обработки определение продолжительности нагрева, как правило, осуществляется

расчетными способами, либо с использованием деталей-свидетелей в которые помещают датчики контроля температурного режима.

2. Продолжительность термических операций оказывает существеннее влияние на качество обработки. Если время выдержки недостаточно, то сквозной прогрев детали не происходит, что приводит к уменьшению твердости и прочности материала. Увеличение времени термической обработки свыше необходимого так же приводит к снижению качества обработки вследствие окисления и обезуглероживания поверхности детали.

3. При выполнении тепловой обработки у большинства материалов ярко выражено явление наследования, при этом качество выполнения предыдущей операции оказывает значительное влияние на структуру и свойства материалов при последующей обработке.

4. В отличие от операций механической обработки, которые могут сопровождаться перерывами в работе, термические операции чаще всего являются непрерывными.

5. Операций тепловой обработки (за исключением операций высокоскоростного поверхностного нагрева) являются инерционными, требующими значительного времени для выхода оборудования на рабочий режим.

2.4. Выбор организационных форм выполнения термических операций

Теплой обработке могут подвергаться отдельный участок изделия; все изделие; группа изделий. При массовой термической обработке различают следующие понятия. *Садка* - число изделий одновременно обрабатываемых в оборудовании периодического действия. *Передаточная партия*- количество изделий одновременно передаваемых с операции на операцию, размещаемое в одном приспособлении. В зависимости от количества единовременно обрабатываемых деталей, обработка бывает штучная; партионная и комбинированная [6]. При штучной обработке достигаются оптимальные технологические условия обработки вследствие индивидуального контроля

технологических режимов вблизи детали, высокой равномерности температурного поля печи, отсутствия явлений загораживания тепловых потоков, контакта изделий при перемещении и.т.д. В некоторых случаях штучная обработка является единственным возможным способом нагрева (например, контактный нагрев в штампах и.т.д.). Основное достоинство партионной обработки - это более высокие показатели производительности. При тепловой обработке изделий необходимо разумное сочетание качества штучной обработки с производительностью партионной, что обеспечивает оптимальная величина садки и размер передаточной партии. Размер партии зависит от заданного технологического режима обработки, формы изделия, способа укладки (регламентированный или навалом), необходимости перемещения изделий и т.д.

В зависимости от периодичности запуска изделий в обработку режим работы термического оборудования бывает непрерывным и периодическим. При периодическом режиме работы все изделия в садке находятся на одной стадии обработки, они единовременно помещаются в рабочее пространство печи и извлекаются из нее. Достоинствами периодического режима работы являются малое вспомогательное время операции и высокая мобильность оборудования, так как время выполнения термической операции совпадает со временем обработки детали. Недостатками такой обработки являются существенная зависимость качества обработки от величины садки и аритмичность загрузки обслуживающего персонала вследствие интенсивной работы в момент загрузки и выгрузки деталей и простоя в период выдержки.

При непрерывном режиме работы садка состоит из обособленных партий, каждая из которых обрабатывается по своему режиму. Запуск изделий в обработку происходит с определенным тактом, при этом внутри термического оборудования расположены передаточные партии с деталями, находящимися на разных стадиях термической операции. Достоинствами непрерывного режима термической обработки деталей являются высокое качество (близкое к штучному) и высокая производительность (близкая к партионной). Недостатками данной формы организации термических операция являются увеличение количества погрузочно-

разгрузочных операций и усложнение конструкции термического оборудования. Время открытия загрузочных окон при таком способе работы является значительным, что требует применения особых методов тепловой защиты рабочего пространства печи. Кроме того, в оборудовании непрерывного действия возникают пуско-остановочные периоды, когда количество деталей внутри рабочего пространства непрерывно растет или сокращается, что приводит к отклонению температурного режима печи от расчетных значений и возможному перегреву деталей. Для уменьшения количества брака и стабилизации температурного поля печи в период запуска изделий в производство часто используют изделия-дублеры, напоминающие по своему размеру, массе и материалу обрабатываемые детали (обычно изделия с механическим браком). При непрерывном режиме работы так же снижается мобильность оборудования, так как перестройку на новый технологический режим можно выполнить только тогда, когда рабочее пространство печи покинет последняя деталь. По периодическому режиму работает большинство оборудования с перемещением изделий в процессе обработки. Частным видом обработки является полунепрерывный режим, когда в рамках одной стадии обработка происходит по периодическому режиму, но переход от стадии к стадии осуществляется по непрерывному режиму работы.

2.5. Число технологических стадий, выполняемых на одной позиции

Как уже было показано выше, технологически производственный процесс подразделяется на операции, каждая операция на стадии, отличающиеся режимами обработки (например, нагрев-выдержка-охлаждение). Организационно техпроцесс состоит из операций, позиции и межпозиционного перемещения, которые отличаются видом используемого оборудования и оснастки. При этом возможно различное сочетание стадий и позиций. *При концентрированном* способе обработки на одной позиции выполняются несколько стадий обработки (на одном рабочем месте несколько стадий техпроцесса). Основными достоинствами концентрированного способа обработки являются: минимальное

количество оборудования; минимальные занимаемые площади; минимальное количество погрузочно-разгрузочных операций. Основными недостатками концентрированного способа являются постоянные перерегулировки оборудования и соответственно пониженная точность выполнения операций, большая инерционность процесса вследствие необходимости значительного времени для выхода оборудования на заданный технологический режим.

При *дифференцированном способе* обработки каждая стадия выполняется на своей технологической позиции со стабильными рабочими параметрами.

К достоинствам дифференцированного способа можно отнести:

- отсутствие постоянных переналадок оборудования и перестроек его на новые режимы работы;
- высокую точность и стабильность параметров процесса;
- минимальную тепловую инерцию при настройке процесса. В этом случае становится рентабельным применение сильноинерционного теплового оборудования с большим временем выхода на рабочий режим (например печей-ванны);
- высокую производительность;
- высокое качество;
- иногда этот способ является единственно возможным, например, если в процессе обработки необходимо изменение состава рабочей среды.

Недостатками дифференцированного способа являются:

- большое количество необходимого оборудования и производственных площадей;
- удлинение межстадийных интервалов и переходов;

При выполнении обработки дифференцированным методом целесообразна концентрация оборудования в поточные линии.

Термическую обработку деталей изделий концентрированным и дифференцированным способом можно проиллюстрировать на примере традиционной операции закалки с отпуском. При концентрированном способе закалку и отпуск изделий выполняют в одной термической печи. После нагрева

под закалку печь перерегулируют на температуру отпуска изделий охлаждают до заданной температуры и производят отпуск изделий.

При дифференцированном способе обработки закалку и отпуск изделий выполняют в отельных печах (как правило, различной конструкции). В этом случае увеличиваются затраты на приобретение оборудования, однако существенно сокращается вспомогательное время термических операций из-за сокращения времени выхода печей на рабочий режим.

2.6. Синхронизация операций тепловой обработки

Синхронизация операций это согласование взаимосвязанных операций по времени, производительности и загруженности оборудования. При синхронизации технологических процессов рассчитывают такт и ритм обработки. *Такт* - это время чередования отдельных элементов обработки, *ритм* - количество изделий обрабатываемых в единицу времени. Для определения этих параметров строят диаграмму продолжительности технологического процесса. Синхронизации подвергаются все приемы каждой операции; совокупность операций в поточных линиях; совокупность технологических процессов смежных производств. После синхронизации длительность стадии должна быть равна или кратна такту. В термическом оборудовании синхронизация достигается изменением скорости перемещения деталей или изменением плотности грузопотока, а так же при помощи создания технологических и транспортных заделов. При неритмичном производственном процессе тепловой обработки, как правило, применяют дублирующее оборудование, которое задействуют в периоды максимальной производительности и отключают при малых объемах производства. Следует отметить, что чем короче операции, тем легче их синхронизовать.

Синхронизацию операций можно рассмотреть на примере технологического процесса химико-термической обработки деталей при заданных показателях производительности (в данном случае 60 деталей в час). Технологический

процесс упрочения деталей состоит из следующих операций и технологических переходов (для простоты вспомогательное время операции учтено в основном времени операции):

- загрузка изделия в приспособление (время загрузки 20 минут);
- цементация деталей (время цементации 360 мин);
- охлаждение в масле (время охлаждения 5 мин);
- промывка изделий (время промывки 15 мин);
- нагрев под закалку (время нагрева 30 мин);
- охлаждение в масле (время охлаждения 5 мин);
- промывка (время промывки 15 мин),
- отпуск деталей (время 120 мин).

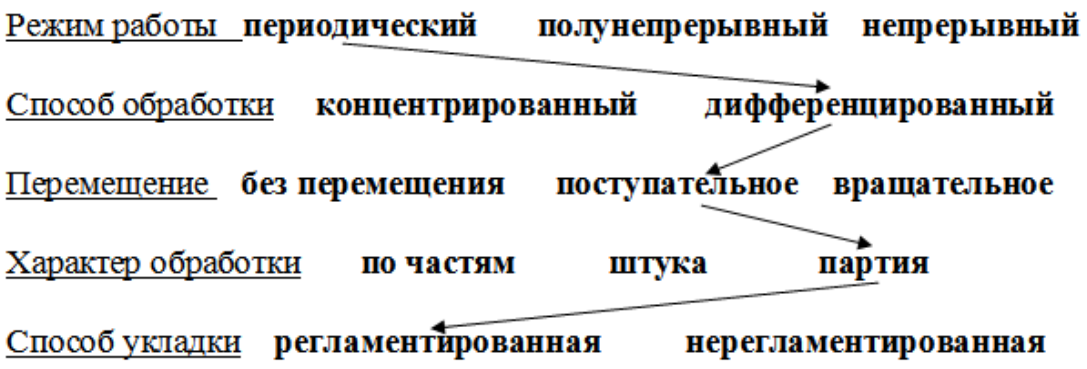
Синхронизация операций осуществляется следующим образом. Умножением заданной часовой производительности на время обработки определяют величину садки деталей в каждой единице технологического оборудования. Затем садку делят на передаточные партии. Величину передаточной партии выбирают в зависимости от веса и размера деталей и исходя из удобства их загрузки, выгрузки и транспортировки. Определяют количество передаточных партий на каждой операции и рассчитывают такт. Наиболее рационально, чтобы величина передаточной партии и такт операций во всей технологической цепочке оставались неизменными. В этом случае отпадает необходимость перегрузки деталей с приспособления на приспособление и возникают предпосылки для объединения технологического оборудования в поточную линию.

Таблица 1. Синхронизация технологического процесса химико-термической обработки деталей

№	Название операции	Время операции, мин	Садка, шт	Величина передаточной партии	Количество передаточных партий	Такт, мин
1	Загрузка в	20	20	5	4	5

	приспособлени е					
2	ХТО	360	360	5	72	5
3	Охлаждение в масле	5	5	5	1	5
4	Промывка	15	15	5	3	5
5	Нагрев под закалку	30	30	5	6	5
6	Охлаждение в масле	5	5	5	1	5
7	Промывка	15	15	5	3	5
8	Отпуск	120	120	5	24	5

Выбор организационных форм организации производства является сложной многовариантной задачей, зависящей от большого количества факторов: формы, размера и материала обрабатываемых деталей, их количества, теплового режима отработки, требованиях качества выполнения, допустимости манипулирования и перемещения в процессе обработки. Основным критерием для выбора организационной формы является низкая себестоимость обработки при обеспечении заданного уровня качества изделий. Пример выбора варианта организации тепловой обработки приведен ниже.



3. Качество и технологичность термически упрочняемых изделий

3.1. Показатели качества термически упрочняемых изделий

Основные показатели качества при выполнении операций термической обработки связаны с получаемыми физико-механические свойствами материала, остаточными напряжениями в поверхностных слоях и объеме детали и дефектностью ее поверхности. При выполнении термической обработки на поверхности детали могут возникать остаточные напряжения сжатия или растяжения. Сжимающие напряжения возникают, когда в поверхностных слоях образуются структуры с большим удельным объемом. Такие структуры получают при выполнении операций закалки, цементации или азотирования. Растягивающие напряжения возникают в случае образования в поверхностных слоях структур, с меньшим удельным объемом. Остаточные растягивающие напряжения при термической обработке возникают при обезуглероживании поверхности стали или при наличии в закаленной структуре большого количества остаточного аустенита. Остаточные растягивающие напряжения оказывают неблагоприятное влияние на показатели циклической долговечности материалов при работе в условиях воздействия переменных нагрузок, а так же коррозионной стойкости материала при работе в агрессивных средах. Напротив, наличие остаточных сжимающих напряжений в поверхностных слоях может значительно повысить эксплуатационные показатели деталей машин. На эксплуатационные свойства деталей так же оказывают влияние процессы окисления и наклепа материала, наличие на поверхности деталей трещин, рисок и исходная шероховатость поверхности. Целью тепловой обработки является улучшение основных физико-механических свойств материалов: предела прочности и текучести, твердости, пластичности, вязкости разрушения и т.д. При этом стабильность получаемых свойств зависит от большого количества факторов: распределения химических элементов в изделии; однородности теплового поля оборудования; тепловой инерции оборудования и изделия и т.д. В связи с этим

заданные механические свойства изделия должны иметь определенный допуск, который определяется технологическими возможностями производства и экономической целесообразностью.

3.2. Общие показатели технологичности изделий

В соответствии с ГОСТ 14.205-84 [7] под технологичностью понимают совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций изделий того же назначения при обеспечении установленных значений показателей качества в принятых условиях изготовления, эксплуатации и ремонта. Производственная технологичность проявляется в сокращении затрат средств и времени на: конструкторскую подготовку производства (КПП); технологическую подготовку производства (ТПП); изготовление изделия; контроль качества и упаковку. Эксплуатационная технологичность проявляется в сокращении затрат средств и времени на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Оценка технологичности изделия может быть качественной и количественной.

Качественная оценка характеризует технологичность конструкции обобщенно, на основе опыта исполнителя. При сравнении вариантов конструкции качественная оценка предшествует количественной и определяет целесообразность проведения последней. Количественная оценка производится с помощью системы включающей следующие показатели:

- базовые показатели, которые определяются нормативными документами;
- показатели технологичности, достигнутые при разработке аналогичных изделий;
- показатели уровня технологичности разрабатываемого изделия.

Кроме того показатели технологичности могут быть *абсолютными* (во временном или денежном выражении) и *относительными* (по сравнению с показателями изделия, принятого за эталон). Общая номенклатура показателей конструкции изделия представлена в таблице.

Таблица 2. Показатели технологичности

Вид и группа показателей	**Наименование показателей**
Основные	
	Трудоемкость изготовления изделия Уровень технологичности по конструкции трудоемкости изготовления Технологическая себестоимость изделия Уровень технологичности конструкции по технологической себестоимости
Дополнительные технико-экономические показатели	
трудоемкости	Относительная трудоемкость заготовительных работ Относительная трудоемкость процесса изготовления по видам работ Относительная трудоемкость подготовки изделия к функционированию Относительная трудоемкость обслуживания функционирующего изделия Относительная трудоемкость ремонтов изделия Удельная трудоемкость процесса изготовления изделия Удельная трудоемкость подготовки изделия к функционированию Удельная трудоемкость обслуживания функционирующего изделия Удельная трудоемкость ремонтов изделия

	Коэффициент эффективности взаимозаменяемости
себестоимости	Относительная себестоимость подготовки изделия к функционированию Относительная себестоимость обслуживания функционирующего изделия Относительная себестоимость ремонтов изделия Удельная технологическая себестоимость изделия Удельная технологическая себестоимость изготовления изделия Удельная технологическая себестоимость обслуживания функционирующего изделия
Дополнительные технологические показатели	
унификации конструкции	Коэффициент унификации изделия Коэффициент унификации конструктивных элементов Коэффициент стандартизации изделия Коэффициент повторяемости
унификации технологических процессов	Коэффициент применения типовых технологических процессов
расход материала	Масса изделия Удельная материалоемкость изделия Коэффициент использования материала Коэффициент повторяемости материала
обработка	Коэффициент точности обработки Коэффициент шероховатости поверхности
состав конструкции	Коэффициент сборности Коэффициент перспективного использования в других изделиях

Повышение технологичности выпускаемой продукции может осуществляться:

- повышением серийности изделий и их составных частей за счет группирования, унификации и стандартизации выпускаемых изделий и используемых технологических процессов;
- ограничением номенклатуры конструкций и применяемых материалов;
- преемственностью освоенных в производстве конструктивных решений, соответствующих современным требованиям;
- снижением массы изделия;
- применением высокопроизводительных типовых технологических процессов и средств технологического оснащения.

Отработка изделия на технологичность осуществляется

- конструктором при разработке изделия;
- технологом в процессе разработки технологической документации, а так же при согласовании разработанной документации со смежными службами: снабжения (например, выяснение наличия материалов на складах поставщиков и минимальной партии отгрузки), сбыта (например, определение рационального ассортимента в отгружаемых партиях), складскими службами и службами транспортировки (например, предпочтительное количество изделий, обеспечивающее удобное хранение и транспортировку);
- нормоконтролером на этапе нормоконтроля.

3.3 Обеспечение технологичности объемноупрочняемых изделий

Рекомендации по форме изделий.

- Желательна симметричность формы.
- Минимальное количество глухих отверстий.
- Минимальное количество концентраторов напряжений.
- Минимальная шероховатость.
- Желательна сквозная прокаливаемость.

• Посадочные места или базы обработки должны обладать повышенной жесткостью.

• Если деталь не жесткая, то термообработка выполняется на более ранних стадиях.

Рекомендации по шероховатости поверхности.

• Шероховатые поверхности нагреваются и охлаждаются с более высокой скоростью, но более склонны к образованию закалочных трещин.

• Полированные поверхности нагреваются и охлаждаются медленнее, чем окисленные.

• Полированные поверхности обладают меньшей смачиваемостью, поэтому они более склонны к пятнистости.

3.4.Обеспечение технологичности изделий, подвергаемых индукционному нагреву

• Для обеспечения равномерности нагрева необходим одинаковый зазор между деталью и индуктором, поэтому данный вид термообработки технологичен только при массовом производстве однотипных или унифицированных деталей.

• Для обеспечения равномерности нагрева некоторые поверхности делаются более точно, чем это необходимо условиями эксплуатации

• Вблизи отверстий и концентраторов напряжений вследствие неравномерности плотности тока всегда происходит недогрев и перегрев поверхности

• На границе закаленного слоя возникают растягивающие напряжения, поэтому опасные участки или не закаливаются, или прокаливаются насквозь.

• При местной закалке рядом расположенных расстояние между ними должно быть не менее 15мм, для предотвращения процессов отпуска.

3.5.Обеспечение технологичности используемых материалов

Материал являются более технологичным к выполнению операций тепловой обработки если он:

- менее чувствителен к температуре и времени тепловой обработки;
- более стоек к окислению;
- может быть обработан современными способами тепловой обработки;
- обладает высокой трещиностойкостью;
- обладает меньшим изменением объема при термической обработке;
- обладает более высокой закаливаемостью и прокаливаемостью.

Большинство изделий машиностроения получают с использованием операций механической обработки, поэтому важнейший показатель технологичности материала это его обрабатываемость резанием. К показателям, ухудшающим технологичность при обработке резанием можно отнести:

- малую теплопроводность материала, что приводит к разогреву режущего инструмента;
- образование в результате обработки структур закалки и упрочнению поверхности деталей;
- высокую вязкость материала, в результате которой он намазывается на режущий инструмент, что приводит к изменению геометрии режущей кромки.

Основные критерии качества тепловой обработки при отработке изделий на технологичность - минимальное коробление деталей, отсутствие на поверхности закалочных трещин и минимальное окисление поверхности.

4. Расчеты тепловых процессов

4.1. Особенности печи как объекта управления

Тепловая обработка детали обычно состоит из трех этапов, нагрев, выдержка и охлаждение. Под режимом обработки понимают закон изменения температуры печи в процессе нагрева. Он определяет скорость нагрева изделий до заданной температуры, продолжительность и температуру выдержки, скорость

охлаждения, а также общую продолжительность процесса. При нагреве деталей в них возникают термические напряжения. Это происходит вследствие расширения поверхностных слоев материала с более высокой температурой, чем внутренний объем. При этом во внутреннем объеме детали возникают растягивающие напряжения, а на поверхности – сжимающие. Величина напряжений зависит от температурного коэффициента расширения материала и градиента температур в объеме детали. Термические напряжения, возникающие при нагреве тонких металлических изделий, как правило, незначительны. В термически массивных деталях появление значительных напряжений приводит к короблению деталей и появлению в них термических трещин. Выравнивание температуры по сечению детали при ее выдержке приводит к снижению уровня внутренних напряжений, однако в процессе охлаждения они возникают вновь (рис.1). Таким образом, режимы термической обработки оказывают существенное влияние на качество обрабатываемых деталей. При выборе температурного режима обработки следует учитывать ряд особенностей.

1. Печь представляет собой сложный комплекс элементов (нагреватели, футеровка, измерительные и элементы и т.д.) каждый из которых обладает тепловой инерцией, что усложняет расчеты теплового баланса и переходных процессов.
2. Температурное поле печи неравномерно по объему и меняется во времени, поэтому место расположения измерительных элементов чрезвычайно важно.
3. Печь является объектом с самовыравниванием температуры, график нагрева носит экспоненциальный характер.
4. В период разогрева мощность печи равна номинальной мощности, однако в период выдержки средняя мощность печи снижается (обычно на 50 -70 %) и в конце выдержки равна тепловым потерям печи (состояние теплового баланса).

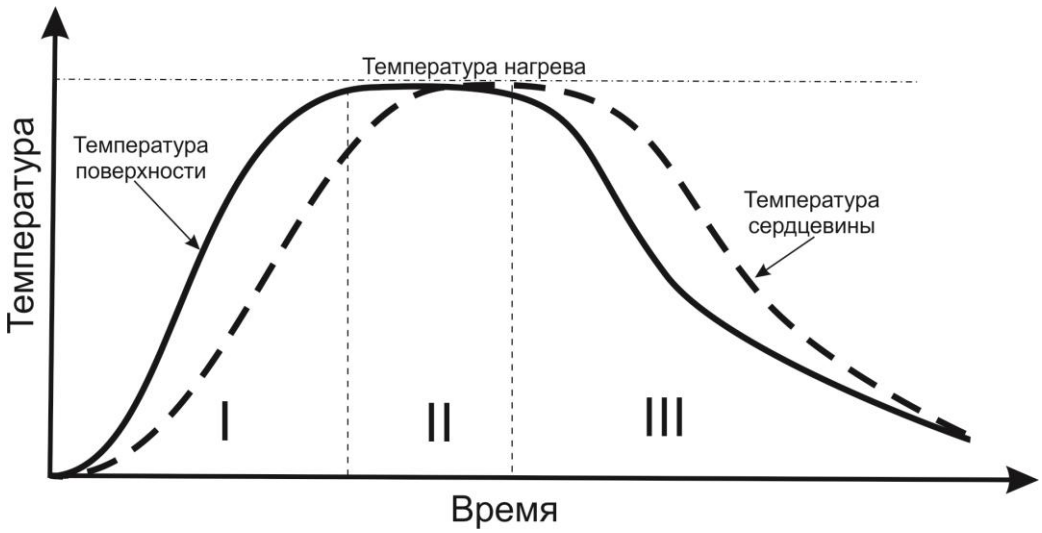


Рисунок.1 График температурного режима обработки детали

4.2. Основные законы и виды теплообмена

Теплопередача это процесс распространения тепла. Различают три вида передачи теплоты. *Передача тепла теплопроводностью* - это передача тепловой энергии при соприкосновении одного тела с другим или передача тепла внутри твердых тел или в неподвижных слоях жидкости или газа. В этом случае атомы, совершая колебательные движения, передают энергию своим постоянным соседям. Скорость передачи тепла зависит от типа атомов и их расположения (в металлах от типа кристаллической решетки). Передача тепла теплопроводностью описывается уравнением Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dn}{dt}$$

где dn/dt – вектор плотности теплового потока, передаваемого теплопроводностью который пропорционален вектору градиента температур в той же точке в тот же момент времени [8], λ – физический параметр вещества, называемый коэффициентом теплопроводности материала. Процесс переноса тепла в сплошной среде происходит в результате последовательного обмена энергией движения структурных частиц более нагретых и менее нагретых областей структуры (колебания атомов и молекул). В металлах перенос тепла происходит дополнительно за счет движения электронов.

При конвективном теплообмене перенос тепла осуществляется микроскопическими элементами среды за счет перемещения частей вещества. Конвективный теплообмен имеет место только в подвижных средах – жидкостях или газах. При этом в тонких приповерхностных неподвижных слоях передача тепла осуществляется теплопроводностью. Процесс обмена между средой и твердым телом называется *теплоотдачей***.** Процесс теплоотдачи **и**меет место в подвижных средах и обусловлен разностью плотностей нагретых материалов и их перемещением их под действием силы тяжести. Основное уравнение теплоотдачи от поверхности твердого тела к жидкости или газу описывается уравнением Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha(T_{ср} - T_{пов})$$

где $T_{ср}$ –$T_{тв}$ - это разница между температурами среды и твердого тела, α-коэффициент теплоотдачи, который показывает, какое количество теплоты в Дж переходит в одну секунду от более нагретого тела к менее нагретому через поверхность теплообмена в один квадратный метр при средней разности температур в один градус. Коэффициент теплопередачи определяет интенсивность теплообмена. Он не постоянен и зависит от разности температур и большого количества факторов, делая закон приблизительным. Если рассматривать тепловой поток как вектор, то он направлен перпендикулярно площадке поверхности, через которую протекает тепловой поток. Коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально или расчетом и зависит:

- от вида теплоносителя и его температуры;
- от температуры напора, вида конвекции и режима течения;
- от состояния поверхности и направления обтекания;
- от геометрии тела.

Суммарный коэффициент теплоотдачи в ккал/м^2*час для различных поверхностей при конвективном теплообмене в воздушной среде приведен в таблице 3 [9].

Таблица 3. Значения коэффициента теплоотдачи при конвективном теплообмене

Температура стенки печи, °С	Для вертикальной	Для горизонтальной		Температура стенки печи, °С	Для вертикальной	Для горизонтальной	
		Верх	Низ			Верх	Низ
25	7,7	8,6	6,5	90	12,1	13,8	9,8
30	8,2	9,2	6,9	100	12,6	14,4	10,2
35	8,8	10,0	7,2	125	14,0	15,9	11,4
40	9,1	10,3	7,4	150	15,1	17,1	12,4
45	9,3	10,6	7,6	200	17,5	19,7	14,5
50	9,9	11,3	8,1	300	23,4	25,9	20,0
60	10,5	12,0	8,5	400	30,5	33,1	26,9
70	11,1	12,7	9,1	500	39,5	42,3	35,8
80	11,5	13,1	9,3				

Теплообмен излучением - это передача тепла электромагнитными волнами (излучением). Имеет место в прозрачных средах и сопровождается двойным превращением энергии на границах сред. В чистом виде теплообмен излучение реализуется только в глубоком вакууме. В общем виде передача тепла излучением может быть описана следующей формулой:

$$q = C_s \cdot \varepsilon \cdot \varphi \cdot (\frac{T}{100})^4$$

где Cs =5,67 Вт/(м^2*К^4) – константа теплового излучения (постоянная Стефана-Больцмана). Тело, которое поглощает только часть энергии с любой длиной волны, принято называть *серым телом*. Отношение коэффициента излучения серого тела (С) к коэффициенту излучения абсолютно черного тела (C_s) при той же температуре называют *относительной излучательной способностью* или *коэффициентом теплового излучения* серого тела **ε:**

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

Таблица 4. Коэффициенты теплового излучения некоторых материалов [10]

Материал	**Температура, С**	**Коэффициент ε**
Алюминий	225-575	0,04-0,06
Вольфрам	300-2200	0,053-0,307
Железо полированное	425-1020	0,144-0,377
Кирпич шамотный	20-1100	0,75-0,9
Медь окисленная	200-600	0,57-0,87
Сталь шлифованная	940-1100	0,55-0,61
Сажа	20-370	0,94-0,96
Титан	50-500	0,3-0,45
Хром	100-1000	0,08-0,26

Таблица 5. Степень черноты нагреваемого тела [10]

Металл	**Температура °С**	**Степень черноты**
Алюминий, окисленный при 600 °С	200—600	0,11—0,19
Алюминий сильно окисленный	50—500	0,2 —0,3
Латунь матовая тусклая	20—350	0,22
Латунь, окисленная при 600°С	200—600	0,59—0,61
Медь, шабренная до блеска	20	0,07
Медь, окисленная при 600 °С	200—600	0,57—0,87
Никель, окисленный при 600 °С	200—600	0,37—0,48
Нихромовая проволока, чистая	500—1000	0,71—0,79
Нихромовая проволока, окисленная	50—500	0,95—0,98
Сталь, окисленная при 600 °С	200—600	0,8
Сталь сильно окисленная	50—500	0,88—0,98
Сталь свежепрокатанная	20	0,24
Сталь никелированная матовая	20	0,11
Сталь легированная (8% Ni/, 18% Cr)	500	0,35

Чугун, окисленный при 600 °С	200—600	0,64—0,78
Чугунное литье	50	0,81
Чугун в болванках	100	0,95

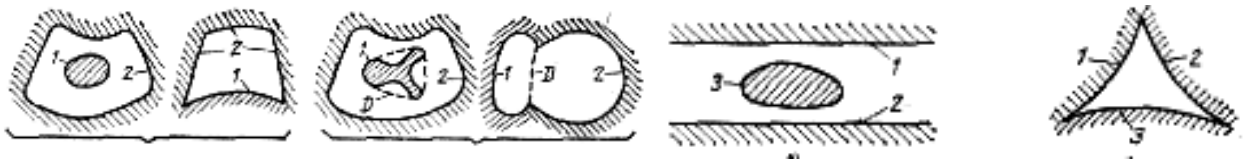
Коэффициент φ называют угловым коэффициентом излучения. В общем случае это угол между нормалью к поверхности и направлением теплового излучения. В системе твердых тел угловой коэффициент излучения - это геометрический фактор, зависящий от формы, размеров тел и их взаимного расположения. Различают коэффициент облучения первым телом второго φ_{12} и коэффициент облучения вторым телом первого φ_{21}. Угловые коэффициенты излучения определяют аналитически или экспериментально. Для большинства частных случаев, имеющих место в технике, значения φ приведены в справочниках.

1. Две поверхности образуют замкнутую систему, причем меньшая поверхность не имеет вогнутостей. $\varphi_{1-2}=1$; $\varphi_{2-1}=F_1/F_2$

2. Две поверхности образуют замкнутую систему, причем меньшая поверхность имеет вогнутости. $\varphi_{1-2}= D/F_1$; $\varphi_{2-1}=D/F_2$

3. Две параллельные стенки, размеры которых больше расстояния между ними $\varphi_{1-2}=\varphi_{2-1}=1$

4. Две параллельные стенки и тело между ними, размеры которого малы по сравнению с площадью стенок больше расстояния между ними, $\varphi_{1-2}=\varphi_{2-1}=1$; $\varphi_{2-3}=\varphi_{1-3}=0$; $\varphi_{3-2}=\varphi_{3-1}=0{,}5$



1 2 3 4

Рисунок 2. Системы поверхностей для расчета углового коэффициента излучения

При теплообмене излучением между двумя твердыми телами тепловой поток, переходящий от более нагретого тела к менее нагретому посредством излучения, определяется по уравнению [10]:

$$Q = F \cdot C_{1-2} \cdot \varphi_{1-2} \cdot \left[(\frac{T_1}{100})^4 - (\frac{T_2}{100})^4 \right],$$

где C_{1-2} - коэффициент взаимного излучения, Вт/(м^2·К^4); F – площадь поверхности излучения, м^2; T_1 и T_2 – абсолютные температуры поверхностей более нагретого и менее нагретого тел, К; φ_{1-2} – средний угловой коэффициент излучения, который определяется формой, размерами и взаимным расположением участвующих в теплообмене поверхностей. Если тело, излучающее теплоту, заключено внутри другого тела, то φ_{1-2} =1, а коэффициент взаимного излучения определяют по формуле:

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + (\frac{F_1}{F_2})(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s})},$$

где $C_1 = C_s \cdot \varepsilon_1$ - коэффициент излучения более нагретого тела, Вт/(м^2·К^4); $C_2 = C_s \cdot \varepsilon_2$ - коэффициент излучения менее нагретого тела, Вт/(м^2·К^4); F_1 и F_2–площадь поверхности более нагретого и менее нагретого тел соответственно, м^2. Если площадь F_2 очень велика по сравнению с F_1,то коэффициент взаимного излучения равен:

$$C_{1-2}=C_1$$

Если площадь F_2 =с F_1 (две параллельные поверхности), то коэффициент взаимного излучения определяют по формуле:

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}}$$

Сложный теплообмен

Процесс передачи тепла сопровождается изменением температуры в пространстве и времени. Совокупность значений температуры называется

температурным полем. Основная характеристика температурного поля – градиент температуры – вектор, численно равный производной от температуры по нормали к изотермической поверхности. Как правило, нагрев при термической обработке происходит в условиях сложного теплообмена, где тепло передается двумя или тремя видами теплопередачи. При одновременном действии конвективного и лучистого теплообмена уравнение теплообмена аналогично уравнению Ньютона. В этом случае суммарный коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{K} + \alpha_{И}$$

где $\alpha_к$ учитывает передачу тепла конвекцией, а $\alpha_л$ - тепловым излучением. В высокотемпературных печах главным видом теплообмена является излучение, а не конвенция. В этом случае суммарный коэффициент теплоотдачи можно принять рваным 5 - 10 % от коэффициента теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{\Sigma} = (1{,}05 - 1{,}1)\alpha_{И}$$

В печах с постоянной температурой свыше 700 °С коэффициент теплоотдачи излучением приближенно можно подсчитать по эмпирической формуле [9]:

$$\alpha_{л} = 0{,}03 C_{пр} \left(\frac{T_{ср}}{100} \right)^3 + 10 \quad (ккал/м^2 час \cdot град)$$

$C_{пр}$ –приведенный коэффициент излучения**,** рассчитывается по формуле

$$C_{пр} = \varepsilon \cdot C$$

где ε – степень черноты нагреваемого тела; С- постоянная Стефана-Больцмана = 5,67 Вт/(м^2*К^4).

4.3. Теплопередача при стационарном режиме

При стационарном тепловом режиме все рассматриваемые параметры теплового потока и взаимодействующих тел не меняются с течением времени. В условиях стационарного теплообмена работают тепловые устройства с длительным режимом работы после выхода на рабочий режим – печи длительного отжига, камеры для сушки древесины, холодильные устройства и т.д. Для расчета тепловых потерь через многослойные стенки используют расчетные формулы,

учитывающие перенос тепла теплопроводностью через стенки термического устройства и теплообмен излучением и конвекцией поверхности стенок с окружающей средой.

$$Q = \frac{t_{вн} - t_{нар}}{\frac{1}{\alpha_{вн} F_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{S_i}{\lambda_i F_i} + \frac{1}{\alpha_{нар} F_{n+1}}}$$

где $t_{нар}$ - температура наружной среды; $t_{вн}$ - температура внутренней среды; $\alpha_{вн}$ - коэффициент теплоотдачи между внутренней поверхностью стенки и средой ; F_1 – площадь внутренней поверхности стенки; $\alpha_{нар}$ -коэффициент теплоотдачи между наружной поверхностью стенки и средой ; F_{n+1} – площадь наружной поверхности стенки; $\boldsymbol{S_i}$ –толщина i – слоя; F_i – площадь i– слоя; λ_i .- коэффициент теплопроводности i– слоя.

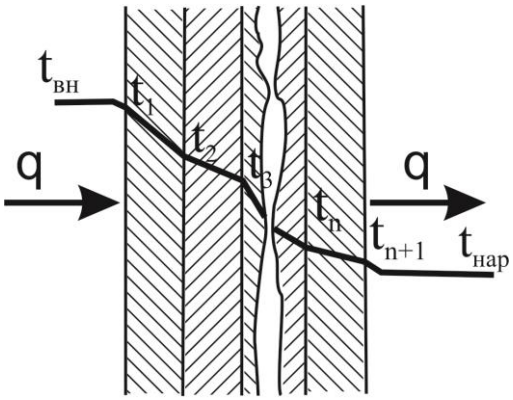


Рисунок 3. Тепловой поток через многослойную стенку при стационарном тепловом режиме

4.4. Теплопередача при нестационарных режимах

При тепловой обработке материалов условия теплообмена, как правило, являются нестационарными. Для применения того или иного расчетного метода, прежде всего, необходимо определить является ли данное изделие термически тонким или термически массивным и каковы условия теплообмена (граничные условия) при нагреве детали. В термически тонких телах не наблюдается значительного градиента температур по сечению изделия, поэтому время нагрева определяется, прежде всего, тепловым потоком, поступающим на поверхность

детали. В термически массивных телах внутреннее термическое сопротивление велико и наблюдается значительный перепад температур между поверхностью и центром детали. Критерий подобия стационарного теплообмена между нагретым или охлажденным твёрдым телом и окружающей средой, по которому тела подразделяются на термически тонкие и термически массивные, носит название критерия Био:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} X \text{ ,}$$

где α –коэффициент теплоотдачи, характеризующий тепловой поток с поверхности изделия в окружающую среду; λ- коэффициент теплопроводности материала детали; X – характерный геометрический размер детали, равный расстоянию наиболее удаленной точки от поверхности к которой подводится тепловой поток. К термически массивным относят изделия, у которых Bi > 0,6, к термически тонким относят изделия, у которых Bi < 0,15. Скорость нагрева поверхности массивного изделия (Bi > 0,6) больше скорости нагрева его центральных слоев, поэтому время нагрева до заданной температуры всей массы изделия следует определять по продолжительности нагрева центральных слоев.

Решение уравнений теплопроводности обычно происходит для тел простой формы (шар, цилиндр, пластина) с использованием безразмерных комплексов (критериев подобия), составленных из физических величин, характеризующих физическое подобие процессов при заданных граничных условиях теплообмена. Решение в критериальной форме обычно имеет следующий вид:

$$\theta = f\left(B_i; F_0; \frac{x}{X}\right)$$

где $\theta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{2н}}$ - температурный критерий (относительная температура)

t_1-температура печи, С; $t_{2н}$ - начальная температура изделия, °С; t_2- температура о данной точке изделия в рассматриваемый момент времени, °С; $B_i = \frac{\alpha}{\lambda} X$ - критерий Био,

$$F_0 = \frac{a\tau}{X^2}$$ -критерий Фурье

где ***a*** - коэффициент температуропроводности (теплопередачи) изделия, м^2/сек;

$$a = \frac{\lambda}{C\rho}$$

λ - коэффициент теплопроводности материала, Дж/(м^2*час), C - удельная теплоемкость изделия, Дж/(кг*град); ρ – плотность материала, кг/м^3; $\frac{x}{X}$ - геометрический критерии, определяющий местоположение рассматриваемой точки в изделии (***x*** — координата заданной точки; ***X*** — характерный геометрический размер изделия); ***τ***- время процесса. Решение уравнений теплопроводности обычно осуществляется с помощью номограмм, полученных для тел простой геометрической формы эмпирическим путем.

Нагрев и охлаждение тел при постоянной температуре поверхности и переменном тепловом потоке (граничные условия I рода)

Этот случай имеет практическое значение при нагреве в жидких средах, в подогреваемых плитах и пресс-формах, а так же для расчета процессов выравнивания температуры в термически массивных телах. Решение дифференциального уравнения теплопроводности имеет свежующий вид:

$$\theta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{2н}} = f\left(F_0; \frac{x}{X} \right)$$

Где $F_0 = \frac{a\tau}{X^2}$ - критерий Фурье, $\frac{x}{X}$ - геометрический критерии, определяющий местоположение рассматриваемой точки в изделии, θ- температурный критерий (относительная температура). Графические зависимости позволяют определить время нагрева (охлаждения) до заданной температуры различных точек по сечению пластины или определить температуру в заданный момент времени.

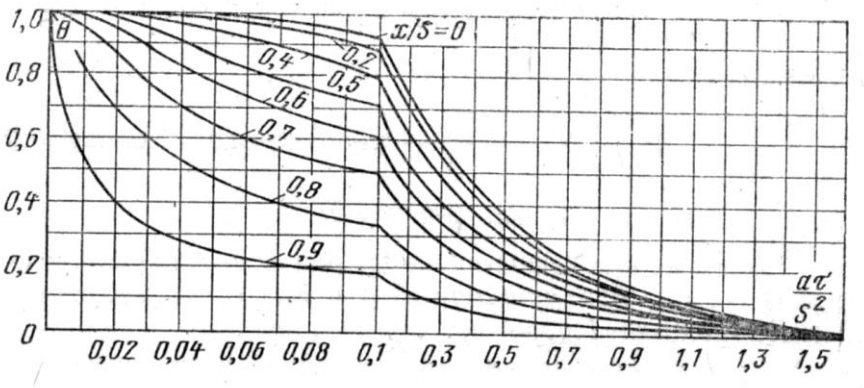


Рисунок 4. Зависимость относительной температуры от числа Фурье и относительной координаты для бесконечной пластины толщиной S [10].

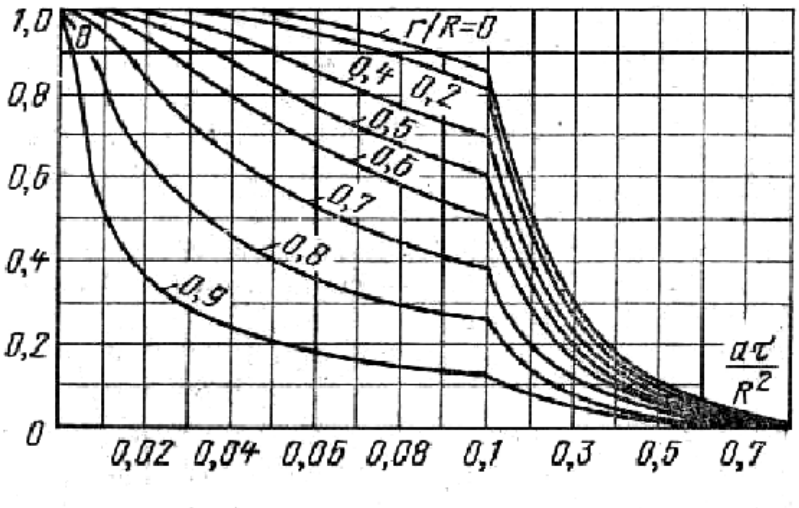


Рисунок 5. Зависимость относительной температуры от числа Фурье и относительной координаты для цилиндра бесконечной длины с радиусом R [10].

Нагрев и охлаждение тел при переменной температуре среды и поверхности и постоянном тепловом потоке (граничные условия II рода).

Такой вид теплообмена характерен при нагреве изделий и охлаждении вместе с печью, например при выполнении операций отжига массивных изделий. Решение дифференциального уравнения теплопроводности имеет свежующий вид:

$$\frac{2\lambda(t-t_0)}{q_n X} = f\left(F_0; \frac{x}{X}\right)$$

Где $F_0 = \frac{a\tau}{X^2}$-критерий Фурье, $\frac{x}{X}$-геометрический критерии, определяющий местоположение, t и t_0- заданная и начальная температура изделия, q_n – удельный тепловой поток на единицу поверхности детали

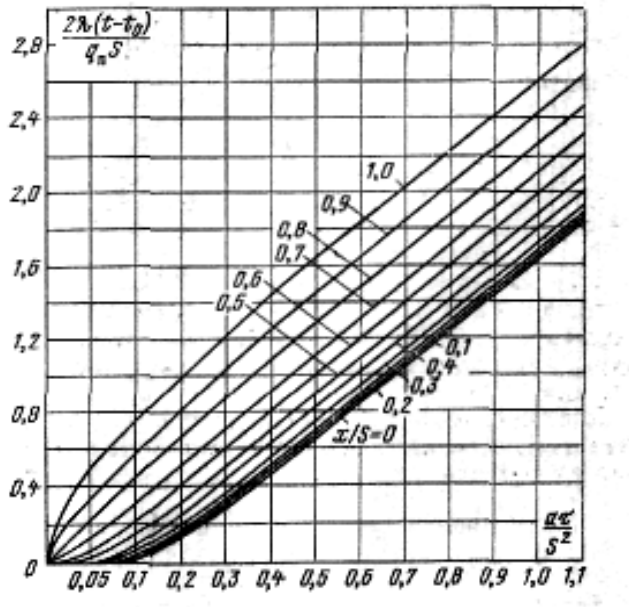


Рисунок 6. Зависимость относительной температуры от числа Фурье и относительной координаты для пластины толщиной S при постоянной плотности теплового потока q_n [10].

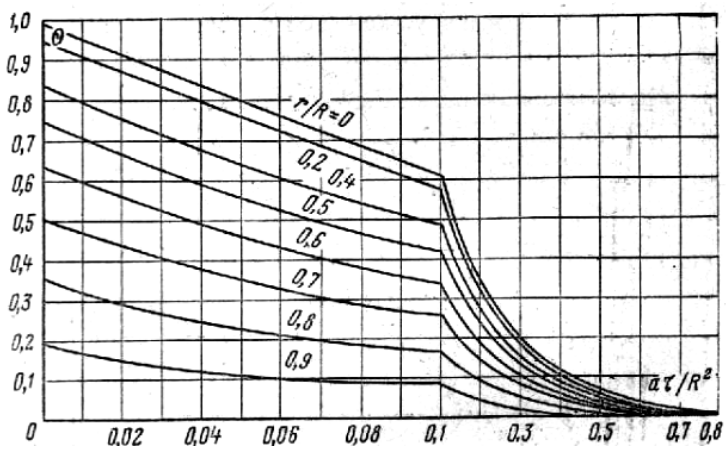


Рисунок 7. Зависимость относительной температуры от числа Фурье и относительной координаты для цилиндра бесконечной длины с радиусом R при постоянной плотности теплового потока q_n[10].

Зависимость, представленная графически, позволяет определить время нагрева (охлаждения) до заданной температуры различных точек по сечению пластины, определить температуру в заданный момент времени или определить величину плотности теплового потока для обеспечения заданного времени нагрева.

Нагрев и охлаждение тел при постоянной температуре среды и переменном тепловом потоке (граничные условия III рода)

Такой вид теплообмена при выполнении термической обработки встречается наиболее часто. Он характерен при нагреве изделий в печах с газовой атмосферой, например при выполнении операций закалки и отпуска деталей. Решение дифференциального уравнения теплопроводности имеет свежующий вид:

$$\theta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{2н}} = f\left(B_i; F_0; \frac{x}{X} \right)$$

Где $Bi = \frac{\alpha}{\lambda} X$ - число Био, $F_0 = \frac{a\tau}{X^2}$ -критерий Фурье, $\frac{x}{X}$ -геометрический критерии, определяющий местоположение,

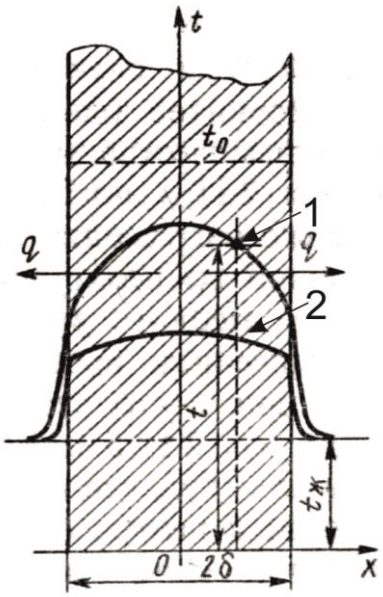


Рисунок 8. Распределение температуры в термически массивной (1) и термически тонкой (2) пластине толщиной 2δ при охлаждении в среде с температурой $t_ж$ в условиях нестационарного теплообмена

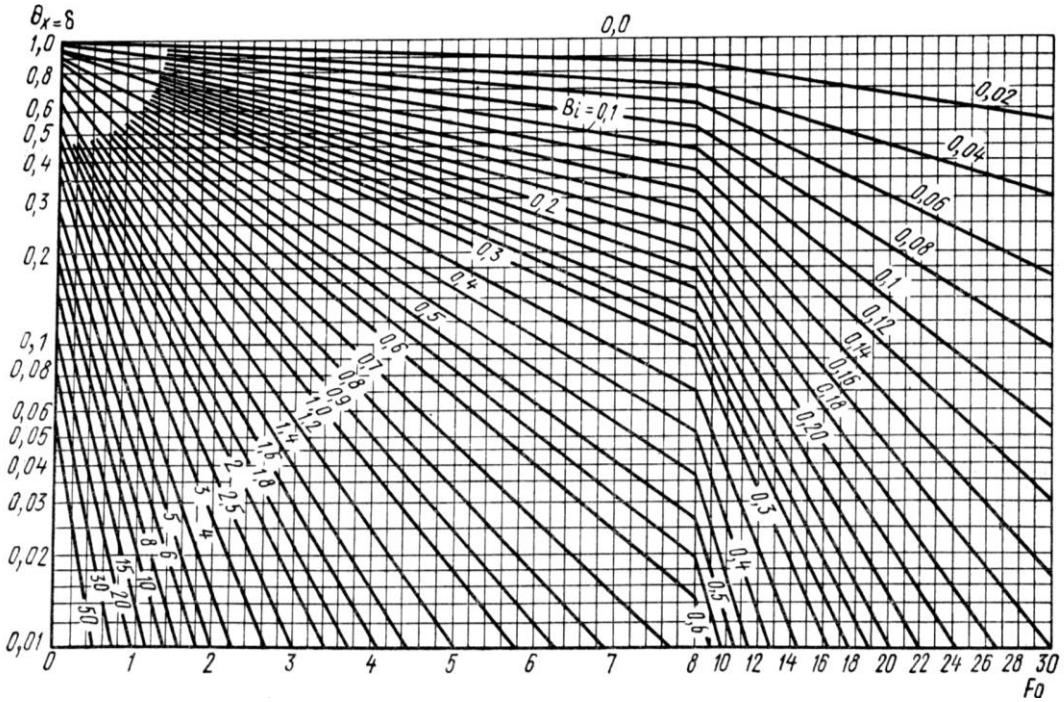


Рисунок 9. Зависимость относительной температуры поверхности пластины от числа Фурье и относительной координаты для пластины толщиной S при постоянной температуре среды [10].

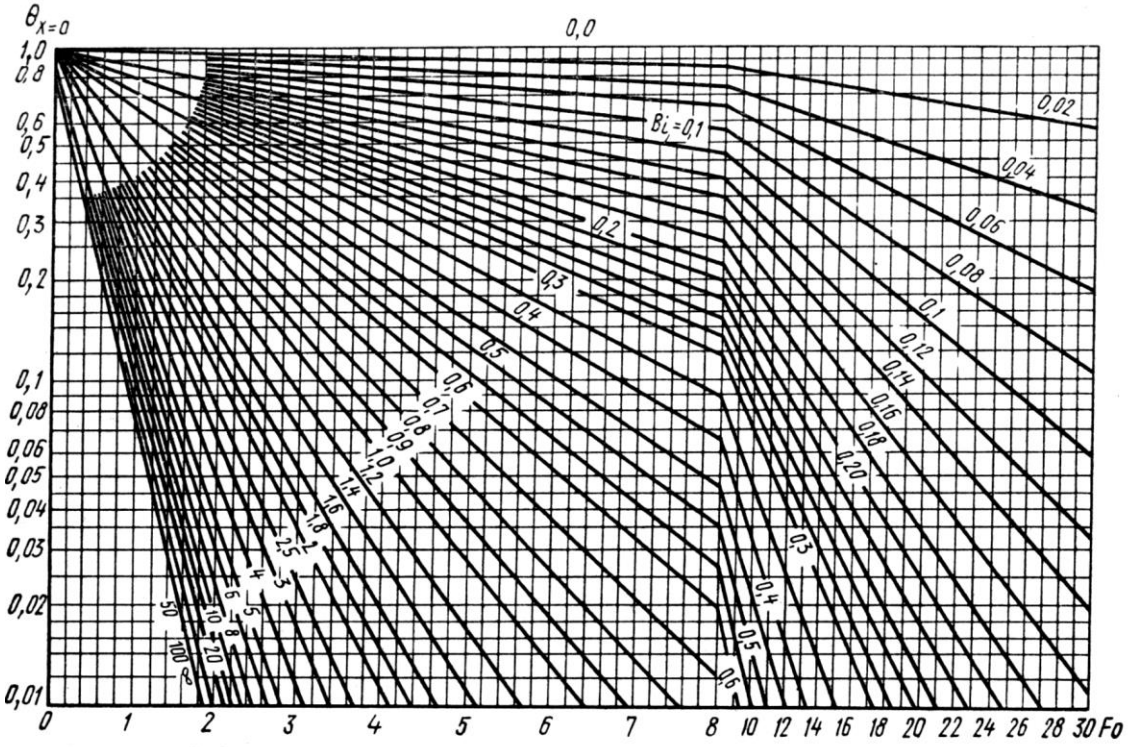


Рисунок10. Зависимость относительной температуры в средней плоскости пластины от числа Фурье и относительной координаты для пластины толщиной S при постоянной температуре среды [9].

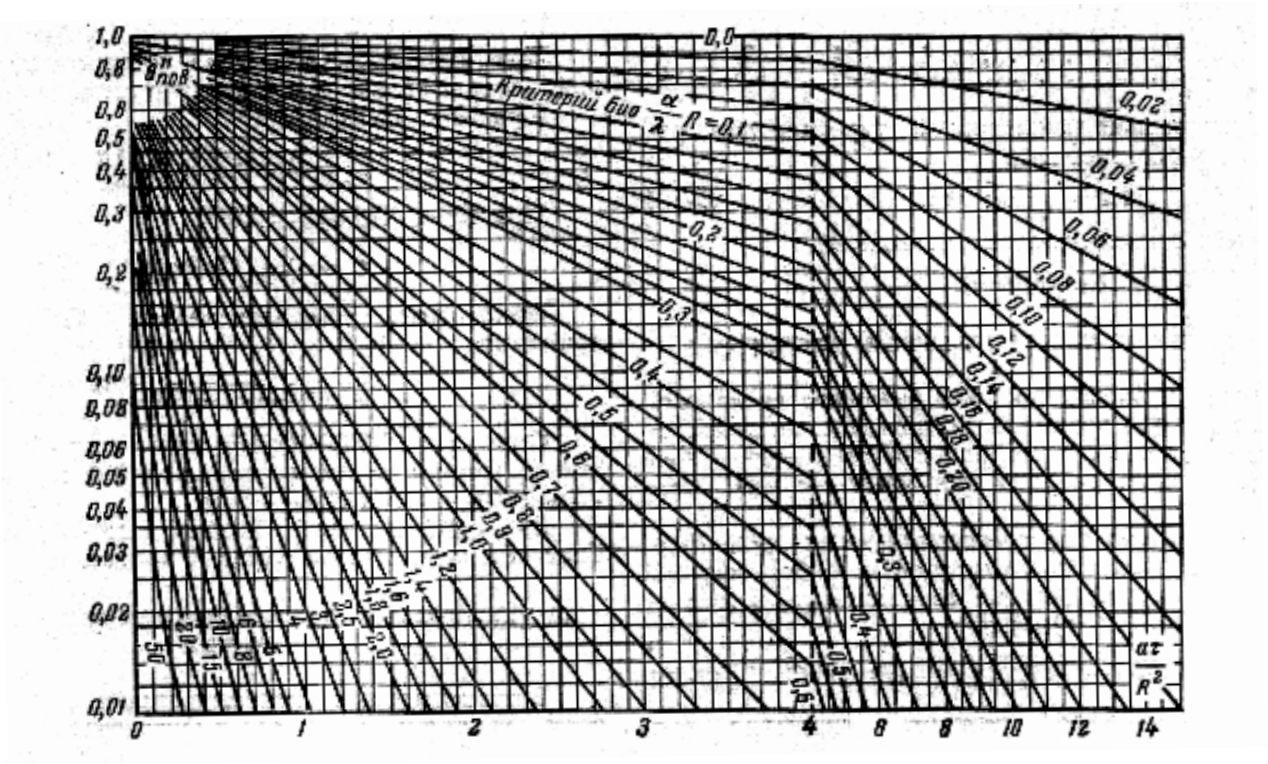


Рисунок 11. Зависимость относительной температуры поверхности от числа Фурье и относительной координаты для цилиндра радиусом R при постоянной температуре среды [10].

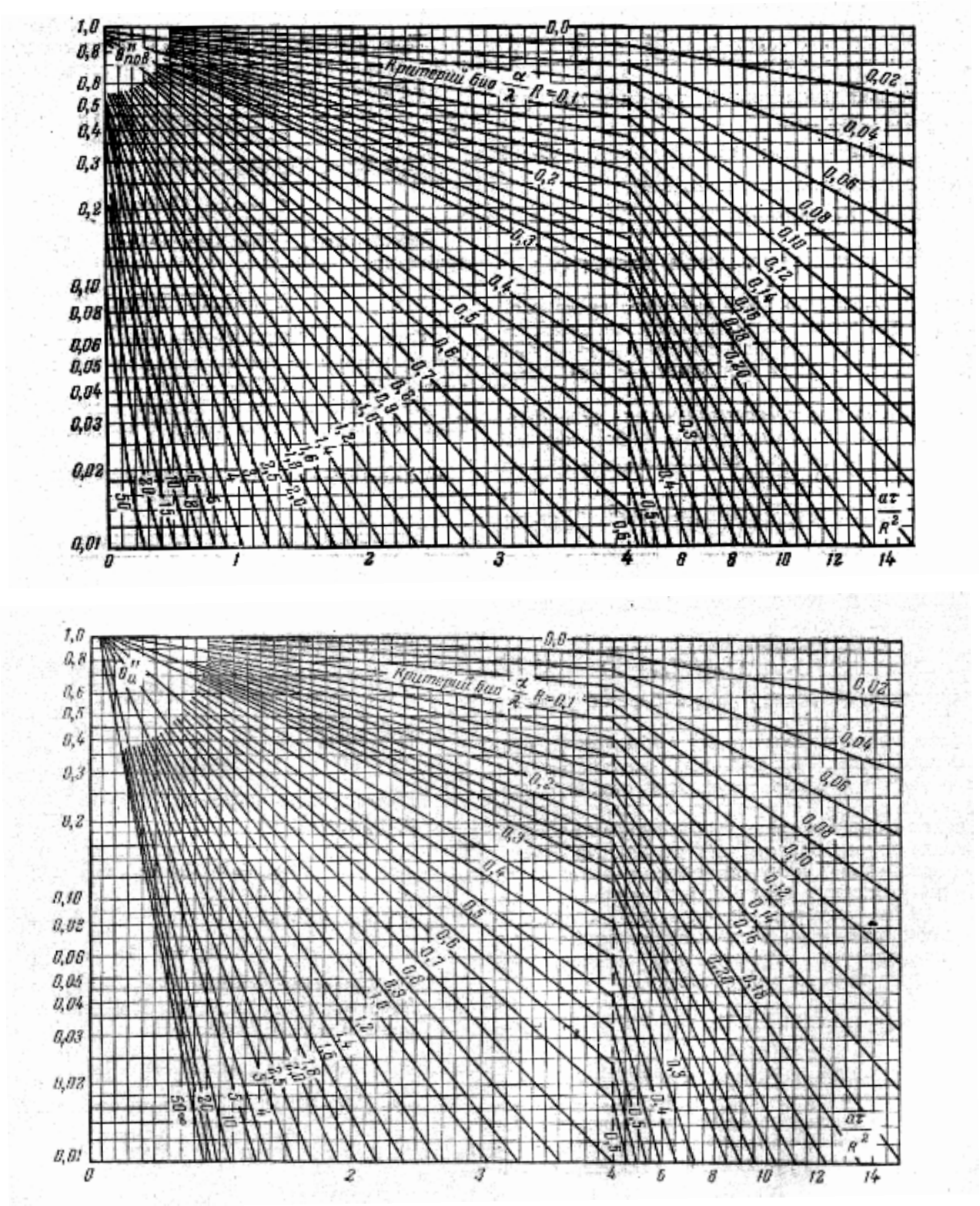


Рисунок12. Зависимость относительной температуры в оси цилиндра и относительной координаты для цилиндра радиусом R при постоянной температуре среды [10].

По графическим зависимостям определяют время нагрева (охлаждения) до заданной температуры поверхности и различных точек по сечению пластины или определить температуру в заданный момент времени.

5. Способы определения времени нагрева изделий

Время выдержки в термических печах является важнейшей характеристикой термической обработки. Если время выдержки недостаточно, не происходит сквозной прогрев материала, поэтому в глубине детали физико-механические свойства могут существенно отличатся от заданных значений. Как правило, это приводит к уменьшению твердости и прочности материала детали и возникновению эффекта пятнистости, выражающемуся в значительных различиях в свойствах поверхности. Значительная ошибка в меньшую сторону в расчетах времени термической обработки приводит к тому, что температура поверхности не достигает значений, при которых начинаются фазовые превращения, поэтому детали будут вообще не термообработаны. Однако было бы ошибочным думать, что увеличение времени термической обработки для получения гарантированного результата является однозначно положительным фактором. В процессе термической обработки, особенно при отсутствии защитной атмосферы при высоких температурах интенсивно протекают процессы окисления и обезуглероживания материалов, что резко ухудшает качество поверхности и может привести к неисправимому браку. При химико-термической обработке свойства материалов также в значительной степени зависят от времени протекания процессов. Кроме этого, увеличение продолжительности обработки проводит к неоправданному увеличению затрат энергоносителей, увеличению трудоемкости изготовления и соответственно снижению производительности оборудования и увеличению себестоимости изготовления деталей.

Одним из существенных недостатков термической обработки является сложность или полная невозможность определения величины температуры

внутри детали без ее повреждения. Условно способы определения температуры можно подразделить на три группы:

- расчетные, когда определение температуры осуществляется на основании расчетов температурных полей математической модели;
- экспериментальные, с определением температуры датчиками, размещенными внутри детали-свидетеля;
- расчетно-экспериментальные, с фиксированием сигнала от датчиков, расположенных на поверхности детали и дальнейшим расчетом времени прогрева по математической модели.

Среди расчетных методов можно выделить методы, основанные на среднестатистических показателях времени нагрева типовых деталей; упрощенные методы, учитывающие важнейшие характеристики детали и точные расчетные методы.

5.1.Методы, основанные на среднестатистических показателях времени нагрева типовых деталей.

Данные методы наиболее просты и применяются для расчета режимов термической обработки типовых деталей из широко распространенных материалов. Самым существенным недостатком подобных методов их низкая точность так как, не учитываются такие важнейшие характеристики детали: теплопроводность материала, форма изделия; условия теплообмена и. т. д. Очень часто такие рекомендации для типовых технологических процессов оформляются в виде соответствующих норм (табл.6) или простейших математических формул, например:

- на каждые 25 мм сечения изделия время 1 час и 1/5 от этого времени на выдержку [11].;
- 1 минута выдержки на каждые 0,6 миллиметров сечения [10];
- 2 минуты выдержки на каждый миллиметр сечения [12]. .

Таблица 6. Продолжительность нагрева стальных деталей в пламенных печах. [11]

Сечение детали, мм.	Закалка		Отпуск	
	Нагрев, мин.	Выдержка, мин.	Нагрев, мин.	Выдержка, мин.
25	20	5	25	10
50	40	10	50	15
75	60	15	75	20
100	80	20	100	25
150	120	30	150	40
200	160	40	200	50

Использование этого способа назначения режимов термической обработки возможно только при наличии большого количества типовых технологических процессов с соответствующими данными о качестве выпускаемой продукции или при термической обработке неответственных деталей с низкими требованиями к качеству последней.

5.2. Упрощенные методы, учитывающие важнейшие характеристики детали

Если проводят термическую обработку деталей с различной конфигурацией и габаритными размерами, составом материала и величиной садки целесообразно использовать другие способы расчета времени термообработки. В формулы для расчета времени термической обработки, кроме характеристик габаритных размеров, вводят поправочные коэффициенты такие, как коэффициент легирования, коэффициент формы, коэффициент формомассы, коэффициент всесторонности нагрева и т.д., которые позволяют учитывать изменение важнейших характеристик изделия. В качестве примера может быть приведена следующая расчетная формула [6]:

$$\tau = s \cdot k \cdot f \cdot L_m \text{ (мин)}$$

где S –характерный геометрический размер детали, мм.

k –коэффициент формы детали. Для деталей в форме цилиндра k=1, призмы k=1, шара k=1,5, пластины k=0,7, кольца k=0,7.

f- коэффициент фактора раскладки (таблица 7);

L_m-коэффициент легирования (таблица 8).

Использование данных способов является наиболее целесообразным при назначении режимов термической обработки неответственных деталей, или когда возможно значительное отклонение в расчетах от реального значения времени сквозного прогрева детали.

Таблица 7. Коэффициент фактора раскладки [6]

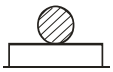
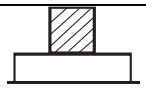
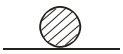
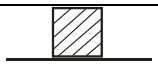
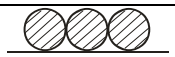
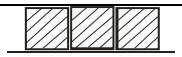
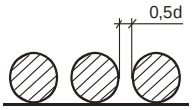
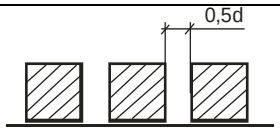
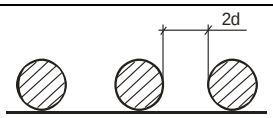
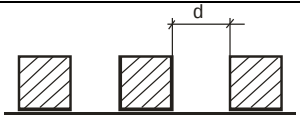
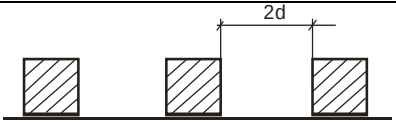
Расположение изделий	Коэффициент фактора раскладки	Расположение изделий	Коэффициент фактора раскладки
	1		1
	1		1,4
	2		4
	1,4		2,2
	1,3		2,0
			1,8

Таблица 8. Коэффициент легирования [6]

Марка стали	Температура нагрева	
Нагрев в газовой среде	600^0C	900^0C

Конструкционные нелегированные	1,7	0,7
Углеродистые	1,8	0,8
Среднелегированные	1,95	1,1
Высоколегированные	1,95	1,2
Быстрорежущие	2,25	1,35
Нагрев в соли		
Конструкционные нелегированные	0,35	0,33
Углеродистые	0,45	0,43
Среднелегированные	0,45	0,43
Высоколегированные	0,48	0,45
Быстрорежущие	0,5	0,47

5.3 Точные расчетные методы

Эти методы наиболее точны, но и наиболее трудоемки. Наибольшее применение они находят при термической обработке деталей при мелкосерийном и единичном производстве, когда отработка технологических режимов на изделиях-свидетелях или бракованных деталях нецелесообразна вследствие высокого уровня затрат. Основными расчетными характеристиками в данном случае являются возможная скорость нагрева в термическом оборудовании данного типа, допустимая скорость нагрева, при которой сохраняется заданный уровень качества детали, время нагрева и время выдержки. Для расчета времени нагрева деталей необходимо иметь информацию о:

- габаритных размерах детали. Для расчета используется такой параметр, как характерный геометрический размер детали - наикратчайшее расстояние от центра детали до ее поверхности. Для плоских деталей это половина толщины детали, для деталей цилиндрической формы - радиус и т.д.;
- форме детали. Если деталь имеет сложную форму, то при расчетах используется ее модель более простой конфигурации, или она разбивается на ряд простых элементов;

- физико-механических свойствах материала, из которого изготовлена деталь.

Если производится расчет садки изделий, то при расчете учитываются средние физико-механические свойства садки, или вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие расположение деталей.

Для применения того или иного расчетного метода, прежде всего, необходимо определить является ли данное изделие термически тонким или термически массивным и каковы условия теплообмена при нагреве детали. В термически тонких телах время нагрева определяется, прежде всего, тепловым потоком, поступающим на поверхность изделия. Перепадом температур между поверхностью и центром детали можно пренебречь. В термически массивных телах внутреннее термическое сопротивление велико и оказывает значительное влияние на продолжительность нагрева. Критерий, по которому тела подразделяются на термически тонкие и термически массивные, носит название критерия Био:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} X$$

где α - коэффициент теплоотдачи, характеризующий тепловой поток с поверхности изделия в окружающую среду; λ- коэффициент теплопроводности материала детали; X – характерный геометрический размер детали, равный расстоянию наиболее удаленной точки от поверхности к которой подводится тепловой поток. К термически массивным относят все изделия, у которых Bi > 0,6, к термически тонким относят тела с критерием Bi < 0,15.

5.4. Расчет времени нагрева термически тонких изделий

Расчет времени нагрева в печах периодического действия при постоянной температура печи

Температура печи в процессе нагрева изделий не меняется, если мощность печи соответствует расходу энергии на нагрев изделий. По мере нагрева изделий расход энергии в печи должен уменьшаться пропорционально скорости нагрева

изделий, что практически осуществляется при помощи терморегуляторов. При таком условии процесс нагрева изделий описывается простым уравнением теплового баланса [10]:

$$\alpha F_2(t_1 - t_2)d\tau = cG_2 dt_2$$

где F_2 — участвующая в теплообмене поверхность изделия, в м^2 ;

G_2 — масса изделия, кг; c — удельная теплоемкость изделия, Дж/(кг*град); t_1 — температура печи, °С; t_2 — температура изделия в данный момент времени, °С; α - коэффициент теплоотдачи, являющийся характеристикой теплообмена между поверхностью детали и средой (приложение), τ — время, сек.

Интегрируя уравнение в пределах от начальной температуры изделия $t_{2н}$ до конечной температуры изделия $t_{2к}$, получим формулу для определения времени нагрева изделия:

$$\tau_н = \frac{cG_2}{\alpha F_2} \ln \frac{t_1 - t_{2H}}{t_1 - t_{2K}} \ (c.)$$

Где t_1 — температура печи, °С;

$t_{2н}$ - начальная температура изделий, °С;

$t_{2к}$ – конечная температура нагрева изделий, °С.

Так как конечная температура нагрева изделий при термической обработке мало отличается от температуры печи, то из формулы следует, что расчетное значение времени нагрева сильно зависит от правильного выбора конечной температуры нагрева изделий. Для печей с теплообменом лучеиспусканием более точной является формула Б. В. Старка, полученная на основании закона излучения Стефана-Больцмана. В упрощенном практических расчетов виде ее можно записать так:

$$\tau_н = \frac{CG_2}{5{,}67\varepsilon_n F_2} \cdot \frac{100}{\left(\frac{T_1}{100}\right)^3} [f(T_{2к}/T_1) - f(T_{2н}/T_1)]$$

Где F_2 — поверхность изделия, м^2 ;

G_2 — масса изделия, кг;

c — удельная теплоемкость изделия, Дж/(кг*град);

T_1 – температура печи (температура нагревательных элементов), К

$T_{2н}$ – начальная температура изделия, К;

$T_{2к}$ – конечная температура изделия, К;

$\varepsilon_п$ – приведенный коэффициент черноты изделия (приложение, табл. 4);

Значения функций f определяются по графику, изображенному на рисунке 13, в зависимости от соотношений T_2/T_1

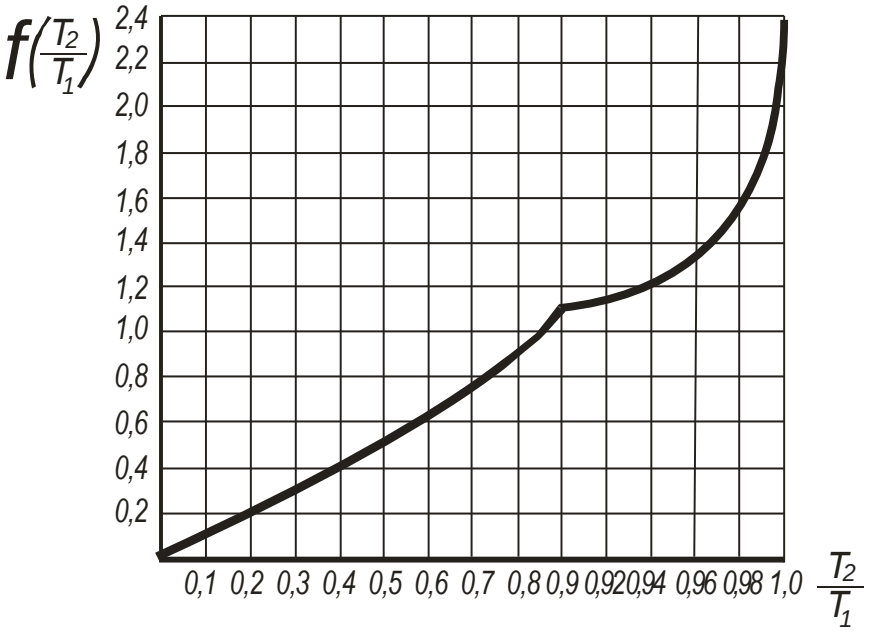


Рисунок 13. Зависимость $f\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$ *от* $\frac{T_2}{T_1}$ [13]

Расчет времени нагрева в печах периодического действия при переменной температуре печи и постоянном расходе тепла

С целью максимального использования установленной мощности электрической печи ее величину уменьшают по сравнению с номинальной или увеличивают величину садки изделий. Это обеспечивает работу печи во время нагрева изделий в основном без отключения. Уменьшение установленной мощности приводит к снижению температуры в рабочей камере печи после загрузки холодных изделий. По мере нагрева изделий температура печи повышается, при этом мощность печи остается постоянной. Так будет продолжаться до тех пор, пока температура печи

не достигнет заданной величины. После этого необходимо уменьшать мощность печи (или расход энергии), чтобы сохранить постоянной температуру в рабочей камере. Таким образом, процесс нагрева изделий в электрической печи периодического действия можно разбить на два этапа: нагрев при постоянной мощности, но переменной температуре печи и нагрев при переменной мощности (при переменном расходе энергии), но постоянной температуре печи. Продолжительность первого этапа нагрева изделий τ_1 равна:

$$\tau_1 = \frac{cG_c(t_{1y} - t_{2н})}{10^3 N_п} - \frac{cG_c}{\alpha F_c}$$

где $N_п$ - полезная мощность печи, расходуемая на нагрев изделий; G_c - масса садки изделий в печи в кг; где t_{1y} - установленная температура печи. $t_{2н}$ – начальная температура изделий; F_c - поверхность изделий.

Зависимость между полезной $N_п$ и установленной мощностью N_y может быть описана следующим образом:

$$Nn = \frac{N_y \eta}{(1,2 \div 1,5)}$$

где η -к. п. д. печи.

Установленную температуру печи t_{1y} можно вычислить по следующей формуле:

$$t_{1y} = kt_{2k}$$

где k = 0,85…0,95 - коэффициент, учитывающий соотношение между температурой нагрева изделий в течение первого этапа и их конечной температурой $t_{2k.}$ Чтобы во время нагрева изделий печь работала без отключения или переключения на меньшую мощность, необходимо в течение первого этапа обеспечить нагрев изделий до температуры, близкой к конечной температуре нагрева.

Продолжительность второго этапа нагрева τ_2 равна:

$$\tau_2 = \frac{cG_c}{\alpha F_c} \ln \frac{10^3 N_п}{\alpha F_c (t_{1y} - t_{2К})}$$

Исходя из принципа аддитивности, полное время нагрева изделий в печи с уменьшенной установленной мощностью можно определить следующим образом:

$$\tau_н = \tau_1 + \tau_2 = \frac{cG_c(t_{1у} - t_{2н})}{10^3 N_п} + \frac{cG_c}{\alpha F_c}\left[\ln\frac{10^3 N_п}{\alpha F_c(t_{1у} - t_{2н})} - 1\right]$$

5.5.Расчет времени нагрева термически массивных изделий

Скорость нагрева поверхности массивного изделия (Bi > 0,6) больше скорости нагрева его центральных слоев, поэтому время нагрева до заданной температуры всей массы изделия следует определять по продолжительности нагрева центральных слоев. С этой целью обычно используется решение дифференциального уравнения теплопроводности (уравнение Фурье). Решение в критериальной форме имеет следующий вид [10]:

$$\theta = f\left(B_i; F_0; \frac{x}{X}\right)$$

где $\theta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{2н}}$ - температурный критерий, t_1- температура печи, °С; $t_{2н}$ -. начальная температура изделия, °С; t_2 - температура о данной точке изделия в рассматриваемый момент времени, °С;

$B_i = \frac{\alpha}{\lambda} X$ - критерий Био

$F_0 = \frac{a\tau}{X^2}$ -критерий Фурье

где ***a*** - коэффициент температуропроводности изделия, $\frac{x}{X}$ - геометрический критерии, определяющий местоположение рассматриваемой точки в изделии (***x*** — координата точки; ***X*** — характерный геометрический размер изделия). Коэффициент температуропроводности изделия **а** численно равен отношению теплопроводности материала к его к объёмной теплоёмкости:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала, $\boldsymbol{c}$ - удельная теплоемкость изделия, ρ - плотность материала.

Для практических расчетов удобнее пользоваться графиками, построенными на основании этих выражений. На рисунках 14 и 15 приведены графики, позволяющие находить температуру бесконечного цилиндра (его оси) и пластины (ее средней плоскости) в зависимости от величины критерия $\boldsymbol{F_o}$ и критерия $\boldsymbol{B_i}$**.** С помощью приведенных графиков можно определить время нагрева тела до заданной температуры. Для этого задаются координаты искомой точки, начальная и конечная температура в ней, и температура в печи. После этого необходимо вычислить температурный критерий и критерий $\boldsymbol{B_i}$ и по соответствующему графику, найти величину критерия $\boldsymbol{F_o}$ и затем вычислить время нагрева по формуле:

$$\tau_н = F_0 \frac{X^2}{a}$$

Изложенный метод расчета нагрева «массивных» изделий применим лишь для изделий простой формы, однако на практике часто требуется рассчитывать нагрев изделий сложной конфигурации. В этом случае можно осуществить расчет нагрева тел произвольной формы приведенных к простейшей форме: пластины, цилиндра или шара. В соответствии с этим изделия подразделяются по форме на три класса [12].

Тела первого класса (класс пластины) характеризуются тем, что их длина и ширина значительно превосходят толщину. К этому классу относятся листы, трубы (при отношении толщины стенки трубы к диаметру не больше 0,1) и профили (при отношении толщины полки профиля к ее ширине не больше 0,15). *Тела второго класса (класс цилиндра)* характеризуются тем, что их длина значительно превышает ширину и толщину. К этому классу относятся прутки, толстостенные трубы и профили, не удовлетворяющие рассмотренным требованиям первого класса. *Третий класс (класс шара***)** составляют тела, все три измерения которых одного порядка. При выполнении расчета нагрева изделия произвольной формы необходимо, прежде всего, определить класс, к которому

можно отнести рассматриваемое изделие. Затем необходимо определить для изделия произвольной формы характерный геометрический размер X, входящий в состав критериев ***Bi*** и ***Fo***. Величина ***X*** находится из условия равенства объемов рассматриваемого изделия и эквивалентного простейшего тела. На основании этого для тел первого класса (класс пластины) величина X_1 равна:

$$X_1 = \frac{V}{2F_{ср}}$$

где ***V***— объем изделия, $м^3$

$\boldsymbol{F_{ср}}$ — площадь средней плоскости изделия, $м^2$

Для тел второго класса (класс цилиндра) величина X_1 равна:

$$X_2 = \sqrt{\frac{F_{сеч}}{\pi}}$$

где $\boldsymbol{F_{сеч}}$ — площадь поперечного сечения, изделия, $м^2$

Для тел третьего класса (класс шара) величина X_3 равна:

$$X_3 = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}$$

С целью сохранения величины теплового потока на поверхности изделия при переходе к телу простейшей формы вводится критерий формы ***A,*** который представляет собой отношение поверхности рассматриваемого изделия ***F*** к поверхности эквивалентного простейшего тела ***Fo.***

$$A = \frac{F}{F_0}$$

Для тел первого класса (класс пластины) величина A_1 равна:

$$A_1 = \frac{F}{F_{ср}}$$

Для тел второго класса (класс цилиндра) величина A_2 равна:

$$A_2 = \frac{P}{\sqrt{4\pi F_{ctx}}}$$

где ***P*** — длина периметра поперечного сечения рассматриваемого изделия, м

Для тел третьего класса (класс шара) величина A_3 равна:

$$A_3 = \frac{F}{\sqrt[3]{36\pi V^2}}$$

Расчет критерия ***Bi*** производится по следующей формуле:

$$B_i = \frac{A\alpha}{\lambda} X$$

Дальнейший расчет проводится по графикам так же, как для тел простейшей формы.

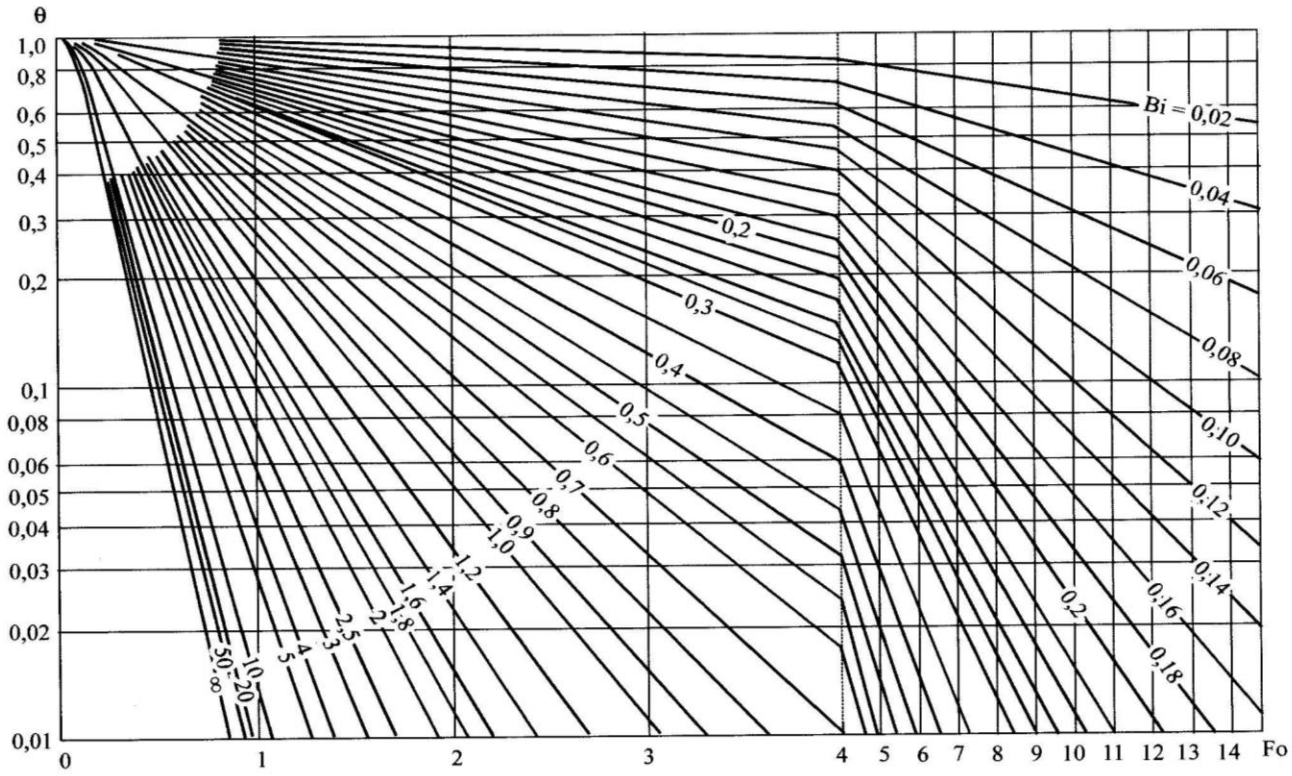


Рис. 14. Относительная избыточная температура для оси цилиндра [10]

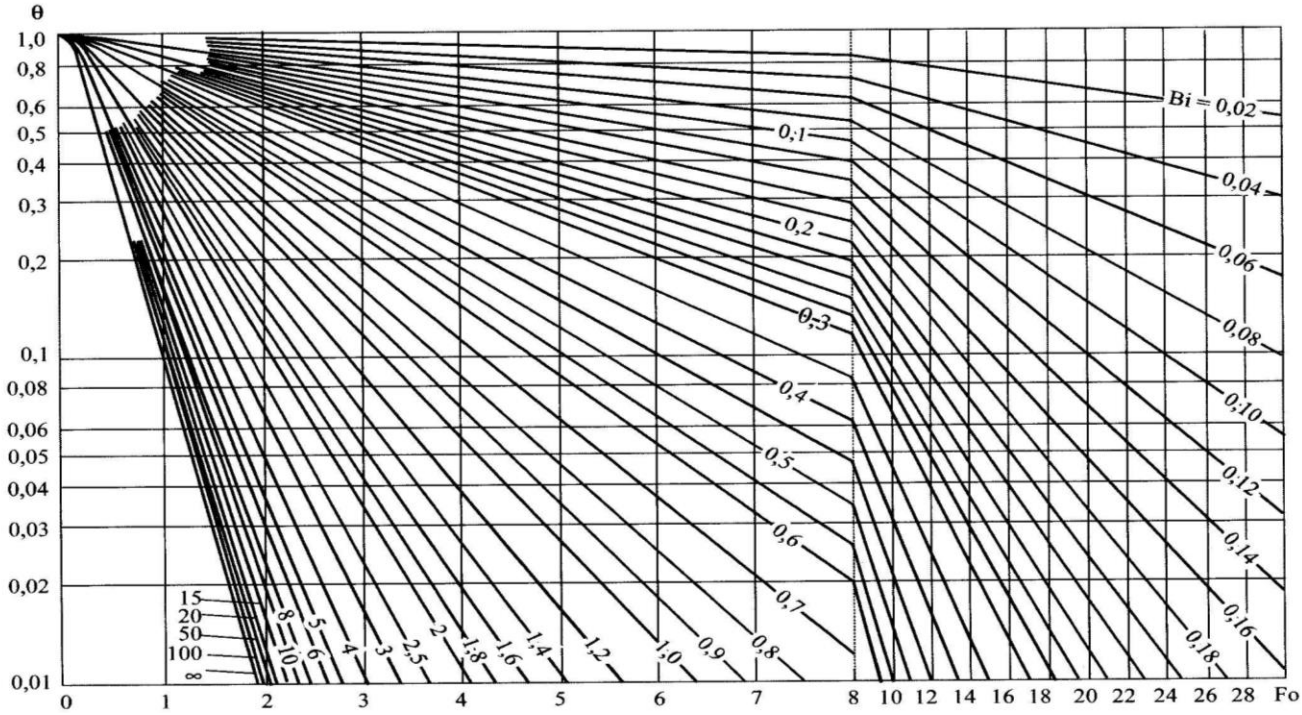


Рис. 15. Относительная избыточная температура для центра пластины [10]

5.6. Определение времени нагрева экспериментально-расчетными методами

Данные способы определения времени выдержки включают в себя экспериментальные способы определения времени, за которое температура поверхности достигает заданного значения, и расчет времени за которое перепад температур между поверхностью детали и ее серединой достигнет заданной величины. Определение температуры поверхности обычно происходит при помощи пирометров различного типа, или малоинерционных термопар, контактирующих с поверхностью. После достижения поверхности заданной температуры, изделиям необходима выдержка ее выравнивания по всему объему. Зависимость отношения перепада температур между поверхностью детали и ее серединой в конце нагрева Δt к перепаду температур в начале нагрева $\Delta t_{нач}$ связана с временем выдержки следующей формулой [12]:

для пластины толщиной 2S при Fo > 0,06

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{нач}} = 1{,}03\exp\left(-2{,}47\frac{a\tau}{S^2}\right)$$

цилиндра радиуса R при Fo > 0,08

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{нач}} = 1{,}11\exp\left(-5{,}78\frac{a\tau}{R^2}\right)$$

Уравнение выравнивания температур в цилиндре, радиус которого ранен R, а длина 2S

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{нач}} = 1{,}03\exp\left(-2{,}47\frac{a\tau}{S^2}\right)\cdot 1{,}11\exp\left(-5{,}78\frac{a\tau}{R^2}\right) = 1{,}142\exp\left(-2{,}47\frac{a\tau}{S^2} - 5{,}78\frac{a\tau}{R^2}\right)$$

Для цилиндра, у которого радиус равен длине: 2R=2S, :

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{нач}} = 1{,}142\exp\left(-8{,}25\frac{a\tau}{R^2}\right)$$

Для квадратной призмы сечением 2S x 2S и для куба со стороной 2S:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{нач}} = 1{,}09\exp\left(-7{,}41\frac{a\tau}{S^2}\right)$$

Таким образом, задав допустимые перепады температур в начале процесса нагрева и после его завершения можно определить необходимое время для выравнивания температуры по сечению детали. Общее время термической складывается из времени на прогрев детали, определенного по вышеуказанным формулам, и времени, необходимого для достижения поверхности заданной температуры, определяемого экспериментальным путем.

5.7. Определение времени нагрева экспериментальными способами

Экспериментальный способ определения времени выдержки деталей в термических печах является наиболее точным, однако определение температуры внутри детали невозможно без изготовления технологических отверстий. Такой способ может быть применен для неответственных изделий, в которых можно просверлить отверстия для размещения датчиков или при наличии бракованных деталей, выполняющих функцию образцов-свидетелей. Измерение температуры, как правило, происходит при помощи термопары, помещенной внутрь детали на заданную глубину. При этом спай термопары контактирует с материалом детали,

а провода термопары изолированы от стенок отверстия асбестовыми оплетками. Свободные концы термопары выводят за пределы рабочего пространства печи и присоединяют через компенсационные провода к потенциометру, фиксирующему изменение температуры внутри детали в течение всего периода нагрева. На основании полученных данных может быть построена зависимость изменения температуры внутри детали от времени нахождения ее в рабочем пространстве печи. Если детали являются термически тонкими, то время выдержки приблизительно может быть определено по температуре поверхности детали. В этом случае фиксация температуры поверхности обычно происходит пирометрическим способом.

5.8. Особенности теплообмена в высокотемпературных печах ваннах

В качестве нагревающей среды в печах-ваннах, работающих в диапазоне температур 200 – 1300 ^{o}C обычно используют расплавы солей, щелочей и легкоплавких металлов (таблица 9). Нагрев лучеиспусканием в этих средах практически отсутствует, и теплообмен носит конвективный характер. Интенсивность нагрева зависит от физических свойств среды и интенсивности ее перемешивания. Особенностями нагрева в печах-ваннах являются:

- высокая скорость нагрева в 4-8 раз превышающая скорость нагрева в газовых печах;
- коэффициент теплоотдачи среды в расплавленном состоянии почти пропорционально зависит от ее температуры;
- при погружении холодного изделия в первый момент на их поверхности образуется корка закристаллизовавшейся соли (настыль), обладающая низкой теплопроводностью. Толщина корки зависит от температуры расплава, объема расплава, теплоемкости расплава, температуры, объема, теплоемкости и теплопроводности изделия. Толщина настыли должна быть оптимальной. Если в процессе нагрева на поверхности настыль не образуется или ее толщина мала то в результате термического удара возможно коробление изделия. При значительной

толщине образующейся настыли необходимо значительное время на ее растворение, что приводит к снижению производительности оборудования.

Масса садки изделий при нагреве в печах ваннах может быть рассчитана по следующей формуле[12.]:

$$M_c = C_1 \rho_1 V_1 (\frac{T_{1к} - T_{1н}}{K}) \cdot (T_{2к} - T_{2н}) C_2$$

где C_1 - теплоемкость расплава; ρ_1 - плотность расплава; V_1- объем расплава; ($T_{1н}$-$T_{1к}$) - начальная и конечная температура расплава;. К - доля тепла, получаемого изделием; ($T_{2к}$ и $T_{2н}$) - начальная и конечная температура изделия; C_2 - теплоемкость изделия

Таблица 9. Свойства распространенных расплавов [14]

Состав среды	**Рабочая температура, °С**
$NaNO_2$	271...550
KNO_3	335...600
$NaNO_3$	317...500
45%$NaNO_2$ + 55%$KaNO_3$	137...500
NaCl	810...1000
KCl	768...1000
$BaCl_2$	960...1300
NaOH	322...600
KOH	360...600
Pb	327...800

6. Допустимая и возможная скорость нагрева

Технически возможная скорость нагрева деталей определяется тепловой мощностью применяемого оборудования. Нагрев деталей до заданной температуры желательно производить с максимальной скоростью. Это позволяет увеличить производительность термических устройств, уменьшить расход

энергоносителя, уменьшить количество термического оборудования и численность персонала, что в конечном итоге приводит к снижению затрат на тепловую обработку материала. Применение методов форсированного нагрева наиболее эффективно для термически тонких изделий. Для термически массивных изделий применение форсированного нагрева приводит к увеличению перепада температур между поверхностными слоями материала и основным объемом детали, что может являться причиной коробления детали и возникновения трещин на ее поверхности. Существуют различные методы форсированного нагрева:

- применение сред с высоким коэффициентом теплоотдачи (жидких сред или расплавов);
- увеличение температуры нагревательных элементов;
- создание вынужденной циркуляции среды (особенно эффективно в условиях конвективного теплообмена);
- изменение тепловой массивности садки или изделия.

При использовании методов форсированного нагрева необходимо обеспечить оптимальное сочетание высокой скорости и равномерности нагрева. Равномерность нагрева - это степень одинаковости поглощения (отдачи) теплоты всеми поверхностями изделия и равномерность движения теплового потока от поверхности детали к ее середине (или наоборот). Равномерность нагрева может быть обеспечена:

- понижением температуры процесса;
- многостадийным нагревом;
- подводом к различным участкам неодинакового количества теплоты за счет ориентации изделия к направлению движения теплоносителя или использования компенсирующих приспособлений.

Температура нагрева определяется положением критических точек фазовых превращений. Для повышения производительности температура нагрева может существенно отличаться от оптимальной, при этом в технологической

документации обязательно назначение допуска на температуру термической обработки.

Допустимая скорость нагрева определяется термическими напряжениями, вызванными перепадом температур в различных точках детали. Для стали термические напряжения особенно опасны при ее нагреве до температуры менее 500 °С. При более высокой температуре возможен нагрев с высокой скоростью. В области температур до 500 °С термические напряжения пропорциональны упругим деформациям и могут быть определены по следующей формуле [12]

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\mu}(t_П - t_Ц)$$

где β – коэффициент линейного расширения, Е – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, $t_п$ и $t_ц$ температура поверхности и центра детали.

Для стальных деталей в форме пластины возникающие напряжения могут быть рассчитаны по упрощенной формуле:

$$\sigma = 2,45(t_П - t_Ц),\ Н/мм^2$$

Для стальных деталей в форме цилиндра:

$$\sigma = 1,77(t_П - t_Ц),\ Н/мм^2$$

Для стальных деталей в форме шара:

$$\sigma = 1,38(t_П - t_Ц)\ Н/мм^2$$

В случае превышения термическими напряжениями уровня предела текучести материала происходит пластическая деформация (коробление) детали, а при превышении предела прочности - появление в материале термических трещин. Следует иметь в виду, что при нагреве происходит значительное снижение прочностных характеристик стали, поэтому вероятность коробления деталей при выполнении операций термической обработки высока.

7. Виды и конструкции термического оборудования

7.1. Маркировка термического оборудования

В маркировке термического оборудования указывают его основные характеристики [10]

Маркировка нагревательных печей

В начале маркировки указывают наименование термического оборудования, (электропечь, электрокалорифер, электронагреватель), далее - индекс, состоящий из трех или четырех основных букв, нескольких цифр и вспомогательных букв и цифр

- Первая буква обозначает метод нагрева: **Для электроустановок и печей** Д - дуговой, И - индукционный, С - сопротивления косвенный, К - сопротивления прямой, Р - руднотермический (дуговой смешанный), ЭШ- электрошлаковый, Э - электронный, П - плазменный, Н - ионный. **Для топливных устройств и печей** - М- на жидком топливе (мазут), Г - на газовом топливе
- Вторая буква обозначает основной конструктивный признак: А- карусельная, Б - барабанная, В - ванная, Г - колпаковая, Д - с выдвижным подом, Е - с подвесным конвейером, Ж - с вертикальным конвейером, 3 - для выращивания монокристаллов, И - с пульсирующим подом, К - с горизонтальным конвейером, Л - туннельная, Н - камерная, П - протяжная, Р - рольганговая, Т - толкательная, У - трубчатая, Ф - калорифер, Ш - шахтная; Э - элеваторная, Ю - с шагающим подом, Я - ручьевая.
- Третья буква обозначает среду в печном пространстве: А - азот (аммиак), В - вакуум, Г - свинец, олово, цинк, 3 - защитная (контролируемая) атмосфера, К- компрессия, М - масло, Н - восстановительная (водород), О - окислительная (воздух), С - соль, селитра, Ц - цементационная, Щ - щелочь.
- Четвертая (вспомогательная) буква обозначает: А - агрегат из нескольких печей, Л - лабораторная, Н - прецизионная, С - сушильная, П - проходная, М - муфельная, Х - с камерой охлаждения, У - для сыпучих материалов, Э - для эмалирования. Для вакуумных печей исполнение теплоизоляции: Г - графитовая, Ф - керамическая, Э - экранная.

- После букв через тире следуют размеры рабочего пространства печей (дм): прямоугольных - ширина, высота и длина, цилиндрических - диаметр и высота (длина). Исключение для: карусельных - внешний и внутренний диаметр и высота рабочей камеры; протяжных - максимальный диаметр обрабатываемой проволоки, число нитей и число ходов или толщина, ширина и число ходов ленты, барабанных - диаметр внутренний и активная длина барабана; для выращивания монокристаллов - диаметр и длина кристалла; для печей прямого нагрева — диаметр и длина нагреваемого изделия. Для электрокалориферов указывается мощность (кВт) лабораторных жидкостных термостатов - объем рабочего пространства ($дм^3$); для агрегатов - ширина, длина и высота рабочего пространства ($дм^3$) закалочной или цементационной печи.
- После соответствующих размеров или мощности (для калориферов) через дробь указывается рабочая температура печи, а для агрегатов - максимальная температура отпускной печи, в сотнях градусов Цельсия.
- Дополнительные обозначения. Например, для многокамерных печей после размера через тире указывается количество камер (шт.); для печей с выдвижным подом после температуры через тире указывается максимальная масса загрузки.
- В конце индекса указывается порядковый номер исполнения (И1, И2, ИЗ и т. д.). Исполнения отличаются между собой конструкцией или параметрами, не учитываемыми индексом.

Например. Печь СГО-20.15-2/3-И1 : электропечь сопротивления колпаковая, с воздушной атмосферой, диаметр рабочего пространства 2 м, высота 1,5 м, двухстендовая, температура 300 °С, исполнение первое;

Печь СВС-3,5.8.4/6-И2 : электрованна соляная, ширина рабочего пространства 0,35 м, длина 0,8 м, высота 0,4 м, температура 600° С, исполнение второе;

Электропечь СРЗА-6.30.2/3,5-ИЗ : агрегат сопротивления с закалочной рольганговой печью с защитной средой и рабочим пространством шириной 0,6 м, длиной 3 м, высотой 0,2 м, максимальная температура отпускной печи 350 °С, исполнение третье.

Маркировка плавильных печей

- Первая буква обозначает метод нагрева (аналогично маркировке нагревательных печей).
- Вторая буква в плавильных печах обозначает выплавляемый металл: А - алюминий и его сплавы, Б - бронза, Г - магний, Д - молибден, ниобий, К - цирконий, Л - латунь, М - медь и ее сплавы (кроме бронзы и латуни), О - олово, свинец, баббит, Р - вольфрам, рений, С - сталь и сплавы железа, Т - титан, титанистые шлаки, Ф - флюс, Х - тантал, Ц - цинк, Ч - чугун.
- Третья буква - конструктивные особенности: О - вакуумные, К - ковш; для индукционных печей: К - канальные, Т - тигельные, В - вакуумные, Х - с холодным тиглем, П - прямоточные; для печей сопротивления: Т - тигельные, К - камерные, Б - барабанные; для печей электрошлакового переплава: П - переплав, О - отливка, Л - литье; для электронно-лучевых печей: П — плавильные, Т - термообработка
- Четвертая (вспомогательная) буква обозначает: А- агрегаты, М - миксеры, Г - гарнисажные печи
- Цифра после букв обозначает емкость, а в печах переплава в кристаллизатор — максимальную массу выплавляемого слитка или отливки в тоннах.
- После дроби указывается мощность источника питания (МВА)

Пример. Электропечь ДТВГ-025-И2: электропечь дуговая, для выплавки титана, вакуумная, гарнисажная, емкостью 0,25 т, исполнение второе. Электропечь ИАТ-2,5/1,6-ИЗ: электропечь индукционная, для алюминия, тигельная, емкостью 2,5 т, мощностью 1,6 МВ-А, исполнение третье.

Маркировка установок индукционного нагрева

- Первая буква обозначает метод нагрева: И - индукционный нагрев.
- Вторая буква обозначает технологическое назначение устройства: Н - нагревательное, 3 - закалочное.
- Если устройство нагревательное, третья буква характеризует вид нагреваемого изделия или нагрева: М - мерные заготовки, П - прутки, К - кольца, Т -

трубы, У - нагрев участковый (местный).

- Если устройство служит для термообработки, третья буква обозначает вид нагреваемого изделия: Б - барабаны, шкивы, В - валы, Г - гильзы, втулки, К - валы коленчатые, П - пальцы, оси, валики, Р - валы распределительные, Ш -шестерни.
- За буквами через тире следует группа цифр, которые обозначают мощность устройства (МВ -А); частоту тока в Гц (число 10 - 10000, 8 -8000, 4-4400, 2-2500, 1-1000, 5-500, П-50); максимальный диаметр заготовок (в сантиметрах). Для прямоугольных заготовок вместо диаметра дается их ширина и высота.
- Далее через дробь показывается максимальная длина нагреваемого участка (в сантиметрах) ;
- после дроби буквы обозначают систему питания (И - индивидуальное, Ц - централизованное), режим нагрева (П - периодический, Н - непрерывный или полунепрерывный).

Пример обозначения: устройство ИНТ-0,5.1.2,5/ 600ЦП : устройство индукционное нагревательное для труб, мощность 500 кВ-А, частота тока 1000 Гц, максимальный диаметр трубы 25 мм, максимальная длина нагреваемого участка 600 сантиметров , централизованная система питания, режим нагрева периодический.

7.2 Печи периодического действия

Печи периодического действия являются наиболее простым и широко распространенным видом термического оборудования [15,16,17]. Термическая обработка в печах этого вида характеризуется неизменным положением нагреваемого тела или садки изделий в течение всего времени пребывания в печи и цикличным режимом, заключающимся в загрузке изделий, их тепловой обработке по заданному режиму и выгрузке. После каждой выгрузки следует загрузка новой садки. Как правило, печи периодического действия имеют один технологический проем (окно), через который происходит загрузка и выгрузка изделий вручную или с использованием универсального подъемно-транспортного оборудования.

Камерные печи относятся к наиболее простому и универсальному виду термического оборудования. Их применяют при единичном и мелкосерийном производстве разнообразных деталей широкой номенклатуры. Камерные печи могут быть электрическими и топливными. В высокотемпературных электрических печах открытые нагревательные элементы располагают на своде, стенках и поде рабочей камеры. В крупных камерных печах нагреватели могут быть расположены так же на внутренней поверхности загрузочной дверцы. В печах, работающих при температуре до 600 ^{o}C, передача тепла осуществляется в основном за счет конвективного теплообмена, поэтому их снабжают вентилятором для создания принудительной циркуляции атмосферы в рабочем пространстве. Футеровка высокотемпературных камерных печей обычно делается двухслойной. Внутреннее пространство выполняют из огнеупорных материалов (чаше всего на основе шамота), затем следует слой теплоизоляционного материала. Внешняя поверхность печи защищена кожухом из тонколистовой стали.

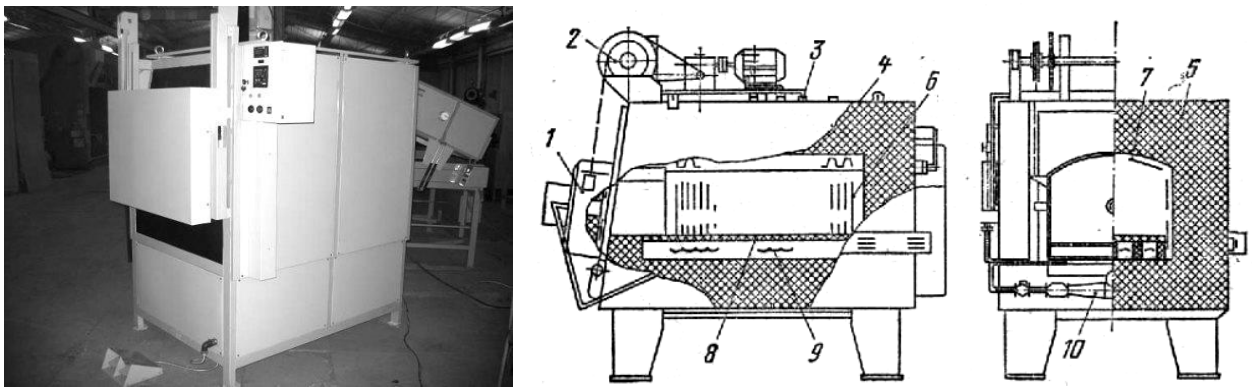


Рисунок 16. Внешний вид и устройство камерной электрической печи. 1 – дверца, 2- механизм подъема дверцы, 3 ввод термопары, 4- кожух, 5- футеровка, 6- боковые нагреватели, 7 – сводовые нагреватели, 8- подовые плиты, 9- подовые нагреватели, 10- устройство пламенной завесы.

Среди топливных камерных печей наибольшее распространение получили конструкции с непосредственным отоплением или нижними топками. При нижнем расположении топок (под подом) за счет тепла пода и циркуляции

дымовых газов обеспечивается высокая равномерность нагрева садки. При температуре нагрева более 900 °С применяют печи с непосредственным отоплением. В этом случае горелки располагают по высоте печи в шахматном порядке. Факел верхних горелок направляют на свод печи, а нижних - на изделия, в результате чего создаются кольцевые потоки дымовых газов, энергично омывающие садку. Для нагрева в контролируемых атмосферах применяют муфельные камерные печи. При использовании топливных печей муфелирование пламени производят радиационными трубами, располагаемыми над нагреваемыми деталями и под ними.

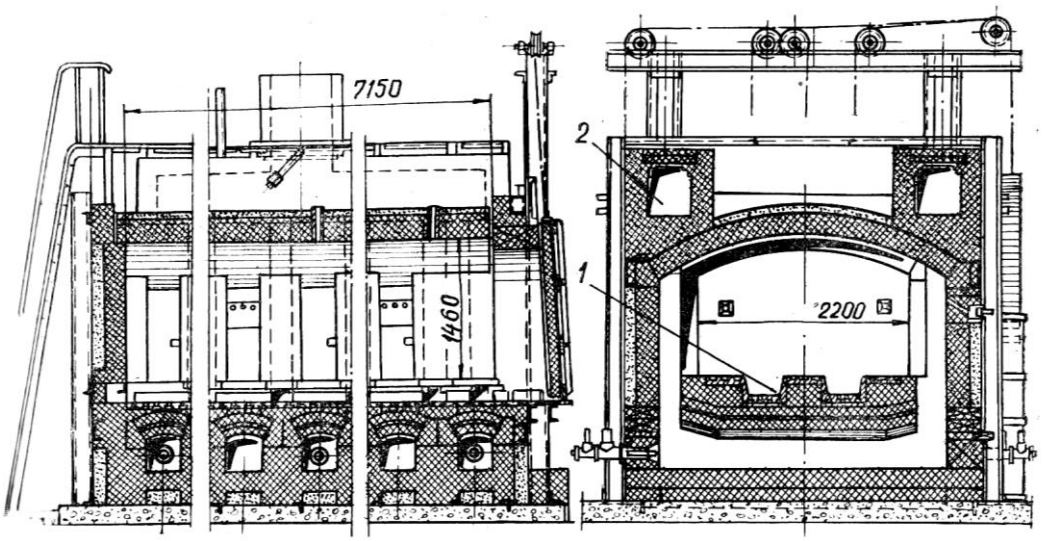


Рисунок 17. Камерная печь с нижним расположением топок

Камерные печи с выдвижным подом предназначены для термической обработки тяжелых деталей, погрузка и выгрузка которых осуществляется кран-балками или мостовыми кранами. Они состоят из стационарной камеры нагрева и подвижного пода в виде тележки, футерованной теплоизоляционными и огнеупорными материалами. Привод перемещения пода, как правило, делают электромеханическим тросового типа. В печах такого типа значительное внимание уделяют герметизации рабочего пространства. Боковые щели между тележкой и стенками печи герметизируются песочными затворами. В электрических печах нагревательные элементы располагают на своде и боковых

стенках, а в печах большой мощности, кроме того – на выдвижном поде и дверце загрузочного окна. В топливных камерных печах с выдвижным подом подподовое расположение горелок не используют, а применяют щелевые горелки, направленные на свод печи и непосредственно на садку. Горелки верхнего и нижнего рядов располагают в шахматном порядке. Основными недостатками печей с выдвижным подом являются значительные энергетические затраты нагрев выдвижного пода и невозможность частичной выгрузки садки без ухудшения качества обработки оставшейся части деталей.

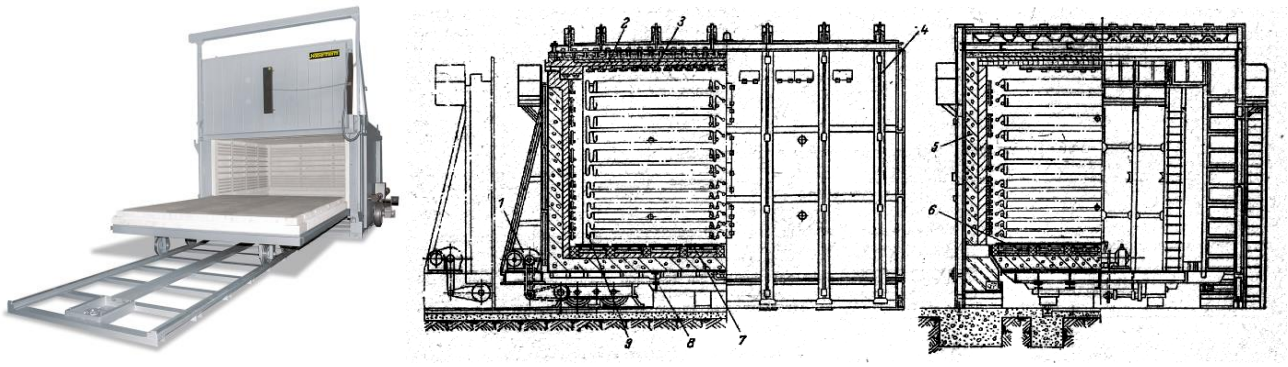


Рисунок 18. Внешний вид и устройство камерной электрической печи с выдвижным подом . 1 – привод перемещения пода, 2- свод, 3 сводовые нагреватели, , 4- кожух, 5- футеровка, 6- подовые нагреватели, 7 – сводовые нагреватели, 8- выдвижной под, 9- боковые нагреватели.

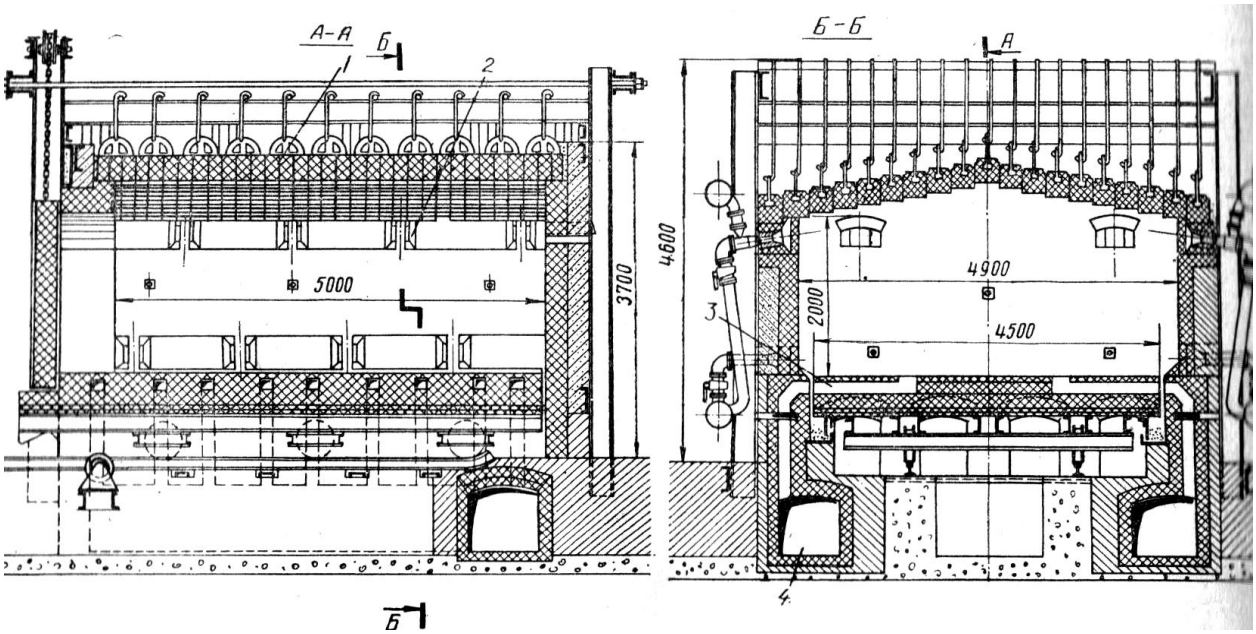


Рисунок 19. Конструкция газовой печи с выдвижным полом 1-подвесной свод, 2-газовые горелки, 3- дымоотводной канал, 4- боров.

Шахтные (вертикальные) печи имеют рабочее пространство в виде футерованной шахты круглого, эллиптического или прямоугольного поперечного сечения. Загрузка изделий в них происходит сверху. Часто крышку делают герметичной, что предотвращает окисление деталей при термообработке и позволяет использовать защитные атмосферы. Нагревательные элементы в шахтных печах обычно установлены по боковым стенкам. Горелки или форсунки при этом располагают тангенциально. Применение шахтных печей целесообразно в следующих случаях:

- для термической обработки длинномерных изделий в подвешенном состоянии;
- для единовременной обработки крупных партий деталей, располагаемых на этажерках, подвесах или корзинах, погрузка и выгрузка которых производится с помощью кран-балок или мостовых кранов;
- для химико-термической обработки деталей в газовых средах с плотностью, превышающей плотность воздуха, например цементации или азотирования;

- для операций нагрева в среде тяжелых инертных газов, например для светлой закалки в среде аргона.

Шахтные печи занимают мало места, их легко можно заглубить в землю. С помощью универсальных подвесных механизмов типа кран-балок легко производится загрузка и выгрузка садки. Крупные детали крепят обучено на специальных приспособлениях-подвесках, которые устанавливают в рабочем пространстве печи, заполняя его по высоте. Мелкие детали обычно помещают в корзины, которые устанавливают в печи друг на друга по высоте шахты.

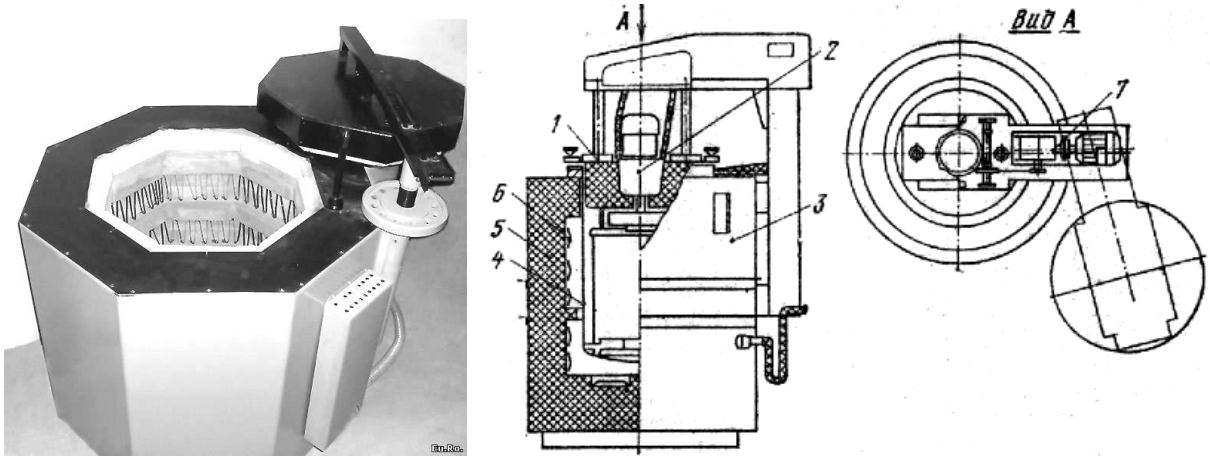


Рисунок 20. Внешний вид и устройство шахтной электрической печи. 1 – крышка, 2- вентилятор, 3 - кожух 4- муфель, 5- футеровка, 6- нагреватели, 7 – привод перемещения крышки.

Колпаковые печи представляют собой переносной нагревательный колпак со стенками из огнеупорного и теплоизоляционного материала, по внутренним стенкам которого расположены нагревательные элементы. Нагревательный колпак устанавливают на футерованный кирпичом неподвижный стенд, загружаемый садкой. Наружный колпак используют только для нагрева, а при охлаждении садки его снимают и переносят на другой стенд. Обычно колпаковые печи работают с двумя- тремя стендами, один из которых находится под нагревом, а другие под охлаждением, загрузкой и разгрузкой садки. Это позволяет обеспечить высокий КПД и практически устранить простои печи. Садку обычно накрывают муфелем из жаростойкой листовой стали, что позволяет производить

нагрев в защитной атмосфере. Колпаковые печи применяют для светлой термической обработки бунтов проволоки, и рулонов листовых материалов, высокотемпературной обработки электротехнической и специальных видов сталей. Основным недостатком колпаковых печей является необходимость применения кранового оборудования для разгрузки и выгрузки садки и перемещения колпака и, соответственно, значительная высота необходимых для размещения такого оборудования производственных помещений.

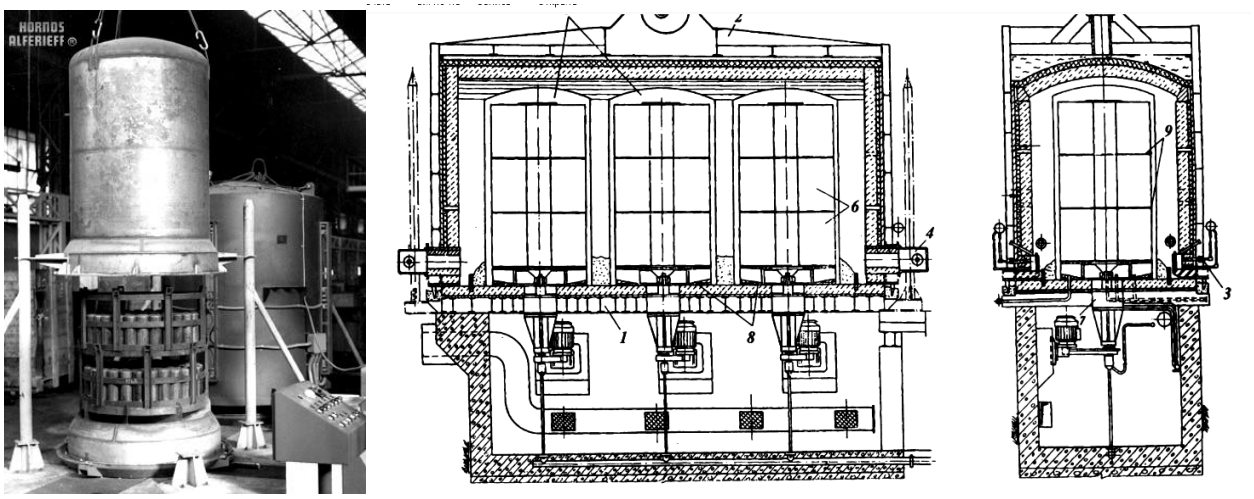


Рисунок 21. Внешний вид колпаковой печи и схема трехстопной колпаковой печи для отжига. 1- стенд, 2- нагревательный колпак, 3- горелки, 4 –печной эжектор, 5- муфели, 6- отжигаемые рулоны, 7- циркуляционный вентилятор, 8- направляющие аппараты, 9- конверторные кольца

Элеваторные печи (печи с поднимающимся подом) имеют горизонтально перемещаемый под, который вместе с обрабатываемыми деталями поднимают в камеру с нагревательными устройствами. В них нет технологических отверстий в боковых стенках и на своде, поэтому тепловые потери печей такого типа минимальны. Для создания герметичности поднимающийся под со всех сторон имеет водяной или песочный затвор. Элеваторные печи целесообразно использовать при нагреве в летучих контролируемых атмосферах, например в водородной среде. Достоинством печей элеваторного типа так же является минимальное расстояние из печи до поверхности закалочного бака. Основным

недостатком печей с поднимающимся подом является ограниченная грузоподъемность и высокая стоимость поднимающих устройств. Для подъема пода с изделиями чаще всего используют подъемники гидравлического типа.

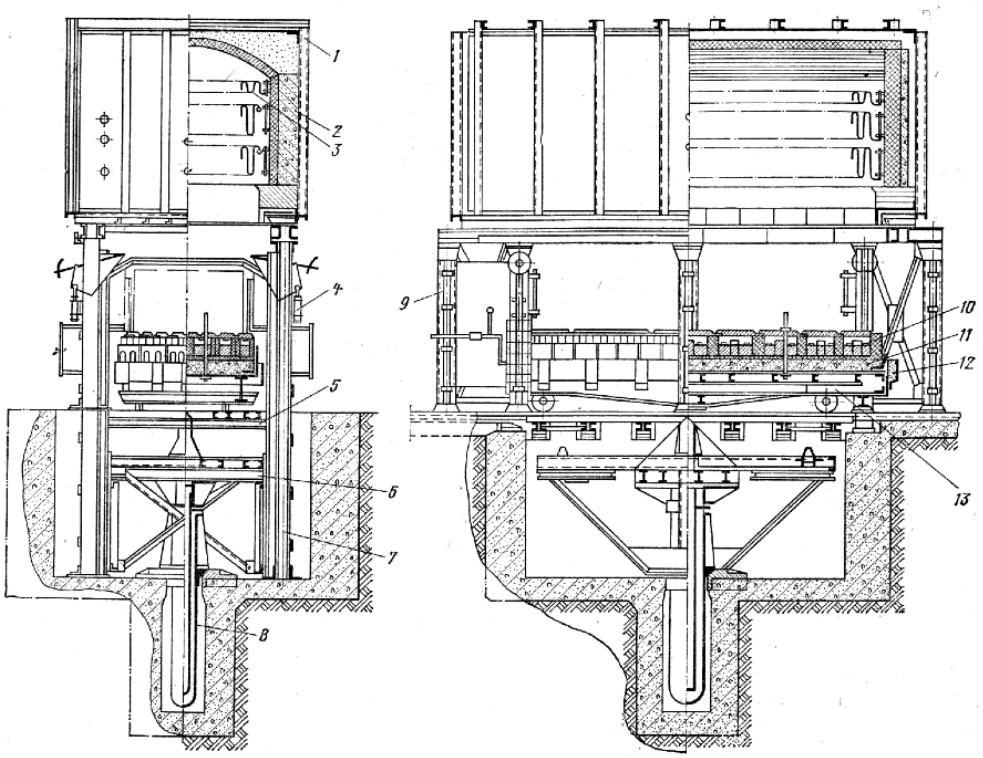


Рисунок 22. Элеваторная печь. 1- кожух,2- футеровка,3- боковые нагреватели, 4- защелки пода, 5- платформа, 6, 8-плунжер с платформой, 7,9. – колонны, 10- подовые нагреватели, 11- футеровка тележки, 12 – песчаный затвор, 13 – тележка

7.3. Печи непрерывного действия

Для нагрева большого количества однотипных заготовок применяют механизированные печи непрерывного действия, в которых нагреваемые заготовки перемещаются внутри рабочего пространства печи при помощи специальных механизмов. [15,17,18]. По сравнению с печами периодического действия (садочными печами) они имеют более высокую производительность и меньший удельный расход энергоносителя. Температура по длине рабочего пространства в таких печах может быть постоянной или переменной. Печи, в которых температура по длине рабочего пространства значительно меняется, называются методическими. В зависимости от используемого технологического

процесса в них может осуществляться как нагрев изделий, так и их дальнейшая выдержка с последующим охлаждением. Для повышения эффективности тепловой обработки рабочую зону проходных печей обычно разбивают на две или три зоны с различной рабочей температурой. В первой зоне, называемой методической температура плавно повышается, что позволяет снизить тепловой удар и предотвратить коробление детали вследствие значительного перепада температуры по ее сечению. Как правило, в топливных печах методическая зона является неотапливаемой. В электрических печах (и ряде топливных печей) методический режим поддерживается за счет выбора тепловой мощности нагревательных элементов и горелочных устройств. За методической зоной следует сварочная зона с постоянной высокой температурой, которую выбирают в зависимости от вида обрабатываемых материалов и конфигурации деталей. При термической обработке неответственных стальных деталей температуру в сварочной зоне задают на 80 - 100 ^{o}C выше необходимой температуры нагрева металла. Однако при тепловой обработке в двухзонных печах при задержке деталей в печи возможен перегрев металла и ухудшение качества деталей. При трехзонном нагреве по ходу металла добавляют третью теплотехническую зону, называемую томильной. Температура в этой зоне близка к заданной температуре нагрева металла, что позволяет обеспечить качественный нагрев деталей не опасаясь их перегрева. В случае использования трехтонного режима нагрева температура в сварочной зоне может быть значительно выше, чем в томильной, что обеспечивает более высокую интенсивность нагрева и увеличивает производительность термического оборудования. Название типа печи чаще всего соответствует используемому механизму перемещения заготовок или деталей.

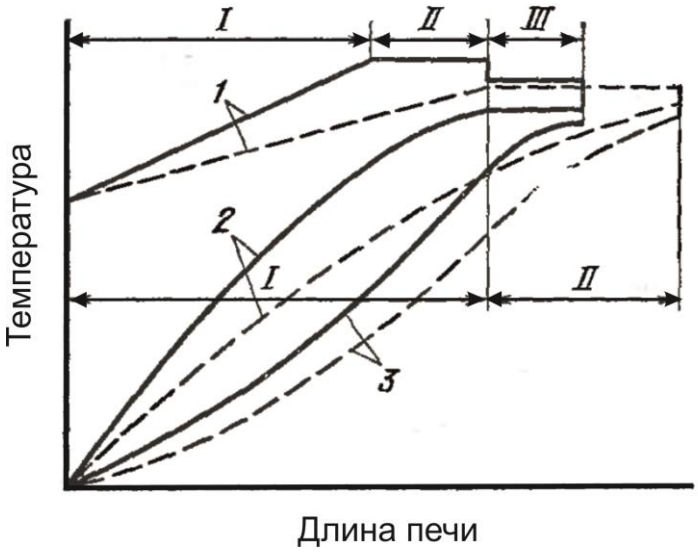


Рисунок 23. Распределение температуры продуктов сгорания (1), поверхности (2) и объема (3) нагреваемы ж деталей при двухзонном (пунктирные линии) и трехзонном нагреве (сплошные линии). I –методическая зона, II – сварочная зона, III- томильная зона [9].

Карусельные (кольцевые) печи представляют собой замкнутый туннель, в котором на колесах или роликах вращается футерованный под. Чтобы исключить подсос воздуха и выход тепла в зазор между стенками и вращающимся подом выполняют песочный, водяной или масляный затвор. Нагреваемые детали загружают или выгружают через боковые окна. Карусельные печи применяют для нагрева заготовок, форма которых неудобна для термической обработки в печах других типов – фигурных изделий, массивных изделий небольшой длины и т.д. Печи имеют незначительную длину, поэтому их часто применяют, когда размещение проходных печей с поступательным движением деталей затруднительно из-за недостатка рабочего пространства в цехе. В небольших печах тепловой режим обычно одинаков. Рабочее пространство крупных кольцевых печей, как правило, разбивают на зоны с различными рабочими температурами, что обеспечивает высокие показатели производительности тепловой обработки. В печах прокатного производства кольцевые печи имеют подогревательную (методическую), нагревательную (сварочную) зону и зону выравнивания температур (томильную). Небольшие печи имеют электрические

нагревательные элементы, в больших производительных нагревательных печах нагрев осуществляют газовыми горелками. Их устанавливают на боковых стенках. В печах с одинаковым тепловым режимом горелки располагают тангенциально, что обеспечивает интенсивную циркуляцию продуктов горения в рабочем пространстве и повышает скорость и равномерность нагрева. Дымовые газы выводят в трубу, которую чаще всего располагают в центре печи. Нагреваемые изделия укладывают на вращающийся под в одно или несколько концентрических колец. Расстояние между соседними изделиями обычно задают не менее 100 мм. В зависимости от расположения оборудования в цехе карусельная иметь может иметь одно окно, через которое производится загрузка и выгрузка изделий или два окна: окно загрузки и окно выгрузки. Основным недостатком карусельных печей является сложность конструкции и ограниченная грузоподъемность с вращающегося пода.

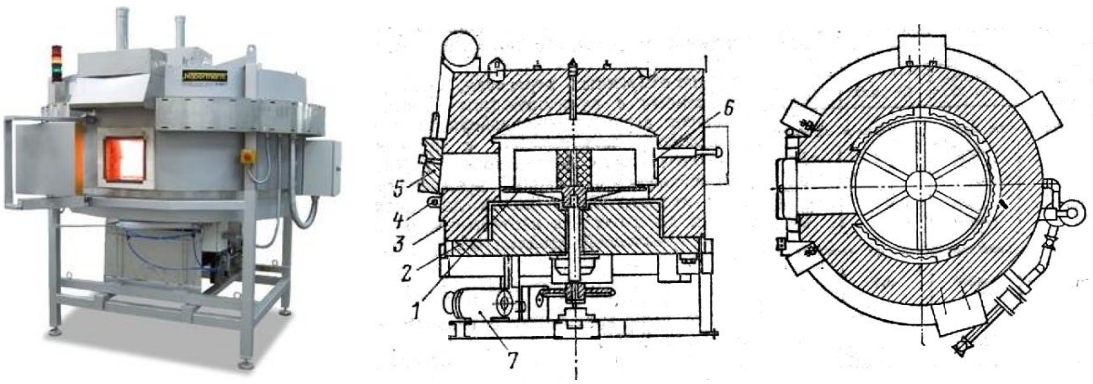


Рисунок 24. Внешний вид и устройство карусельной печи . 1 – стол, 2- футеровка, 3 - кожух, 4- газопровод, 5- дверца, 6- нагреватели, 7 – привод

Рольганговые (роликовые) печи применяют для нагрева листового металла, фасонного проката, труб и длинномерных изделий. Существенным достоинством роликовых печей является простота встраивания в поточные линии производства. Движение изделий в печи осуществляется с помощью параллельно расположенных в поду вращающихся роликов. При транспортировке изделий круглой формы ролики устанавливают под углом к направлению перемещения,

что обеспечивает вращение изделий и повышает равномерность их нагрева. Оси роликов выходят за пределы печи, вращение осуществляется электрическим приводом. Для повышения надежности работы оси роликов и цапфы подшипниковых узлов охлаждают проточной водой. Скорость вращения роликов можно менять в широких пределах, подбирая рациональное время термической обработки. В высокотемпературных электрических роликовых печах нагревательные элементы располагают на поду, своде и боковых стенках печи. В низкотемпературных электрических роликовых печах нагревательные элементы отделяют от рабочего пространства экранами, а принудительную циркуляцию атмосферы в рабочем пространстве создают центробежными вентиляторами. В топливных печах горелки располагают на боковых стенках выше и ниже уровня роликов. Для футеровки печей применяют волокнистые и легковесные керамические материалы. Роликовые печи хорошо поддаются уплотнению тамбурами с клиновыми зазорами и позволяют проводить обработку в защитной атмосфере.

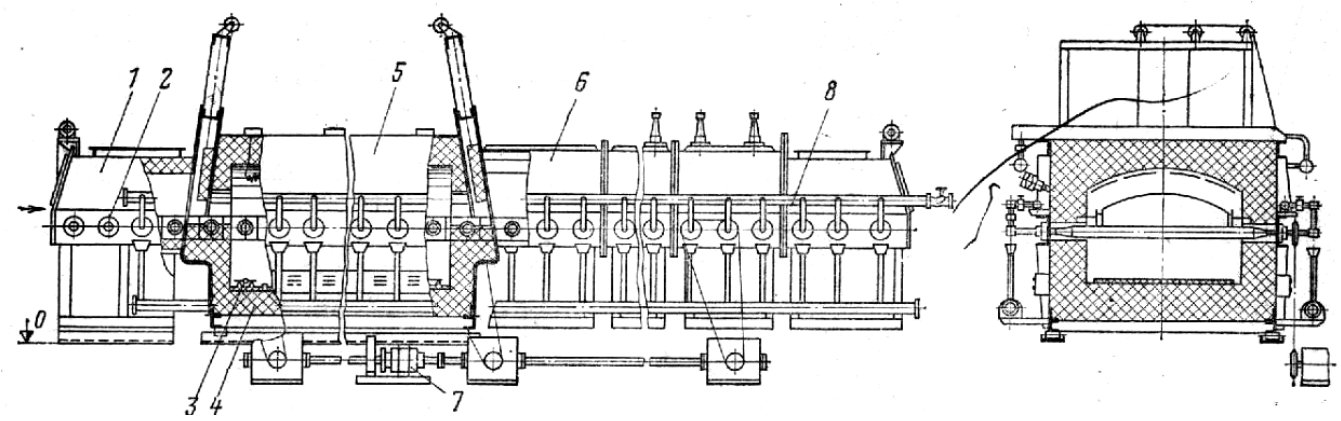


Рисунок 25. Рольганговая высокотемпературная электропечь

1-камера загрузки, 2- рольганг, 3- нагреватели, 4- футеровка, 5- камера нагрева, 6- камера охлаждения, 7- привод рольганга, 8- трубопровод охлаждения.

Барабанные печи представляет собой футерованный кирпичом горизонтальный цилиндр, вращающийся вокруг своей оси. В барабанных печах детали приводятся в движение в результате вращения барабана и скольжения по

винтовым ребрам внутри него. Барабанные печи применяют для термической обработки мелких деталей, не боящихся механических повреждений – шариков, роликов, гаек и т.д. В барабанных печах нельзя нагревать изделия сложной формы, а так же детали с тонкими стенками и острыми краями. Наиболее часто барабанные печи выполняют по типу ретортных с закрываемым наглухо отверстием, что позволяет применять при нагреве защитные среды. При закалке в конце барабанной печи обычно ставят наклонный лоток, по которому детали падают в закалочный бак и затем извлекаются из него элеваторным механизмом.

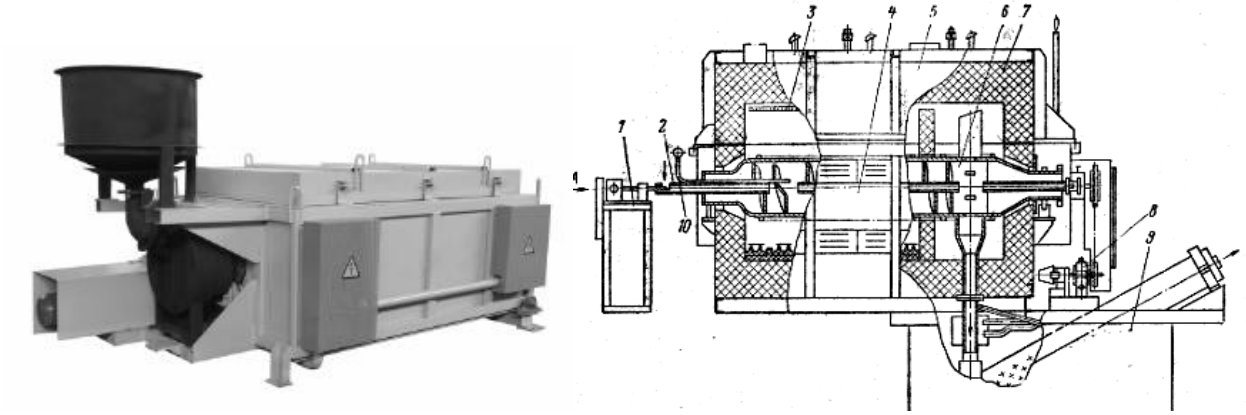


Рисунок 26. Внешний вид и схема барабанной электропечи. 1- механизм загрузки, 2 –загрузочный патрубок, 3- нагреватели, 4-кожух, 5- крышка, 6- муфель, 7- футеровка, 8- привод муфеля, 9- закалочный бак.

Проходные толкательные печи находят широкое применение благодаря простоте и высокой надежности. Они хорошо поддаются герметизации, поэтому их часто используют для нагрева деталей в защитной атмосфере. В толкательных печах садка под действием башмака толкателя перемещается по направляющим брусьям, заложенным в футерованный под. Брусья изготавливают из жаропрочной стали или износостойких огнеупорных материалов (корунда, карбида кремния и т.д.). Загрузка и перемещение изделий в печи производится с помощью толкателя. Изделия, токая друг друга, перемещаются в рабочей камере печи. Непосредственно проталкивать можно только детали, имеющие относительно простую форму. В случае возможного повреждения деталей из-за

трения о подовые брусья или вследствие контакта друг с другом, проталкивание изделий осуществляют на поддонах. Как правило, поддоны имеют прямоугольную форму, причем длина и ширина поддона существенно отличаются. Это позволяет менять плотность грузопотока за счет продольного или (и) поперечного расположения поддонов. При длинных грузопотоках на выходе печи ставится выталкиватель (таскатель), работающий синхронно с толкателем и извлекающий поддоны с изделиями из рабочего пространства печи. Толкательные печи обычно имеют значительную длину, поэтому в них используют принцип зонального нагрева. В методической зоне происходит предварительный подогрев изделий то температуры 500 °С, затем в сварочной зоне происходит форсированный нагрев изделий. Температура в сварочной зоне печи обычно составляет 1250 -1300 °С. В третьей зоне происходит выдержка (томление) деталей. Температура томильной зоны близка к оптимальной температуре термической обработки. Электрические толкательные печи обычно имеют защитную атмосферу, подводимую в виде газовой завесы у загрузочных окон, что препятствует подсосу воздуха в рабочее пространство печи. Низкотемпературные печи снабжают вентиляторами для создания циркуляции среды и обеспечения равномерности нагрева.

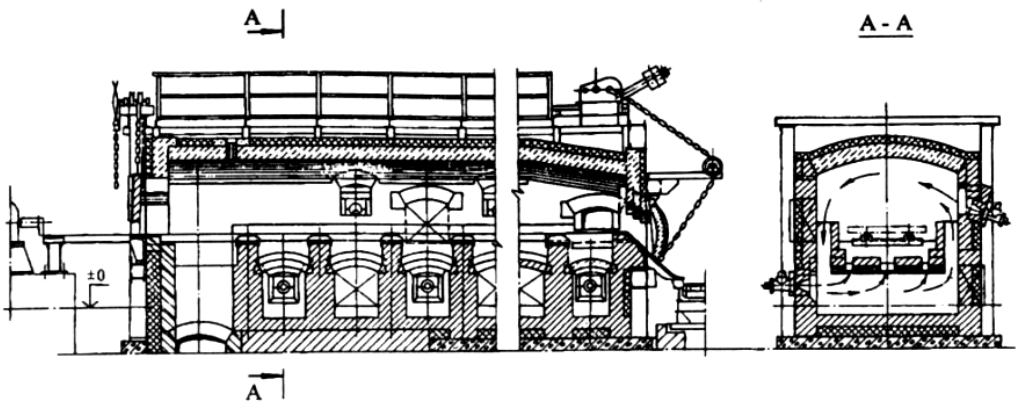


Рисунок 27. толкательная газовая печь с подподовыми топками

В конвейерных печах детали транспортируют специальными конвейерами горизонтального, вертикального или подвесного типа. Наиболее

распространенными в термической обработке являются печи с горизонтальным конвейером, который натянут между двумя барабанами, расположенными у загрузочного и выгрузочного окна печи. При движении в печи лента конвейера опирается на промежуточные балки или ролики. Ленты конвейера и приводные цепи работают на растяжение и могут вытягиваться, поэтому конвейерные печи применяют для транспортировки изделий малого веса и нагрева до температуры не превышающей 1000 ^{o}C. Лента конвейера может быть изготовлена из пластин, набранных на стержни (пластинчатый конвейер), из сетки (сетчатый конвейер), из звеньев цепи (цепной конвейер). Конвейерные печи на газовом топливе чаще всего выполняются с непосредственным отоплением. Горелки верхнего ряда установлены над деталями, нижнего - под деталями между ветвями ленты конвейера. В электрических конвейерных печах нагревательные элементы располагают на боковых стенках и на своде печи. Конвейерные печи с защитной атмосферой легко герметизируются защитными заслонками или шторками. Конвейерные печи являются наиболее удобными в эксплуатации печами непрерывного действия и легко встраиваются в поточные линии производства. Однако конвейерные печи обладают высокой стоимостью, сложны и дороги эксплуатации вследствие наличия большого количества подвижных узлов и значительных затрат тепла на нагрев конвейера.

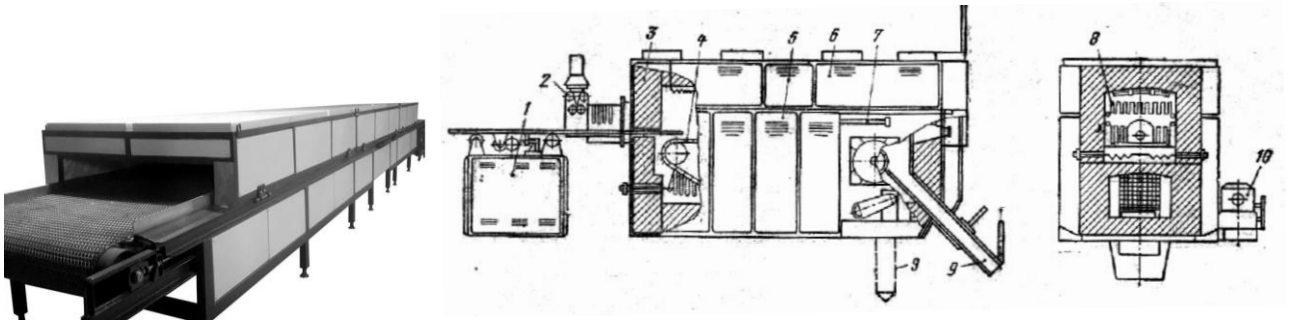


Рисунок 28. Внешний вид и устройство конвейерной печи . 1 –механизм загрузки, 2- камера загрузки, , 3 – футеровка,, 4- конвейер, 5- кожух, 6- крышка, 7 – газопровод, 8 – нагреватели, 9 – лоток, 10 - привод

Туннельные печи представляют собой длинный канал, в котором по продольно уложенным рельсам движется непрерывный поток тележек с

нагреваемыми деталями. Рабочая часть тележки футерована огнеупорным материалом, а подвижная часть изолируется от рабочего пространства печи песочными затворами. Топки располагаются в боковых стенках туннеля. Чаще всего туннельные печи применяют в массовом производстве для нагрева массивных заготовок или изделий. На входе и выходе печи располагают рельсовые пути, на которых производится загрузка перед обработкой, охлаждение и выгрузка готовой продукции

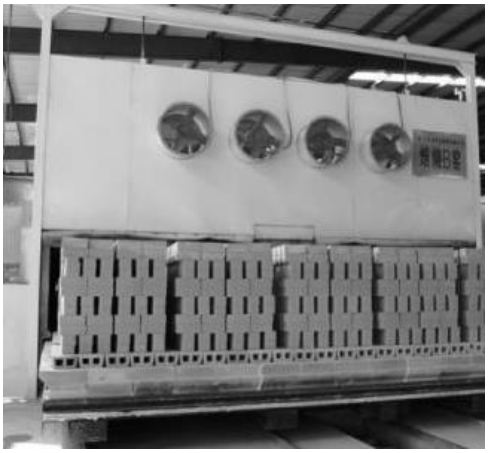


Рисунок.29. Туннельная печь для обжига керамических изделий

7.4.Печи ванны

Печи-ванны применяют в термических цехах для нагрева деталей при закалке, отпуске, нормализации, для химико-термической обработки (цианирования, жидкостной цементации), а также для охлаждения деталей при изотермической и ступенчатой закалке. Нагрев в печах ваннах имеет ряд преимуществ перед другими нагревающими и охлаждающими устройствами. В них обеспечивается высокая скорость и равномерность нагрева, защита нагреваемых изделий от окисления и обезуглероживания. При неполном погружении в расплав соли возможен местный нагрев или охлаждение части детали. При этом печи-ванны обладают рядом существенных недостатков: большим расходом электроэнергии из-за потерь тепла через зеркало ванны; длительным разогревом ванны до выхода на рабочий режим; малой стойкостью

тиглей; опасностью термических и химических ожогов; токсичностью и взрывоопасностью ряда расплавов.

Ванны с внешним обогревом представляют собой тигель, вставленный в печь с электрическими или топливными нагревательными устройствами. Тигли изготавливают литыми, штампованными или сварными с толщиной стенки 12 - 30 мм. Тепло передается расплаву через стенки тигля, поэтому температура рабочего пространства печи должна значительно превышать температуру расплава, что увеличивает опасность прогорания тигля в случае прямого контакта с факелом горелки. В случае прогара тигля в ванне предусмотрен сток для солей и жидкого металла. В электрических печах-ваннах наружным обогревом нагреватели располагают на внутренней поверхности кладки в несколько рядов по высоте. Недостатком печей-ванн с наружным обогревом являются значительные тепловые потери, малый КПД, низкая стойкость тиглей и сложность их замены.

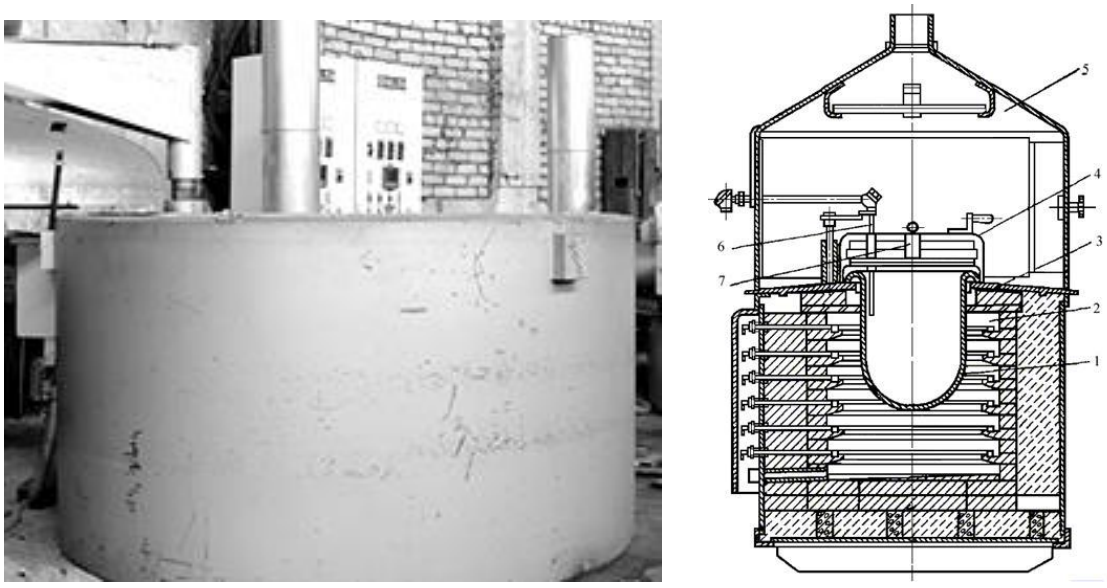


Рисунок 30. Электрическая тигельная печь- ванна с наружным обогревом. 1- тигель, 2 - рабочая камера, 3 - чугунная плита, 4 - раздвигаемая крышка, 5 - вытяжной колпак, 6 - термопара, 7 - отверстие для подвешивания приспособлений с деталями

В печах ваннах с внутренним обогревом трубчатые нагревательные элементы располагают непосредственно в расплаве внутри ванны. Внутренний

обогрев уменьшает потери тепла, повышает КПД печи, увеличивает срок службы тигля и способствует получению в расплаве равномерного распределения температуры. Для нагрева могут быть использованы ТЭНы или радиационные трубы, отапливаемые газовыми инжекционными горелками. Для ускорения нагрева и равномерности температурного поля ванны снабжают механическими мешалками с электроприводом.

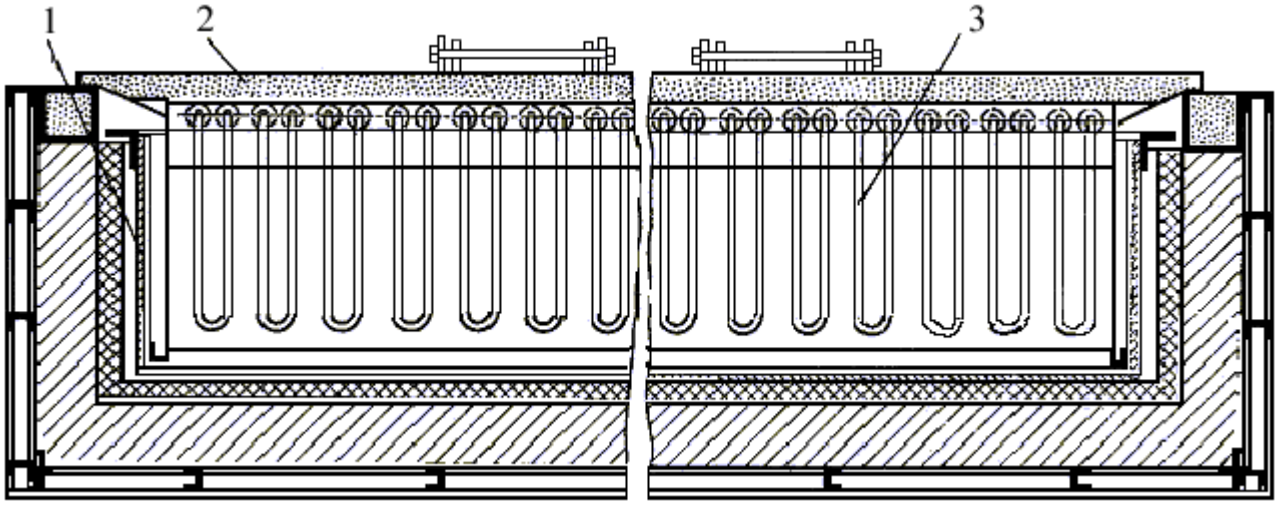


Рисунок 31. Схема электрической ванны с внутренним обогревом:1 - сварной тигель, 2 - футерованная крышка, 3 - U- образные нагревательные элементы

В электродных печах ваннах электрический ток низкого напряжения пропускается через расплавленную соль, которая оказывает сопротивление прохождению тока и разогревается. Трансформаторы ванн имеют переключатели ступеней напряжения, позволяющие регулировать подводимое к электродам напряжение в пределах от 6 до 20 Вольт. Рабочее пространство электродных печей-ванн выкладывается из шамотного кирпича и изолируется шлаковой ватой. Для предотвращения утечки соли за огнеупорной кладкой устанавливают железный промежуточный тигель. Электродные печи ванны используют при температуре нагрева от 400 до 1300 ^{o}C. В твердом виде соль имеет высокое электрическое сопротивление, поэтому для предварительного расплавления соли используют трубчатые нагревательные элементы. Наиболее типичная область

применения электродных печей ванн - нагрев под закалку быстрорежущих и нержавеющих сталей.

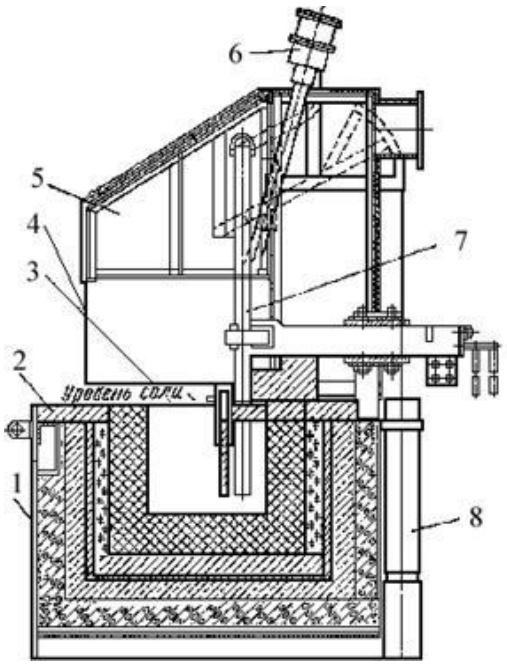


Рисунок 32. Конструкция электродной печи-ванны 1- кожух, 2- футеровка, 3- перегородка, 4 - экран для защиты от брызг, 5- вытяжной зонт, 6- пирометр, 7- электроды, 8- противовес.

8. Топливо и устройства для его сжигания

Топливом называют горючие вещества, которые сжигают для получения в промышленных целях большого количества тепла. Основным источником энергии в настоящее время является органическое топливо, которое может быть твердым, жидким и газообразным. Основными горючими элементами топлива являются углерод и водород. Кроме этих элементов в состав топлива входят сера, негорючие соединения, вода, азот и, не участвующий в процессе горения кислород. Зола вместе с влагой составляет негорючую часть топлива и называется внешним балластом. Внешний балласт снижает ценность топлива, к тому же часть теплоты расходуется на испарение влаги и уносится с дымовыми газами в атмосферу. Кислород, входящий в состав химических соединений и не участвующий в процессе горения, а так же азот называют внутренним балластом топлива. Важнейшими техническими характеристиками топлива являются

теплота сгорания, выход летучих веществ и свойства кокса. Для отопления нагревательных и термических печей применяют главным образом газообразное топливо, реже мазут. При выполнении операций ковки и термических операций в небольших кузнечных мастерских может быть использовано твердое топливо - древесный или каменный уголь.

8.1. Основные характеристики топлива

- *Теплота сгорания* это количество тепла, выделяемое при сгорании 1 м^3 или 1 кг топлива. Различают *высшую теплоту сгорания Qв* - количество тепла, которое было бы выделено при сгорании топлива и охлаждении продуктов сгорания до 0 °С, т. е. физическое тепло и тепло, выделяемое при конденсации водяных паров. *Низшая теплота сгорания Qн* - физическое тепло газообразных продуктов сгорания. В печных агрегатах продукты сгорания никогда не охлаждаются до низких температур, поэтому Qн является более показательной характеристикой.
- *Теоретическое количество воздуха*, необходимого для сжигания 1 м^3 газа или 1 кг мазута или угля, которое определяют при расчетах сгорания топлива. Действительное количество воздуха, подаваемое на 1 м^3 или 1 кг топлива, как правило, отличается от теоретического и его выбирают исходя из технологических соображений. Отношение действительного и теоретического количества воздуха носит название коэффициента расхода воздуха.
- *Калориметрическая (теоретическая) температура сгорания* $T_к$ - это температура продуктов сгорания при действительных значениях температуры газа и воздуха и коэффициента расхода воздуха. При увеличении коэффициента расхода воздуха калориметрическая температура продуктов полного сгорания понижается, а при подогреве газа или воздуха повышается.
- *Действительная температура сгорания* $T_д$ зависит от продолжительности процесса горения во времени, теплоотдачи в окружающее пространство, химического и механического недожога. Приближенно действительную

температуру сгорания можно определить по уравнению

$$T_д = \eta \cdot T_к$$

где η - эмпирический пирометрический коэффициент. Для проходных печей его принимают равным 0,7 - 0,75, для садочных печей совершенной конструкции от составляет 0,80 - 0,85. Характеристики некоторых видов топлив приведены в табл. 3.5.

Таблица.10. Характеристики некоторых газовых топлив [20]

Вид топлива	Низшая теплота сгорания,	Необходимое количество воздуха для сжигания единицы топлива, $м^3$	Теоретическая температура горения, ^oC
Каменный уголь	20,900-30,15 мДж/кг	8,5	2010
Дрова (влажность 20%)	12,300 мДж/кг	4,1-5,4	1700
Бензин автомобильный	44,0 мДж/кг	14	1865
мазут	40,3 мДж/кг	10,4	1800
Метан	35,8 мДж/$м^3$	9,5	2010
Пропан	91,2 мДж/$м^3$	23,8	2110
Природный газ	36 мДж/$м^3$	9,52	2020
Водород	10,7 мДж/$м^3$	2,38	2230

Горение топлива это сложный физико-химический процесс взаимодействия топлива с окислителем, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты и быстрым подъемом температуры. Если топливо и окислитель находятся в одинаковом фазовом состоянии, то горение называется гомогенным. Если топливо и окислитель находятся в разных фазовых состояниях, то горение называется гетерогенным. Горение газового топлива является процессом

гомогенным, а горение кокса и мазута - гетерогенным. Минимальная температура, при которой газ воспламеняется, называется температурой воспламенения. Эта температура не является постоянной и зависит от вида топлива и условий подвода и отвода теплоты и некоторых других факторов. Так температура воспламенения метана находится в диапазоне 650 - 750 °С. Температура воспламенения имеет большое значение для организации безопасного процесса горения [19].

Полное время сгорания топлива $T_г$ складывается из времени $T_д$, необходимого для подвода окислителя к топливу (диффузионная стадия процесса) и времени $T_к$, необходимого для протекания самой химической реакции горения (кинетическая стадия горения):

$$T_Г = T_Д + T_К$$

При сжигании газа возможны два предельных случая. Если $T_д$ » $T_к$,. В этом случае процесс горения лимитируется в основном временем смесеобразования. Если $T_к$ » $T_д$, то горение лимитируется временем протекания химических реакций окисления. В зависимости от способа подачи воздуха, необходимого для горения, возможны следующие виды сжигания газа:

- горение однородной газовой смеси, когда сжигается предварительно подготовленная горючая смесь;
- диффузионное горение, когда газ и воздух подаются порознь;
- горение с недостаточным объемом воздуха (газ подается вместе с воздухом, но объем последнего недостаточен для полного горения).

Диффузионный принцип сжигания осуществляется при раздельной подаче газа и воздуха. В зависимости от характера движения пламени (факела) диффузионное горение подразделяется на ламинарное горение и турбулентное горение. При ламинарном движении газа и воздуха смешение происходит только за счет молекулярной диффузии. Из-за медленного смесеобразования и низкой интенсивности горения при ламинарном диффузионном горении факела имеет значительную длину (рис.33). Сжигание газов в этом случае происходит с большим химическим недожогом, поэтому такое сжигание в термическом

оборудовании использует редко. Для интенсификации процессов горения используется турбулизация пламени. Турбулентный диффузионный факел обеспечивает более равномерное распределение температур и более равномерную теплоотдачу в рабочем пространстве печи.

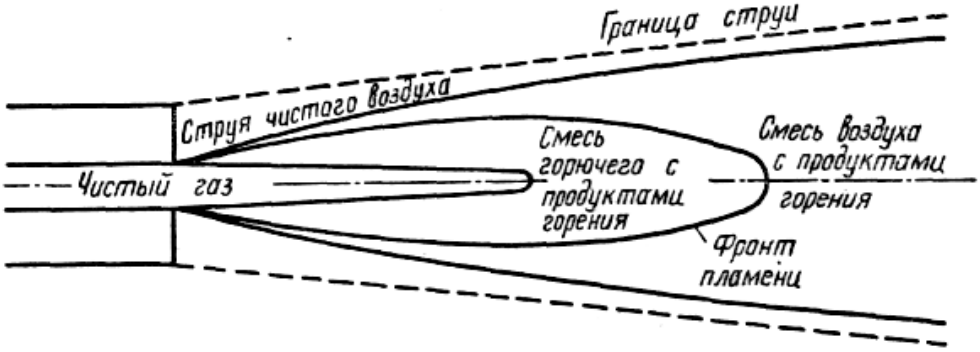


Рисунок 33. Структура ламинарного диффузионного факела

При горении жидкого топлива физическими стадиями процесса являются распыление топлива, его прогрев, испарение и образование горючей смеси. Горение жидкого топлива возможно только в паровой фазе, так как температура кипения жидких топлив всегда ниже температуры самовоспламенения. Топливо заранее испаряется, смешивается с воздухом и горючая гомогенная смесь подается в камеру сгорания. Существуют нижний и верхний пределы вспышки жидкого топлива. Нижний предел соответствует низшей температуре жидкого топлива, при которой пары над ним в смеси с воздухом способны загораться от внешнего источника зажигания. Верхнему пределу соответствует температура жидкого топлива, при которой оно воспламеняется и горит вслед за вспышкой паров. Интенсификация сжигания жидкого топлива связана главным образом с интенсификацией распыливания и испарения. Назначение процесса распыления (пульверизации) состоит в увеличении поверхности контакта жидкости с воздухом. Для тонкого однородного распыления и смесеобразования применяют форсунки различного типа (механические, паровые, воздушные и др.). Воспламенение топлива происходит не сразу на выходе из форсунки, а на

некотором расстоянии, там, где создаются благоприятный состав смеси и высокая температура (рис. 34).

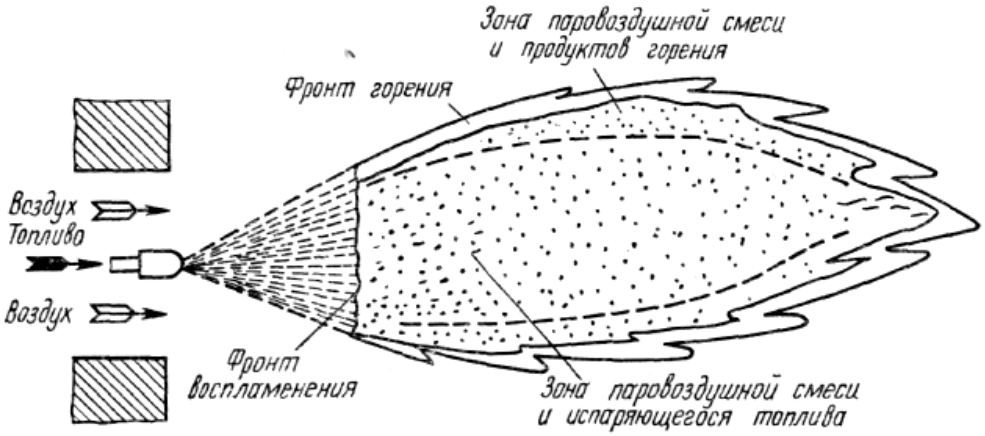


Рисунок 34. Структура факела жидкого топлива

Горение твердого топлива представляет собой сложный физико-химический процесс, состоящий из ряда стадий: тепловая подготовка, включающая подсушку, выделение летучих и образование кокса; горение летучих и кокса с образованием дымовых газов и негорючей золы (рис. 35). Если твердое топливо нагреть без доступа воздуха, то оно делится на две части: кокс и летучие вещества. Летучие вещества оказывают влияние на горение кокса, так как воспламеняются раньше и способствуют прогреву частиц кокса. Горение кокса начинается обычно после выгорания летучих. Наибольший объем летучих содержится в дровах и других «молодых» топливах. По мере увеличения геологического возраста топлива содержание летучих веществ в нем уменьшается. Для антрацитов выход летучих составляет 4%. Зола топлива снижает теплоту сгорания топлива, уменьшает горючую часть и при значительных количествах ее в топливе затрудняет доступ окислителя к коксу. Структура горения топлива при слоевом горении показана на рисунке 35.

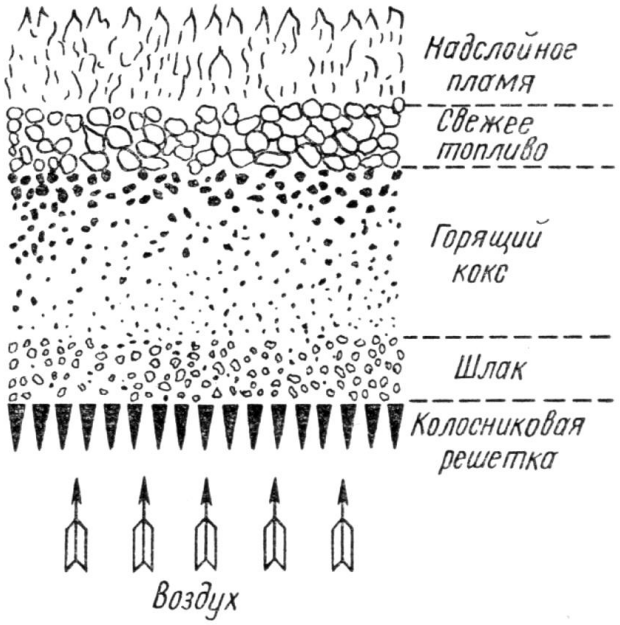


Рисунок 35. Структура горящего твердого топлива при слоевой загрузке

Горение твердых топлив может протекать как в диффузионной, так и в кинетической областях, причем результирующая скорость горения определяется более медленным процессом. Для интенсификации горения твердого топлива его измельчают, смешивают воздухом и во взвешенном состоянии подают в топочную камеру. В этом случае скорость горения определяется кинетикой химической реакции на поверхности частиц и протекает с высокой скоростью. Для сравнения различных сортов и видов топлива по энергетической ценности применяют показатель условного топлива, которое имеет теплоту сгорания равную $Q_{усл}$ = 7000 ккал/кг или 29308 кДж/кг, что близко к теплоте сгорания кокса. Для пересчета расхода какого-либо вида натурального топлива в условное и обратно пользуются тепловым эквивалентом, представляющим собой отношение теплоты сгорания рабочей массы натурального топлива к теплоте сгорания условного топлива. Расчеты процессов горения топлив ведутся на основе стехиометрических уравнений реакции полного горения топлива или при помощи номограмм.

8.2.Устройства для сжигания топлива

В печах на жидком топливе для сжигания обычно используют мазут, который подают через форсунки различного типа. В механических форсунках распыление струи происходит под действием кинетической энергии струи самого мазута, поступающие в сопловые отверстия в головке форсунки (рис 36 а-в). Основное достоинство механических форсунок - их простота. Обычно для уменьшения вязкости мазут подается подогретым до 100 - 120 ^{o}C под давлением 2,5 - 3 атм [19,20]. В паровоздушных форсунках распыление струи осуществляется струей пара (воздуха). Паровоздушные форсунки также просты по конструкции, обладают более высоким тепловым напряжением, (произведением расхода топлива на низшую теплоту сгорания одной единицы топлива и деленным на объем топочного пространства), однако они расходуют много воздуха и затраты на сжигание 1 кг топлива в них выше, чем в механических форсунках (рис. 36 г, д). В комбинированных форсунках и пар и топливо подаются под высоким давлением, а для разбрызгивания топлива применяют механические устройства (рис. 36е).

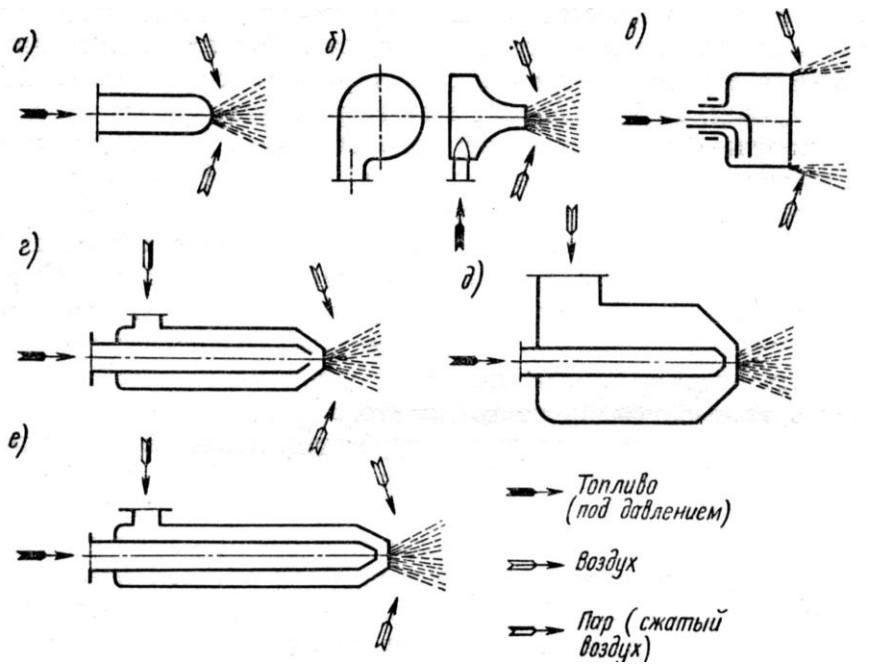


Рисунок 36. Форсунки для сжигания топлива а - прямоструйная, б - центробежная, в - вращающаяся, г- высокого давления, д - низкого давления, е – комбинированная.

В печах на газообразном топливе для сжигания газа используют горелки. Горелки бывают со внешним смешением (диффузионные) и инжекционные (беспламенные). В диффузионных горелках смешение газа и воздуха происходит в рабочей камере печи, при этом воздух подается обычно к устью горелки. Для горелок такого типа характерен длинный видимый светящийся факел (рис. 37). Инжекционные горелки с полным внутренним смешением (рис. 38) дают короткий несветящийся факел. Сжигание газа в таких горелках идет по кинетическому механизму. В зависимости от давления подразделяются на горелки низкого (до 2000 Па) среднего (2000-70000 Па) и высокого, (свыше 70000) давления. Выбор типа горелок определяется количеством сжигаемого газа и соотношением газ-воздух.

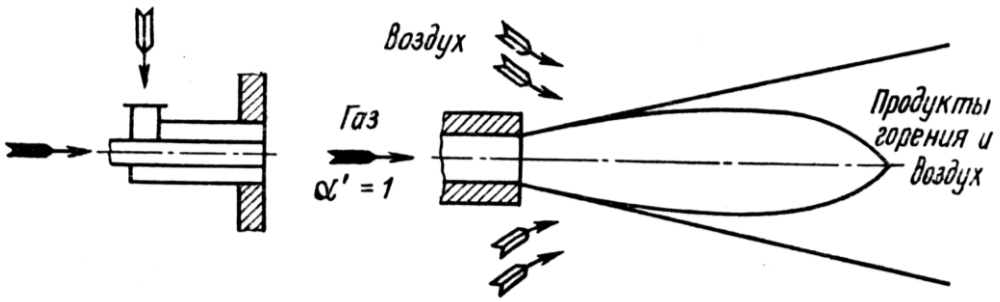


Рисунок 37. Схема диффузионной горелки типа «труба в трубе».

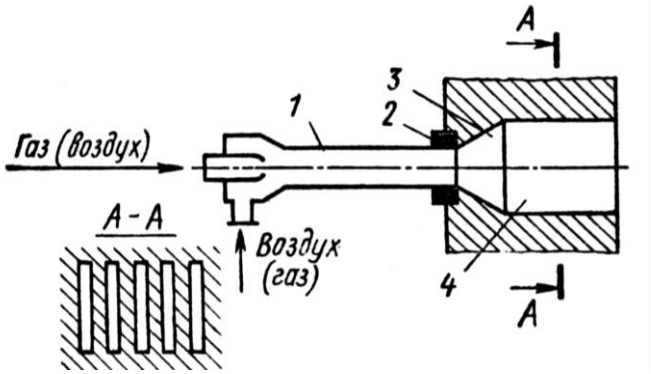


Рисунок 38. Схема беспламенной горелки. 1- смесительное устройство, 2- водоохлаждаемая форма, 3- форкамера, 4- щелевое сопло.

Горелки и форсунки в рабочем пространстве обычно располагают под подом печи. Если рабочее пространство имеет цилиндрическую форму, то горелки

располагают по касательной к стенкам печи для обеспечения циркуляции атмосферы (рис. 39).

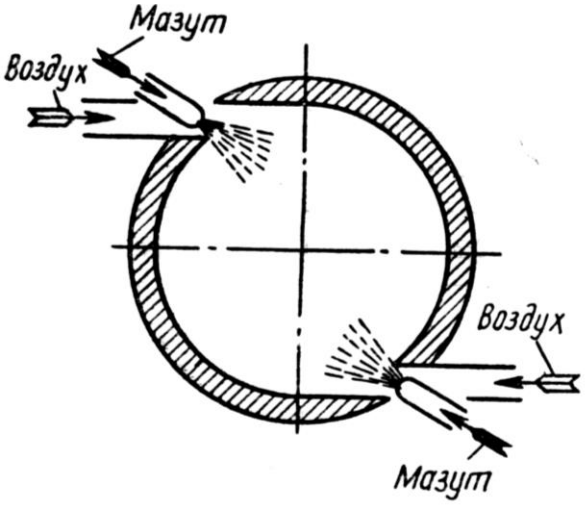


Рисунок 39. Схема расположения форсунок в шахтной печи.

Топки для сжигания твердых топлив находят широкое применение в отопительных системах, при этом в термических печах используются редко. В основном твердое топливо применяют в термических устройствах, не требующих точного поддержания температурного режима, например в печах для нагрева изделии при ручной ковке. В зависимости от вида и свойств сжигаемого топлива топочные устройства делятся на слоевые и камерные. В слоевых топках топливо сжигается в слое, а в камерных топках топливо предварительно измельчается и сжигается во взвешенном состоянии. К промежуточному типу относят топки с кипящим слоем, разрыхляемым потоком воздуха. В топках со слоевым сжиганием новое топливо подается на слой горящего топлива, а воздух поступает снизу. Верхний слой топлива прогревается, подсушивается, из него выделяются летучие вещества, сгорающие в камере. Образующийся после выделения летучих кокс постепенно опускается и сгорает, превращаясь в шлак по реакции $CO_2+C=2CO$. Реакция идет с поглощением тепла, выделяемого при сгорании летучих, поэтому в слоевых топках существует понятие максимальной толщины сжигаемого слоя. Так бурые угли сжигаются в слое, толщина которого не превышает 70 мм, процесс горения дров происходит в слое глубиной до 700 мм. Камерные топки (в них топливо сжигается в пылевидном состоянии) более

сложны в конструкции, однако обладают более высоким КПД, так как топливо в них сгорает практически полностью. В топках с камерным горением проще регулировать температуру и автоматизировать процессы подачи топлива. Топливовоздушная смесь приготавливается в системе, состоящей из мельницы, сепаратора и бункера. Процесс смешивания топливовоздушной смеси происходит в горелках, в которые воздух подается подогретым до температуры 100 - 400 ^{o}C.

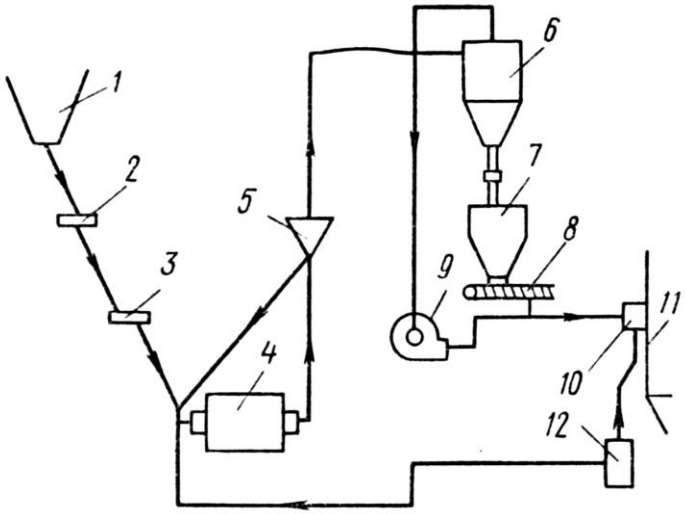


Рисунок 40. Схема подготовки твердого топлива для топки с камерным горением. 1- бункер с углем, 2- весы, 3- питатель, 4- мельница, 5 – сепаратор, 6- циклон, 7 - промежуточный бункер, 8 - питатели, 9 - центробежный вентилятор, 10 - горелки, 11 - топка, 12- коллектор горячего воздуха.

9. Материалы, используемые для изготовления термических устройств

9.1.Огнеупорные материалы

Огнеупорными называют материалы, изготавливаемые на основе минерального сырья и отличающиеся способностью сохранять свои функциональные свойства при высоких температурах. Огнеупорные материалы применяют для кладки рабочего пространства, стенок печи, дверец, топочных камер, дымовых каналов и других частей термического оборудования, подверженного воздействию высоких температур, печных атмосфер и

механических нагрузок. Огнеупорный материал должен обладать следующими свойствами [21,22,23] :

- высокой механической прочностью при больших давлениях и высоких температурах;
- быть термически стойким, т. е. выдерживать резкие изменения температур без образования трещин;
- сопротивляться химическому воздействию печных газов и шлака;
- обладать малым температурным коэффициентом линейного расширения и сохранять постоянство объема при различных температурах;
- быть малопористым, так как пористость облегчает его разрушение печными газами и шлаками;
- иметь невысокую теплопроводность;
- обладать минимальной электропроводностью.

В зависимости от химических свойств огнеупорные материалы подразделяют на кислые, нейтральные и основные. Критерием такого разделения служит способность при высоких температурах кислых и основных огнеупоров взаимодействовать между собой. Определяющим компонентом кислых огнеупоров является SiO_2, основных – CaO и MgO. Нейтральными являются углеродистые огнеупоры, а так же алюмосиликатные огнеупоры с высоким содержанием Al_2O_3.

Классификация огнеупорных материалов

В зависимости от степени огнеупорности материалы общего назначения подразделяют на следующие классы:

а) огнеупорные …….1580 - 1770 °С ;

б) высокоогнеупорные ……..…1770- 2000 °С;

в) высшей огнеупорности ……более 2000 °С

По способу изготовления огнеупорные материалы подразделяют на:

а) пиленые из естественной горной породы;

б) пластичного формования ручной и машинной формовкой;

в) сухого прессования из порошкообразных масс, содержащих связующие и материал (глину, каолин и т. д.);

г) пневматического или электромеханического трамбования;

д) горячепрессованные;

д) литые плавленые;

По использованию термической обработки в технологическом процессе производства огнеупорные материалы подразделяют на:

а) обжиговые;

б) безобжиговые;

в) плавленые, подвергнутые последующему обжигу.

Классификация огнеупорных материалов по химико-минералогическому составу представлена в табл. 11. [21]

Таблица 11. Классификация огнеупорных материалов по химико-минералогическому составу

Тип огнеупоров	Группа	Доля определяющих химических компонентов на прокаленное вещество, %
Кремнеземистые	Из кварцевого стекла	$SiO_2 \geq 97$
	Динасовые	$SiO_2 \geq 93$
	Динасовые с добавками	$80 \leq SiO_2 < 93$
	Кварцевые	$SiO_2 \geq 85$
Алюмосиликатные	Полукислые	$SiO_2 < 95$, $Al_2O_3 < 28$
	Шамотные	$28 \leq Al_2O_3 \leq 45$
	Муллитокремнеземистые	$45 < Al_2O_3 \leq 62$
	Муллитовые	$62 < Al_2O_3 \leq 72$
	Муллитокорундовые	$72 < Al_2O_3 \leq 90$
	Из глинокремнеземистого стекла	$40 \leq Al_2O_3 \leq 90$
Глиноземистые	Корундовые	$Al_2O_3 > 90$
Глиноземизвестковые	Алюминаткальциевые	$Al_2O_3 > 65$, $10 < CaO < 35$
Магнезиальные	Периклазовые	$MgO \geq 85$
Магнезиально-известковые	Периклазоизвестковые	$50 < MgO < 85$, $10 \leq CaO < 45$
	Периклазоизвестковые стабилизированные	$35 < MgO < 75$, $15 < CaO \leq 40$, $CaO : SiO_2 > 2$
	Известковопериклазовые	$50 < MgO \leq 50$, $45 \leq CaO \leq 85$
Известковые	Известковые	$CaO \geq 85$
Магнезиально-шпинелидные	Периклазохромитовые	$MgO \geq 60$, $5 \leq Cr_2O_3 \leq 20$
	Хромитопериклазовые	$40 \leq MgO < 60$, $15 \leq Cr_2O_3 \leq 35$
	Хромитовые	$MgO < 40$, $Cr_2O_3 > 30$
	Периклазошпинелидные	$50 \leq MgO < 85$, $5 \leq Cr_2O_3 \leq 20$, $Al_2O_3 \leq 25$
	Периклазошпинельные	$MgO > 40$, $5 \leq Al_2O_3 \leq 55$
	Шпинельные	$25 \leq MgO \leq 40$, $55 < Al_2O_3 \leq 70$

По форме и размерам огнеупорных изделий делятся на следующие виды:

а) кирпич разного размера и формы (рисунок 41);

б) фасонные изделия (простые, сложные, особо сложные);

в) крупноблочные фасонные изделия;

г) специальные изделия лабораторного и промышленного применения (тигли, трубки и др.).

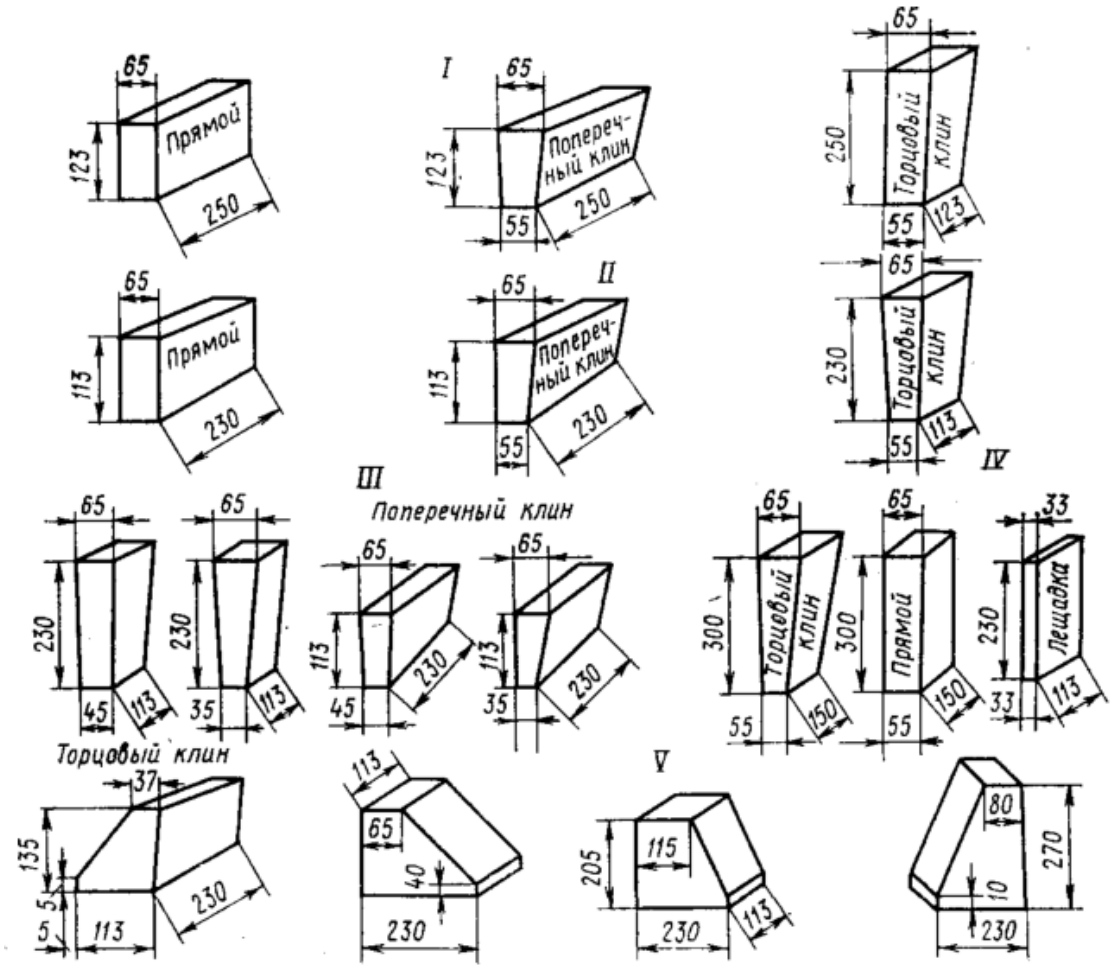


Рисунок 41. Форма и размеры огнеупорных кирпичей I - ,большой формат нормального кирпича, II - обыкновенный формат нормального кирпича; III и IV – арочный и сводовый кирпич; V – пятовый кирпич

Свойства огнеупоров

Огнеупорность- это свойство огнеупорных материалов противостоять действию высоких температур. Ее обычно определяют экспериментальным путем с помощью пирометрических конусов в виде трехгранной пирамиды высотой 30 мм, с нижним основанием 8 мм и верхним 2 мм. Огнеупорность испытуемого

материала оценивают температурой, при которой пирометрические конуса касаются вершиной поверхности подставки (рис.42).

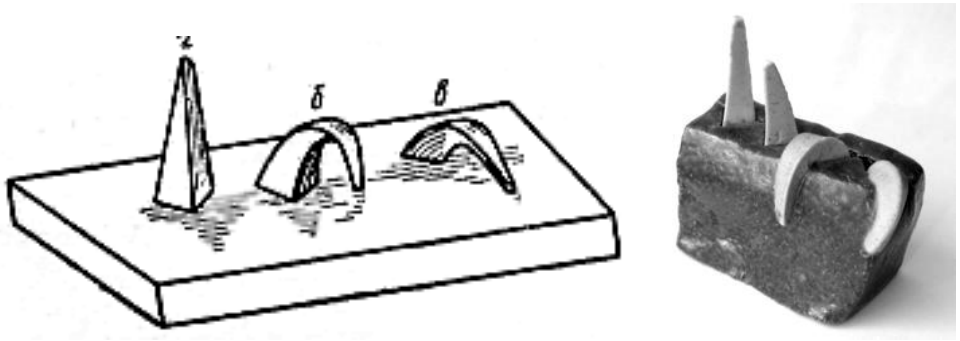


Рисунок 42. Положение керамического пироскопа в разные моменты испытаний а – до начала испытаний, б- при температуре, соответствующей его огнеупорности, в- при температуре, превышающей его огнеупорность

Термостойкость - это свойство огнеупорных изделий противостоять резким колебаниям температуры (теплосменам), которые может выдержать изделие до определенной степени его разрушения.

Пористость - характерна для всех огнеупоров и в отдельных изделиях доходит до 80 % .Различают общую пористость изделий, которую составляю закрытые и открытые поры, и кажущуюся пористость, которую составляют открытые поры. Открытая пористость определяют измерением объема жидкости, поглощенной порами при кипячении в жидкости и последующем вакуумировании. Для получения легковесных огнеупоров используют три основных способа регулирования пористости: введение в состав огнеупора выгорающих добавок, применение пенообразующих веществ и химическое введение в массу огнеупора добавок, взаимодействующих между собой с выделением газообразных продуктов. Производство легковесных огнеупоров способом выгорающих добавок является наиболее простым и распространенным. В качестве выгорающих добавок в шихту вводят древесные опилки, лигнин, антрацит или другие малозольные горячие вещества. Пористость изделий в

значительной мере определяет такие свойства огнеупоров, как теплопроводность, прочность и газопроницаемость.

Водопоглощение характеризуется отношением веса воды поглощенной порами образца, к весу образца о сухом состоянии.

Удельный вес огнеупорных материалов может изменяться в широких пределах в зависимости от показателей пористости.

Таблица 12 Удельный вес, объемный вес и пористость огнеупорных изделий [22]

Вид огнеупорных изделий	**Удельный вес, г/см^3**	**Объемный вес, г/см^3**	**Кажущаяся пористость, %**
Динасовые полукислые	2,34-2,44	1,6-1,9	14-25
Шамотные	2,5-2,6	1,8	20-30
Корундовые	3,8-4,0	2,3-2,6	23-26
Магнезитовые	3,54-3,65	2,5-2,9	14-27
Форстеритовые	3,35-3,41	2,3-2,5	25-30
Графитовые	2,0-2,4	1,8-2,0	17-24
Карборундовые	3,1-3,7	2,3-2,5	15-30

Газопроницаемость – это способность огнеупорных изделий пропускать воздух или газ в тех или иных условиях. Коэффициент газопроницаемости огнеупорных изделии выражается количеством воздуха (в литрах), прошедшего через огнеупорный материал площадью 1 м ^{2} при толщине стенки 1м в течение 1 часа и при разности давлений 1 мм вод. ст. Газопроницаемость может влиять на стойкость печной кладки и теплопроводность огнеупорного материала.

Теплопроводность имеет большое влияние на потери тепла через стены под и свод печи и влияет на термическую стойкость огнеупорных изделий.

Электропроводность. При обычных температурах огнеупорные изделия являются электроизоляторами, что облегчает крепление и эксплуатацию открытых электрических нагревательных элементов.

Таблица 13. Теплопроводность огнеупорных материалов ккал/м**час*град [22]

Вид огнеупорных изделий	**200 °С**	**800 °С**	**1000 °С**
Динасовые полукислые	1,06	1,54	1,7
Шамотные	0,71	1,54	1,15
Корундовые	2,12	3,08	3,4
Магнезитовые	4,84	3,46	3,0
Графитовые	136,5	126,0	-
Карборундовые	23,8	17,7	-

Теплоемкость - это свойство огнеупорных материалов аккумулировать тепло. У огнеупорных материалов с повышением температуры теплоемкость увеличивается. Средняя теплоемкость огнеупорных материалов выражается через коэффициент теплоемкости (таблица 14).

Таблица.14. Средняя теплоемкость огнеупорных материалов ккал/кг*град [22]

Вид огнеупорных изделий	**200 °С**	**800 °С**	**1200 °С**
Динасовые полукислые	0,203	0,262	0,282
Шамотные	0,223	0,291	0,293
Корундовые	0,211	0,272	-
Магнезитовые	0,229	0,269	0,287
Форстеритовые	0,229	0,281	0,294
Графитовые	0,254	0,341	0,47
Карборундовые	-	0,255	0,266

Шлакоустойчивость - это способность огнеупорных изделий противостоять действию образующиеся в печи шлаков, окислов, паров и газов. По химическим свойствам огнеупорные материалы разделяют на три основные группы: кислые, основные и нейтральные. Кислые огнеупорные материалы могут вступать в химическое взаимодействие с основными шлаками и не взаимодействуют с кислыми. Основные огнеупорные материалы взаимодействуют с кислыми

шлаками. Нейтральные огнеупорные материалы не взаимодействуют ни с кислыми, ни с основными материалами.

Постоянство объема и формы. Работа огнеупорных изделий при высоких температурах вызывает изменения объема вследствие температурного расширения, а так же изменения пористости. Небольшое расширение огнеупорных материалов не является вредным, так как уплотняет кладку, но чрезмерное расширение может вызвать вспучивание свода или стен печи и привести к выходу термического оборудования из строя.

Виды огнеупорных материалов

Динасовые огнеупоры это подвергнутые обжигу огнеупорные материалы, изготовленные из размолотых кварцитов, песчаников и других кварцевых пород с содержанием не менее 93 % SiO_2, имеющие в качестве связующего известь (2 - 2,5%). Сырую породу измельчают и смешивают с известковым молоком, изделия формуют на прессах, сушат и обжигают при температуре 1400 -.1460 °С. Динас относится к кислым огнеупорным материалам. Динасовые огнеупоры приминаются главным образом для футеровки металлургических печей с кислым подом. Для термических печей они почти не применяются, иногда используются для кладки высокотемпературных соляных ванн. Основные свойства динасовых огнеупоров приведены в таблице 15.

Шамотные огнеупоры. Шамот широко применяется в печестроении для строительства стен, сводов печей, работающих при температурах до 1350 С и не контактирующих с оксидами металлов. Он относится к алюмосиликатным огнеупорам, содержащим кроме SiO_2 до 45% Al_2O_3. Шамотные огнеупоры обладают более высокой термостойкостью (10-20 водяных теплосмен), но низкой шлакоустойчивостью. Так же они не выдерживают истирающего действия при высоких температурах. Исходное сырье для производства шамота - природные глины, на основе колинита (40% Al_2O_3,45% Si O_2, 15% H_2O). Шамотные огнеупорные изделия, формируются из глины или каолина с добавкой шамота представляющего собой ту же глину после измельчения и обжига. Добавка

шамота к глине предохраняет огнеупорную массу или шихту от трещинообразования и усадки. Производство шамотных огнеупоров разбивается на стадии изготовления:

- обжиг глины на шамот;
- размол шамота;
- подготовка глины и получение на смеси шамота и глины шамотных изделий формованием, прессованием или трамбованием (в зависимости от пропорции глины и шамота);
- сушка изделий;
- обжиг изделий.

По количеству шамота в массе изделия различают бесшамотные изделия, малошамотные изделия (масса шамота не превышает 30 %), шамотные (масса шамота составляет 40-65 %) и многошамотные (масса шамота превышает 80 %). Шамотные огнеупорные материалы являются наиболее распространенным универсальным материалом для выкладки футеровок термических печей. Объем их выпуска составляет около 75 % от всего производства огнеупорных материалов [23]. *Многошамотные огнеупоры* почти не дают усадки и имеют незначительное количество пор (пористость 9-13%). Обладают хорошей термостойкостью, и высокой механической прочностью предел прочности при сжатии 800 - 1000 кГ/см^2). *В бесшамотных огнеупорах* применяются камнеподобные породы, обладающие малой пластичностью и меньшей усадкой. Бесшамотные огнеупоры обладают более высокой механической прочностью, большей плотностью, повышенной теплостойкостью по сравнению с шамотными изделиями и применяются для кладки в металлургических печей. *Высокоглиноземистые огнеупоры* - это изделия, содержащие более 46% Al_2O_3. Они обладают высокой огнеупорностью 1850 - 2000 °С, хорошей шлакоустойчивостью и термостойкостью. При пористости 2- 3 % их предел прочности при сжатии достигает 1000 кг/см^2. Они обладают высокой стойкостью против деформации под нагрузкой при высоких температурах и постоянным коэффициентом местного расширения. Изделия получают литьем из расплава. Высокоглиноземистые

огнеупоры применяются для футеровки нагревательных печей, высокотемпературных печей соляных печей-ванн.

Полукислые огнеупорные изделия. К полукислым огнеупорам относят изделия содержащие менее 30% Al_2O_3.+TiO_2 , и не менее 65% SiO_2. Полукислые огнеупоры применяются для кладки нагревательных печей.

Магнезитовые огнеупоры изготовляются из обожженного и измельченного магнезита и (не менее 65% MgO, обычно 90 - 95%). Основные свойства магнезитовых изделий; огнеупорность 2200— 2400°С; предел прочности при сжатии 300—600 кГ/см^2 , пористость 15—36%; начало размягчения под нагрузкой 1550—1600°С. термостойкость низкая. Применяются в металлургических печах, редко для термических печей.

Доломитовые огнеупоры. Сырье для производства огнеупоров этого типа является доломит (55 % CaO + 45 % MgO). Огнеупоры являются заменителем магнезитовых огнеупоров и для термических печей не применяются.

Форстеритовые огнеупоры изготавливаются из форстерита (MgO + SiO_2). Огнеупорность этих материалов около 1850°С, начало размягчения при 1550-1570°С, объемный вес 2,5 г/см3,пористость кажущаяся 24 - 28%, термическая стойкость низкая. Они используются для кладки высокотемпературных печей.

Таблица 15 Свойства огнеупоров, наиболее широко используемых в печах **[23]**

	Группа огнеупоров	Основные компоненты, % вес	Огнеупорность, °С	Максимальная температура , °С	Плотность , т/м^3	Коэффициент теплопроводности при 100 °С, Вт/(м×К)	Уд. теплоемкость при 100 °С, кДж/(кг×К)
1	Динасовые	SiO_2>93	1690-1720	1650-1700	1,84-1,97	1,3	0,86
2	Шамотные	30<Al_2O_3<45	1580-	1200-	1,83-	0,9	0,9

	Группа огнеупоров	Основные компоненты, % вес	Огнеупорность, °С	Максимальная температура , °С	Плотность , т/м^3	Коэффициент теплопроводности при 100 °С, Вт/(м×К)	Уд. теплоемкость при 100 °С, кДж/(кг×К)
			1750	1400	1,95		
3	Муллитовые	62<Al_2O_3<72	1600-1800	1600-1650	2,34-2,52	1,2	0,86
4	Корундовые	Al_2O_3>90	1950-2000	1650-1800	2,89-3,12	2,1	0,83
5	Смолодоломитовые	50<MgO<85 10<CaO<45	1800-1900	1300-1400	2,7-2,8	3,4	0,96 при 1000°С
6	Периклазовые (магнезитовые)	MgO>85	2200-2400	1650-1700	2,6-2,8	4,5	1,08
7	Периклазохромитовые	MgO>60 5<Cr_2O_3<20	2000	1650-1700	2,95-3,04	2,5	1,0
8	Хромитопериклазовые	40<MgO<60 15<Cr_2O_3<35	1920-2000	1700	2,9-3,15	2,0	1,8 , 1,15 (20-1000°С)
9	Цирконовые	ZrO_2>50, SiO_2>25	2000-2300	1900-2000	3,48-3,83	1,4	0,64
10	Карбидкремниевые	SiC>70	2000	1800-2000	2,35-2,54	9,3 при 1000°С	0,97

Кроме термических, механических, химических и электрических свойств, при выборе огнеупорных материалов учитывают их стоимость,

распространенность и легкость применения. Из термических свойств важнейшее значение имеют:

- температура плавления или разложения, определяющая пределы применимости материала;
- коэффициент температурного расширения, от которого зависит стойкость к резким изменениям температуры;
- теплоемкость, влияющая на эксплуатационные показатели при пуске и прекращении работы;
- теплопроводность, влияющая на тепловые потери оборудования.

Из механических свойств оценивают жаропрочность, модуль упругости, сопротивление ползучести, ударную вязкость, стойкость к абразивному износу, газопроницаемость и плотность. Химические свойства огнеупора должны обеспечивать его стойкость при условиях эксплуатации в агрессивной среде. Электрические свойства огнеупоров важны для устройств, использующих электрические нагревательные элементы. Наконец, выбранный огнеупорный или жароупорный материал должен присутствовать на рынке в достаточных количествах, требуемых профилей и формы, по доступной цене.

9.2. Теплоизоляционные материалы.

Теплоизоляционные материалы применяют в качестве промежуточного слоя в футеровках печей различного назначения. Теплоизоляционные материалы, как правило, не являются огнеупорными (их огнеупорность в большинстве случаев ниже 1580 °С). Теплоизоляционные материалы должны обладать:

- малой теплопроводностью;
- достаточной огнеупорностью;
- достаточной механической прочностью;
- недефицитностью;
- малой стоимостью

Эти материалы не должны подвергаться абразивному и механическому

воздействию, значительной строительной нагрузке и резким перепадам температур. Теплоизолирующие свойства материалов обычно определяются их химико-минеральной природой, плотностью и структурой. Как и огнеупорные теплоизоляционные материалы можно классифицировать по ряду признаков.

По виду подразделяются теплоизоляционные материалы подразделяются на:

- жесткие (кирпичи, плиты, блоков, фасонные изделия);
- волокнистые (рулоны, маты, ткани, шнуры);
- засыпки;
- мастики.

По способу изготовления они подразделяются на изготавливаемые

- из природного сырья (например асбест),
- из природного сырья с последующей обработкой (вспучивание, изготовление волокон),
- синтетические.

По виду исходного сырья теплоизоляционные материалы можно подразделить:

- неорганические;
- органические;
- композиционные.

По показателям теплопроводности:

• класс А - материалы низкой теплопроводности (теплопроводность при средней температуре 298 К до 0,06 Вт/(м • К);

• класс Б – материалы средней теплопроводности (теплопроводность при средней температуре 298 К от 0,06 до 0,115 Вт/(м • К));

• класс В – материалы повышенной теплопроводности (теплопроводность от О,115 до О,175Вт/(м*К));

По горючести (СНиП 21-01-97):

- • негорючие (НГ);
- • слабогорючие (П);
- • умеренногорючие (Г2);

- •нормальногорючие (Г3);
- • сильногорючие (Г4).

По жесткости

- мягкие (М) - сжимаемостью свыше 30 % при удельной нагрузке 0,002 МПа (минеральная и стеклянная вата, вата из каолинового и базальтового волокна, вата из супертонкого стекловолокна, маты и плиты из штапельного стекловолокна);
- полужесткие (П) - сжимаемостью от 6 до 30 % при удельной нагрузке 0,002 МПа (плиты минераловатные и из штапельного стекловолокна на синтетическом связующем);
- жесткие (Ж) - сжимаемостью до 6 % при удельной нагрузке 0,002 МПа (плиты из минеральной ваты на синтетическом или битумном связующем);
- повышенной жесткости (ПЖ) - сжимаемостью до 10 % при удельной нагрузке 0,04 МПа (плиты минераловатные повышенной жесткости на синтетическом связующем);
- твердые (Т) - сжимаемостью до 10 % при удельной нагрузке 0,1 МПа.

Теплоизоляционные свойства материала в значительной степени зависят от его пористости. Чем выше пористость, тем ниже теплопроводность, однако одновременно снижаются прочностные характеристики. Для печей с малой температурой теплоизоляция обычно делается однослойной, для высокотемпературных печей - многослойной. Внутри располагают слой огнеупорного материала, затем один или два слоя теплоизоляции. Общие рекомендации по выбору толщины огнеупорных и теплоизоляционных материалов представлены в таблице 16.

Таблица 16. Рекомендации по выбору материалов для футеровки печей [15]

Температура в рабочей камере ^{0}C	Толщина слоев в мм	
	Огнеупорного	Теплоизоляционного
100 - 200	Нет	100— 150

200 - 300	Нет	160—200
300 - 600	65	160—200
600 - 800	112	200—250
800 - 1000	112	260—300
1000 - 1200	112	300—360

Волокнистые теплоизоляционные материалы изготавливаются из волокон, полученных из расплавов природных материалов (горных пород) и (или) доменных шлаков (минеральные волокна), а так же из стекол (стекловолокна). Их получают вытягиванием нитей, воздушным или паровым распыливанием или комбинированными способами. Все волокнистые материалы обладают эластичностью, малой кажущейся плотностью, низкой теплопроводностью и значительной прочностью на разрыв. Температура применения изделий зависит в основном от состава и вида сырья (таблица 17). Часто для изготовления теплоизоляции термического оборудования используют распушенный природный асбест.

Таблица 17. Свойства основных типов волокон [22]

Вид волокна	**Начало потери эластичности, °С**	**Начало размягчения, °С**
Шлаковое	470	710
Минеральное	440	700
Базальтовое	420	600
Стеклянное	380	580

Формованные теплоизоляционные материалы изготавливают из природного минерального сырья - перлита, диатомита, вермикулита и т.д) прошедшего специальную обработку. Различную структуру пористых формованных материалов получают с использованием специальных методов пенообразования: введением специальных выгорающих добавок, использованием пористых

заполнителей, введением пены, вспучиванием при термообработке, введением газообразователей.

Наиболее дешевыми теплоизоляционными материалами являются насыпные материалы, которые засыпают между рабочей футеровкой и кожухом печи (засыпки). В качестве засыпок применяют асбестовые волокна, а так же песок или крошку из природных минералов диатомита, совелита, вермикулита, перлита и т. д., помолотых и рассеянных до заданного гранулометрического состава (обычно находящегося в диапазоне от 0,14 до 5 мм). К неформованным теплоизоляционным материалам можно так же отнести растворы и обмазки, которые изготавливаются в виде паст и применяются в качестве связки для крепления отдельных элементов в кладке. Основные виды и характеристики теплоизоляционных материалов приведены в таблице 18.

Таблица 18. Основные характеристики теплоизоляционных материалов [22]

Материал	Температура применения максимальная, К	Плотность,кг/м³	Удельная теплоёмкость (средняя),Дж/(кг•К	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м•К)
Диатомит и трепел (для засыпки)	1173	300…500	900	0,1+0,00028 T
Диатомитовый кирпич:				
500	1273	500	920	0,12+0,00015 T
600	1273	600	920	0,15+0,0003 T
700	1273	700	920	0,17+0,0003 T
Плиты вермикулитовые	873	250	1000	0,08+0,00023 T
Зонолит для засыпок	1373	До 150	950	0,07+0,00025 T
Асбестовая крошка	723	450…500	835	0,12+0,00019 T
Асбестовые картон, ткань, шнур	723	1000…1400	835	0,16+0,00014 T
Плиты асбоцементные	723	400	835	0,06+0,00019 T
Шамот-ультралегковес ШЛБ-0,4	1373	400	960	0,11+0,00016 T
Шамот-легковес ШЛБ-0,8	1473	800	960	0,22+0,00022 T
ШЛБ-1,0	1573	1000	960	0,31+0,00035 T
ШЛА-1,3, ШЛБ-1,3	1573	1300	960	0,46+0,00038 T
Динас-легковес ДинЛ-1,0	1703	1000	1100	0,29+0,00037 T
Высокоглинозёмистый легковес	1673	1300…1350	960	≈0,7
Корборундовый легковес	1873	1400	950	0,69…1,62
Ткань из алюмосиликатного волокна	1523	50	900	0,02+0,00012 T
То же	1523	100	900	0,018+0,000072 T
То же	1523	130	900	0,015+0,0006 T

9.3. Металлические материалы нагревательных элементов

В электротермических установках для изготовления нагревательных элементов применяют сплавы с высоким удельным электрическим сопротивлением, которые должны обладать рядом свойств:

- высокой жаростойкостью;
- достаточной жаропрочностью, обеспечивающая отсутствие деформации нагревателей в процессе эксплуатации;
- высоким удельным электрическим сопротивлением;
- технологичностью при изготовлении нагревателей;
- низким температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления;
- стабильностью свойств в процессе эксплуатации;
- невысокой стоимостью.

По химическому составу металлические сплавы, работающие в воздушной атмосфере, классифицируются на следующие группы:

- никельхромовые (нихромы);
- никельхромовые, легированные алюминием;
- железохромоникелевые;
- железохромоалюминиевые (фехрали).

Наиболее высокими эксплуатационными свойствами обладают сплавы на основе никеля (нихромы). Их высокое качество обеспечивается прецизионной технологией изготовления, дополнительным легированием редкоземельными и некоторыми другими элементами, оказывающими существенное влияние на их эксплуатационные качества. Железохомоалюмниевые сплавы более дешевы (их цена приблизительно в 6 раз ниже чем у никелевых сплавов), могут эксплуатироваться при температурах до 1400 °С, но имеют ряд существенных недостатков:

- становятся хрупкими при работе интервале 450 - 500°С, а после нагрева выше 1000 °С обладают большой необратимой хрупкостью в холодном состоянии;
- имеют низкую жаропрочность, при температурах выше 1000 °С могут деформироваться под собственным весом;
- недостаточно пластичны при комнатной температуре, поэтому изготавливаются с подогревом до 200 - 350 или 600 - 750°С;
- склонны к химическому взаимодействию с шамотной футеровкой с образованием легкоплавких эвтектик, что приводит к быстрому перегоранию нагревательных элементов;
- на нагреватели из этих сплавов недопустимо воздействие паров и брызг меди, цинка, свинца, поваренной соли, шлаков, эмалей и железной окалины.

Нагреватели из железохромоалюминиевых сплавов имеют длительный срок службы только при условии высокой культуры их эксплуатации. Следует отметить, что в настоящее время зарубежными компаниями разрабатываются и выпускаются многокомпонентные сплавы, имеющие химический состав близкий к "фехралям" (Fe-Cr-Al), но легированные различными элементами (например, Si, Mn, Zr, Y и другими), имеющие повышенные характеристики прочности и пластичности, а так же высокие эксплуатационные свойства за счет сдерживания роста зерна и межкристаллитного разрушения сплавов при повышенных температурах.

Таблица 19. Химический состав и физические свойства наиболее распространенных сплавов для нагрева [22]

Марка	Химический состав, %					Удельное сопротивление, Ом*мм2*м-1
	Ni	Al	Cr	Fe	Прочие	
Сплавы системы Ni-Cr и Ni-Cr-Fe						

Х20Н80	основа	<0,2	20-23	<1	Si<1,5	1,08
ХН70Ю	68	2,8-3,5	26-29	<1	Si<1,5	1,18
Х15Н60	55-61	<0,2	15-18	<1	Si<1,75	1,12
Сплавы системы Fe- Cr -Al						
Х15Ю5	<0,6	4,5-5,5	13,5-15,5	основа		1,45
Х23Ю5	<0,6	4,5-5,5	21,5-23,5	основа		1,39
Х27Ю5Т	0,15-0,4	4,5-5,5	26-28	основа	0,2-0,6 Ti	1,35

Таблица 20. Максимальные температуры нагревательных элементов, работающие на воздухе (ГОСТ 12766) [22]

Марка сплава	**$T_{макс}$, °С, диаметром или толщиной, мм**				
	0,2	**0,4**	**1,0**	**3,0**	**6,0 и более**
Х15Ю5	750	850	900	950	1000
Х23Ю5	950	1025	1100	1150	1200
Х27Ю5Т	950	1075	1225	1350	1400
Х15Н60	900	950	1000	1075	1125
Х20Н80	950	1000	1100	1150	1200
ХН70Ю	950	1000	1100	1175	1200

Таблица 21. Рекомендуемые размеры нагревательных элементов [24]

Температура печи, °С	Размер нагревателя, мм		Материал нагревателя
	Лента (ширина и толщина)	Проволока (диаметр)	
До 300	8*1	1	Х13Ю5. Х17Ю5
300 - 600	10*1	2	Х13Ю5. Х17Ю5
600 - 300	15*1,5	3-4	Х13Ю5. Х17Ю5
800 - 1000	20*2	4-5	ХI5Н60

9.4. Карборундовые огнеупорные изделия

Карборундовые изделия на основе карбида кремния применяются в термических печах для изготовления огнеупорных плит и муфелей, подвижных элементов, а также для изготовления сопротивлений в электрических печах нагревательных элементов. Карборунд (SiC) получается путем нагрева кварцевого песка в углеродной атмосфере при 2000 °С. В техническом карборунде содержатся примеси окислов и карбида железа (содержание 95 - 99% SiC). Карбид кремния обладает высокой тепло (в 5 раз выше шамота) и электропроводностью, отличной термостойкостью, хорошей устойчивостью против истирания и высокой кислотоупорностью. Основные свойства карбида кремния приведены в таблице 22. Карборундовые (карбидокремниевые) нагреватели изготовляют диаметром 4 - 18 мм и длиной 200 - 1500 мм. Они выдерживают нагрев до 1500 °С в течение 2000 час, но при времени эксплуатации более 1000 часов увеличивают свое сопротивление (стареют). Для получения прежней степени нагрева необходимо увеличить напряжение трансформатора, поэтому при эксплуатации нагревателей такого типа предпочтительным является непрерывный способ регулирования температуры. Основными недостатками карборундовых изделий являются:

- малый срок службы при работе в вакууме и парах воды;
- высокая хрупкость;
- старение (окисление);
- сильная зависимость удельного электросопротивления от температуры;
- необходимость оборудования с возможностью регулирования напряжения

Таблица 22. Свойства карбида кремния[22]

Температура плавления, ^{o}C	2080
Плотность, кг/м^3	3200
ТКЛР при 24 - 2400 ^{o}C , 10^{-6} K^{-1}	5,88
Предел прочности на разрыв, МПа	40

Твердость по Моосу	9
Модуль упругости при 20 °С, 10^5 МПа	4,5
Теплопроводность при 20 - 500 °С, Вт/(м*К)	42
Удельное электросопротивление, Ом*м	1…2

Таблица 23.Химический состав и свойства карборундовых электронагревателей

Тип нагревателя	Химический состав, %							Макс. температура, °С	Удельное электро-сопротивление
	SiC	SiO_2	C	AI	Fe	S1	MgO		
Силит	94,4	3,6	0,3	0,2	0,6	0,3	0,6	1500	1,4-1,7
Глобар	96	I,5	0,6	0,3	07	0,3	0,6	1500	1,75-2,15

9.5 Силициды

По сравнению с карбидо-кремниевыми, нагреватели на основе дисилицида молибдена $MoSi_2$ обладают рядом преимуществ. Защитная оксидная пленка из стеклообразного SiO_2 и оксидов молибдена позволяет достичь на активной части нагревателей может высокой рабочей температуры (1650-1700 °С). За счет роста электрического сопротивления нагреватели из дисилицида молибдена быстро разогреваются с повышением температуры. Стабильность электрического сопротивления в течение всего срока службы нагревателей позволяет соединять их последовательно и заменять вышедшие из строя нагреватели без учета их начального электрического сопротивления. Отличительной особенностью нагревателей на основе дисилицида молибдена является способность выдерживать большую энергетическую нагрузку при высоких температурах, что позволяет концентрировать большое количество энергии в малом объеме печи. К недостаткам нагревателей из дисилицида молибдена можно отнести низкую механическую прочность; низкую термостойкость; малое начальное электрическое сопротивление, обусловливающее применение мощного силового

оборудования; высокую пластичность в интервале температур 1400-1650 °С. При комнатной температуре нагреватели из дисилицида молибдена тверды и хрупки, их деформация может производиться только при повышенных температурах. По сравнению с карборундовыми нагревателями они плохо переносят термические удары и более дороги. Нагреватели из дисилицида молибдена изготавливают методами порошковой металлургии различной формой и размеров (рис.43). Нагревательные элементы имеют больший ресурс работы в воздухе, окислительных и инертных газах - до 1700 °С, а также в восстановительных средах - до 1500 °С.

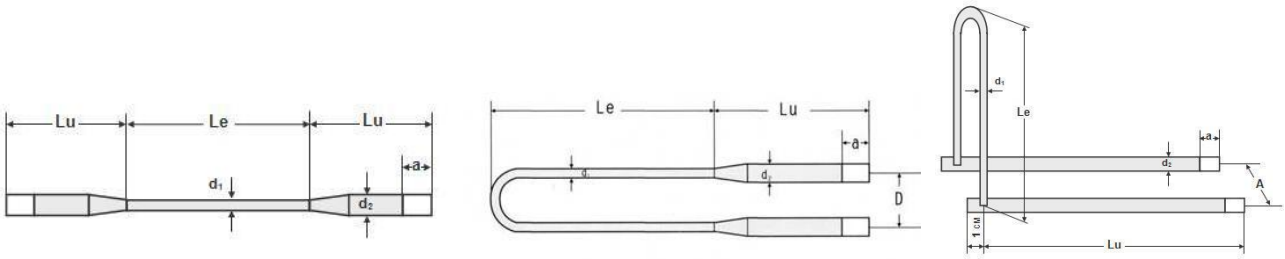


Рисунок 43. Нагревательные элементы из дисилицида молибдена: прямые, U-образные и сложной формы.

9.6. Тугоплавкие карбиды

Тугоплавкие карбиды имеют температуру плавления выше 3300 °С. Из них изготавливают элементы высокотемпературных вакуумных и газонаполненных электропечей: нагреватели, тепловую изоляцию, подставки и т.п. Применяют следующие виды карбидов тугоплавких металлов:

- циркония ZrC (плотность 6900 кг/м^3, $T_{пл}$ = 3530 °С),
- ниобия NbC (плотность 7500 кг/м^3, $T_{пл}$ = 3760 °С),
- тантала TaC (плотность 14300 кг/м^3, $T_{пл}$ = 3880 °С)
- гафния HfC (плотность 12600 кг/м^3, $T_{пл}$ = 3980 °С).

Методами порошковой металлургии изготавливаются трубчатые стержневые и U-образные нагреватели длиной до 600 мм, наружным диаметром до 18мм и

толщиной стенки 2- 3 мм. Карбиды стойки к кислотам и щелочам, но при этом обладают высокой хрупкостью. В окислительной атмосфере работают до 1000 °С.

9.7. Высокоогнеупорные оксиды

К высокоогнеупорным относятся оксиды, температура плавления которых превышает 1800 °С. Из них изготавливаются теплоизоляционные и электроизоляционные детали высокотемпературных печей. Применение в электротермическом оборудовании нашли окислы алюминия, бериллия, магния, циркония, тория. Наиболее распространены керамики на основе следующих оксидов.

Оксид алюминия $A1_2O_3$ (плотность 3900 кг/м^3,$T_{пл}$ = 2044 °С). Из керамики на основе $A1_2O_3$ изготавливают тигли для плавки металлов, стаканы, трубки, чехлы для термопар и другие фасонные изделия. Массы на основе $A1_2O_3$ применяют для набивки тиглей индукционных вакуумных печей.

Оксид циркония ZrO_2 (плотность 5000 кг/м^3, $T_{пл}$=2700 °С) стабилизируется окисью кальция (до 6 %) или окисью магния (до 10 %). Керамика из диоксида циркония обладает повышенной трещиностойкостью, поэтому из нее изготавливают ответственные изделия, работающие при динамических нагрузках.

Оксид магния MgO (периклаз) обладает высокой теплопроводностью и является электроизолятором. (плотность 3440 кг/м^3, $T_{пл}$=2800° С). Наиболее широко используется в качестве электроизоляционной набивки в ТЭНах.

Оксид бериллия BeO (плотность 3010 кг/м3, $T_{пл}$ = 2504-2550 ° С) используется в ядерной энергетике и электропечах в виде тиглей, подставок, чехлов термопар. Токсичен. При низких температурах обладает теплопроводностью, близкой к теплопроводности металлов. Очень термостоек.

Оксид тория ThO_2 (плотность 9570 кг/м3, $T_{пл}$ = 3050 °С). Обладает радиоактивностью. Она является самым тяжелым из окислов. Используется в виде тиглей, прокладок, подставок.

Все высокоогнеупорные окислы характеризуются значительной химической инертностью.

9.8 Тугоплавкие металлы

К тугоплавким относят металлы с температурой плавления выше 2200° С. Из них изготавливают нагреватели, экраны, контейнеры, подставки, подвески. В электропечах наибольшее распространение получили:

- вольфрам W ($T_{пл}$ = 3380 °С),
- молибден Mo ($T_{пл}$ = 2610 °С),
- тантал Ta ($T_{пл}$ = 2996 °С),
- ниобий Nb ($T_{пл}$ = 2468 °С).

Физические и механические свойства тугоплавких металлов в значительной степени зависят от чистоты, состава примесей и способа изготовления изделий. Наиболее вредны примеси, образующие с металлами твердые растворы внедрения – кислород, азот, углерод, а так же примеси железа, серы, никеля и т.д.

Таблица 24. Механические свойства тугоплавких металлов [22]

Металл	**Высокая чистота**		**Техническая чистота**	
	$\sigma_в$, МПа	**δ, %**	**$\sigma_в$, МПа**	**δ, %**
Nb	250	60	300-450	50-30
Ta	200	50	380-500	40-30
Mo	480	42	800-900	15-10
W	500	13	800-1100	0

Тантал и ниобий пластичны при 20°С, однако активно взаимодействуют с водородом, что приводит к их охрупчиванию. Пластичность молибдена при 20 °С так же зависит от его чистоты. Максимальное влияние на пластичность молибдена оказывает кислород, при содержании которого более 0,003%. молибден охрупчивается и поддается деформации только при нагреве до 500 - 600

°C. Деформация вольфрама производится только при нагреве, начиная с 700 °C для тонкостенных изделий и до 1300 °C для толстостенных. Прочность тугоплавких металлов зависит от способа производства (порошковый, плавленый в дуговых, электронно-лучевых или плазменных печах) и физического состояния (наклепанный, отожженный, рекристаллизованный). Ползучесть тугоплавких металлов резко увеличивается с повышением температуры. Вольфрам, молибден, тантал и ниобий характеризуются малой окалиностойкостью на воздухе и в парах воды.

Таблица 25. Температура начала взаимодействия тугоплавких металлов с газами и футеровкой [22]

Вещество	**W**	**Mo**	**Ta**	**Nb**
Воздух	300-400	250-300	250	200
Пары воды	500	400-500	260	-
Углекислый газ	1200	1000	1200	-
Водород	Не взаимодействуют		300	300
Al_2O_3 (корунд)	1900	1800	-	1650
шамот	1900	1800	-	1450

9.9. Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы

Для изготовления элементов конструкции термического оборудования, приспособлений и транспортирующих устройств применяют жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы, которые должны обладать:

- высокой жаропрочностью (пределом длительной прочности);
- достаточной жаростойкостью (низкой скоростью окисления при высокой температуре);
- высокой пластичностью и ударной вязкостью;
- высоко технологичностью.

Выбор материала определяется температурой эксплуатации (таблица 26) и экономической целесообразностью.

Таблица. 26. Температура применения различных материалов

Температура	Применяемый материал
До 300°С	Малоуглеродистые нелегированные стали (Ст3,Ст5)
До 450°С	Малоуглеродистые низколегированные стали (12ХНМФ, 15ХМ)
До 550°С	Сильхромы (Х6С, Х9С2,Х10С2М)
До 800°С	Высоколегированные хромом и никелем стали (12Х13, 12Х18Н9Т)
До 1000°С	Высоколегированные хромом и никелем стали (20Х20Н14С2, 20Х25Н20С2) -железоникелевые сплавы (ХН35ВТ,ХН35ВТЮ)
До 1100°С	Никелевые сплавы : гомогенные (нихромы Х20Н80); дисперсионностареющие (нимоники ХН77ТЮ)

9.10. Огнеупорные изделия на основе углерода

Огнеупорные изделия на основе углерода (часто именуемыми углеродистыми изделиями) обладают высокой химической инертностью, несмачиваемостью металлургическими расплавами, высокой термостойкостью (до 2400 °С), хорошей электропроводностью, высокой удельной теплопроводностью. Их применяют главным образом для монолитной кладки лещади и горна доменных печей, выкладки подин электропечей, а также печей для плавки свинца, алюминия, магния и других цветных металлов. Углеродистые огнеупорные изделия подразделяют на:

- графитовые (30 - 60 % С);
- коксовые. (70- 90 % С);
- углеродные (90- 100 % С).

Графит имеет высокую температуру плавления 3600 °С (после 2400 °С начинает интенсивно испаряться), высокую тепло- и электропроводность, низкий коэффициент линейного расширения, малую плотность (1,8 - 2,2 г/см^3), высокую термостойкость высокую химическую инертность. Недостатками графита являются способность к окислению кислородом воздуха при температурах выше 520 °С, малая прочность на растяжение и изгиб. Графитовые огнеупоры изготовляют с применением огнеупорной пластичной глины и графита с добавкой или без добавки шамота. Главное назначение графитовых огнеупорных изделий - изготовление тиглей и электродов. Коксовые огнеупорные изделия изготовляют из кокса на смоляной связке. Главное назначение коксовых огнеупорных изделий - кладка доменных печей. Особый класс – углеродные изделия, получаемые методом пиролиза. Они обладают высокой стоимостью, поэтому их применяют для ответственных теплотехнических устройств.

10. Расчеты термических устройств

При расчете печи может стоять одна из трех задач.

1. Задано начальное и конечное температурное состояние металла и условия теплообмена. Требуется определить продолжительность тепловой обработки. Такая задача возникает при заданной технологии и нерегламентированном времени обработки.

2. Задано начальное и конечное температурное состояние металла и время термической обработки. Требуется определить условия теплообмена и средства технологического оснащения.

3. Задано начальное температурное состояние металла, время термической обработки и условия теплообмена. Требуется определить конечную температуру металла. Задача возникает при расчете нагрева или охлаждения в отдельных зонах печи.

Основные постулаты, используемые при расчетах.

- При расчете уравнений теплопередачи металл (изделия) представляют неподвижным телом, а процессы стационарными.
- Нагреваемые тела имеют простую форму.
- Температура поверхности изделий и нагревательных элементов является постоянной или меняется во времени линейно.
- Тепловые свойства изделий являются усредненными.
- При расчетах пренебрегают влиянием химических процессов (окисление, обезуглероживание).
- Температурное поле печи считается равномерным (кроме методических печей).

10.1. Уравнение теплового баланса

Основными уравнениями для теплового расчета тепловых устройств являются уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи. В общем случае его можно сформулировать следующим образом. Количество теплоты, отданное при теплообмене более горячим телом, будет равно по модулю количеству теплоты, полученному менее горячим телом. При расчете термических печей уравнение теплового баланса может быть представлено следующим образом [9]:

$$Q_X + Q_T + Q_B + Q_{ЭКЗ} = Q_M + Q_Д + Q_{ВЫБ} + Q_{КЛ} + Q_{ОХЛ} + Q_{ИЗЛ} + Q_{ТР} + Q_{АТМ} + Q_{АК} + Q_{НЕУЧТ}$$

1. Q_X- химическое тепло, получаемое при сжигании топлива. Количество выделяемого тепла может быть рассчитано по следующей формуле:

$$Q_X = Q_H \cdot V_t$$

Где $Q_н$- низшая теплота сгорания данного вида топлива; V_t – расход топлива.

2. $Q_т$ – физическое тепло топлива. Термические печи могут быть снабжены устройствами рекуперации для подогрева жидкого (реже газообразного) топлива. В этом случае дополнительное количество тепла, генерируемое нагревательным устройством, может быть определено по следующей формуле:

$$Q_T = C_t \cdot T_t \cdot V_t$$

Где $C_т$- удельная теплоемкость топлива; T_t - температура топлива; V_t – расход топлива.

3. $Q_в$ - физическое тепло воздуха. В системах рекуперации может осуществляться подогрев воздуха, подаваемого в горелки. В этом случае дополнительное количество тепла, приносимое подогретым воздухом может быть рассчитано по формуле:

$$Q_B = a \cdot L_B \cdot C_B \cdot T_B \cdot V_t$$

где а – коэффициент избытка воздуха;

$l_в$ –теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания единицы топлива; $C_в$- теплоемкость воздуха; $T_в$ – температура воздуха; V_t - расход топлива.

4. $Q_{экз}$ – тепло экзотермических реакций окисления железа. Желательно, чтобы этот компонент уравнения теплового баланса был как можно меньше или полностью отсутствовал, так как окисление металла приводит к резкому снижению качества термической обработки. Количество тепла, выделяемого при окислении железа, приблизительно может быть определено следующим образом:

$$Q_{ЭКЗ} = 15,7 \cdot У \cdot P$$

Где У – угар металла (1% /час); Р – производительность печи т/час.

5. $Q_м$- тепло, затраченное на нагрев металла. Целью термической обработки, как правило, является нагрев деталей до заданной температуры, поэтому доля этого компонента в расходной части уравнения теплового баланса должна значительной. Количество тепла, необходимого для нагрева деталей может быть определено по следующей формуле:

$$Q_M = P \cdot (C_{M.KOH} \cdot T_{M.KOH} - C_{M.НАЧ} \cdot T_{M.НАЧ})$$

Где Р – производительность печи т/час; $C_{м.кон}$ и $C_{м.нач}$ - начальная и конечная теплоемкость металла; $T_{м.кон}$ и $T_{м.нач}$ - начальная и конечная температура металла.

6. Qд – тепло, уносимое продуктами сгорания. Обычно температура дымовых газов на несколько сотен градусов превышает температуру окружающей среды,

поэтому значительная часть тепла, генерируемого горелками, уносится дымовыми газами:

$$Q_Д = i_Д \cdot V_t$$

Где $i_д$- энтальпия уходящих продуктов сгорания; V_t - расход топлива.

7. $Q_{выб}$- тепло, уносимое продуктами сгорания с температурой выше температуры газов в дымоходе через технологические отверстия и проемы в термическом оборудовании. В конструкции топливных печей возможно наличие различных технологических отверстий, например загрузочных и разгрузочных окон, через которые возможна утечка дымовых газов с высокой температурой. В этом случае количество теплоты, уносимое продуктами сгорания с температурой выше температуры газов в дымоходе через технологические отверстия, может быть определено следующим образом:

$$Q_{ВЫБ} = C_{ВЫБ} \cdot T_{ВЫБ} \cdot V_{ВЫБ}$$

Где $C_{выб}$ - теплоемкость выбивающихся газов; $T_{выб}$ - температура выбивающихся газов; $V_{выб}$ - расход выбивающихся газов. Количество подсасываемого воздуха или выбивающегося газа $V_{выб}$, рассчитывается следующим образом:

$$Vвыб = \varphi \cdot f \cdot w \cdot 3600$$

где φ — коэффициент сжатия струи; приблизительно равен 0,75;

f — площадь отверстия или щелей; w—скорость выбивания или подсоса

$$w = \sqrt{\frac{2gh}{\gamma}}\varphi$$

g — ускорение силы тяжести в γ - объемный вес воздуха при температуре цеха или газа при температуре печи; h - разрежение или давление в печи.

8. $Q_{неп}$ – потери за счет неполного сгорания топлива. При сжигании твердого, жидкого и реже газообразного топлива, отдельная его часть сгорает не полностью, что приводит к дополнительным тепловым потерям:

$$Q_{неп} = \vartheta_Д \cdot V_T \cdot \theta$$

Где $\upsilon_д$ – количество дымовых газов, образующихся из одной единицы топлива;

$V_т$ – расход топлива; Θ-коэффициент полноты сгорания топлива.

9. $Q_{кл}$ – потери тепла через футеровку печи. Этот компонент уравнения теплового баланса являются неотъемлемой частью расчетов термического оборудования. Для расчета необходимо иметь конструктивный эскиз футеровки с основными размерами; данные о свойствах используемых огнеупорных и теплоизоляционных материалов; значение коэффициента теплоотдачи с внешней поверхности стенки печи в окружающую среду. Чаще расчет выполняют в условиях стационарного теплообмена по следующей формуле.

$$Q_{КЛ} = q_{КЛ} \cdot F_{КЛ}$$

Где $q_{кл}$ - удельный тепловой поток через кладку; $F_{кл}$- площадь кладки;

$$q_{КЛ} = \frac{T_{вн} - T_{нар}}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \Sigma \delta_i \lambda_i + \frac{1}{\alpha_{нар}}}$$

$T_{вн}$ и $T_{нар}$ – температура внутри и снаружи печи;

$\alpha_{вн}$ и $\alpha_{вн}$ коэффициенты теплоотдачи наружной и внутренней поверхности кладки; $\sum\delta_i\lambda_i$ - толщина и теплопроводность каждого слоя кладки.

10. $Q_{охл}$ – потери тепла через охлаждаемые элементы. Для увеличения надежности некоторые элементы печи (чаще всего транспортирующие устройства) имеют принудительное охлаждение. В этом случае возникают дополнительные тепловые потери, которые можно рассчитать следующим образом:

$$Q_{ОХЛ} = q_{ОХЛ} \cdot F_{ОХЛ}$$

Где $q_{охл}$ - удельный тепловой поток через охлаждаемые элементы; $F_{охл}$ - площадь охлаждаемых элементов;

$$q_{КЛ} = \frac{T_{СР.ВХ} - T_{СР.ВЫХ}}{\frac{1}{\alpha_{ОХЛ}} + \delta \cdot \lambda}$$

$T_{ср.вх}$ и $T_{ср.вых}$ температура среды на входе и выходе; $\alpha_{охл}$- коэффициент теплоотдачи наружной поверхности охлаждаемых элементов; δ и λ- толщина и теплопроводность стенок охлаждаемых элементов.

11. $Q_{изл}$- потери тепла излучением через открытые отверстия. Высокотемпературных печах при загрузке и выгрузке изделий через открытые

технологические отверстия часть тепла передается в окружающую среду излучением.

$$Q_{ИЗЛ} = q_{ИЗЛ} \cdot F_{ИЗЛ} \cdot K$$

$q_{изл}$ - удельный тепловой поток излучением; $F_{изл}$ –площадь отверстия; К- доля времени открытия отверстия.

12. $Q_{тр}$ – потери на нагрев транспортирующих устройств

Для перемещения изделий обычно используют различные приспособления – поддоны, этажерки и т.д. вес которых обычно составляет 0,2…0,5 от веса обрабатываемых деталей. Кроме того, за пределы нагревательной камеры могут перемещаться различные части транспортирующих устройств , например конвейеров. В этом случае дополнительные тепловые потери можно определить по следующей формуле:

$$Q_{ТР} = C_{ТР} \cdot G \cdot (\mathrm{T}_{\text{тр.кон}} - \mathrm{T}_{\text{тр.нач}})$$

Где G – масса транспортирующих устройств;

$C_{тр}$ - теплоемкость металла транспортирующих устройств; $T_{тр.кон}$ и $T_{тр.нач}$ - начальная и конечная температура транспортирующих устройств. Если вспомогательные устройства при возвращении в печь охлаждаются частично, то конечная температура их охлаждения обычно определяется опытным путем.

13. $Q_{атм}$ – потери на нагрев контролируемой атмосферы. В печах с контролируемой или защитной атмосферой часть поступающего тепла затрачивается на ее нагрев.

$$Q_{АТМ} = C_{АТМ} \cdot V_{АТМ} \cdot (\mathrm{T}_{АТМ.КОН} - \mathrm{T}_{АТМ.НАЧ})$$

где $C_{атм}$ - теплоемкость атмосферы; $T_{атм.кон}$, $T_{атм.нач}$ - начальная и температура атмосферы; $V_{атм}$- расход контролируемой атмосферы;

14. $Q_{ак}$ – аккумуляция тепла кладкой. Определение теплоты аккумуляции актуально при составлении теплового баланса печей периодического действия, а также для расчета времени разогрева любой печи до технологической температуры.

$$Q_{АК} = M_{КЛ} \cdot C_{КЛ} \cdot (\frac{\mathrm{T}_{НАЧ.ВН} - \mathrm{T}_{НАЧ.КОН}}{2} - \mathrm{T}_{СР})$$

Где $M_{кл}$ – масса кладки; $C_{кл}$ – теплоемкость кладки; $T_{нач.вн}$, $T_{нач.нар}$- начальные температуры наружных и внутренних слоев перед началом цикла; $T_{ср}$- средняя температура кладки после цикла, которая чаще всего определяется экспериментальным путем.

15. $Q_{неучт}$ – неучтенные потери. Обычно величину неучтенных потерь залают в количестве 10 % от общей величины потерь:

$$Q_{неучт} = 0,1(Q_M + Q_Д + Q_{ВЫБ} + Q_{КЛ} + Q_{ОХЛ} + Q_{ИЗЛ} + Q_{ТР} + Q_{АТМ} + Q_{АК})$$

10.2 Футеровка термических печей и ее расчет

В печах с рабочей температурой до 350° С футеровка представляет собой двойной металлический кожух заполненный теплоизоляционным материалом. В высокотемпературных печах футеровка обычно состоит из огнеупорного и теплоизоляционного слоев. При выборе материала футеровки необходимо учитывать, взаимодействие с атмосферой, рабочую температуру, характеристики теплопроводности, теплоемкость, термостойкость, коэффициент температурного расширения. В печах с длительным режимом работы футеровка выбирается так, чтобы температура наружной поверхности кожуха не превышала 60 °С, а в печах с цикличными режимами допустим нагрев до 110 °С. Теплоизоляционный слой обычно выкладывается всухую, а огнеупорный - на растворах, обязательно «вперевязку». Элементы футеровки можно выполнять из жаростойкого бетона, обладающего повышенной прочностью. Для обеспечения расширения кладки при разогреве в огнеупорном слое предусматривают температурные швы, заполненные выгорающими прокладками (картоном, бумагой, фанерой) между соответствующими кирпичами футеровки. Теплоизоляцию стен можно выполнять кирпичом, минеральными материалами и порошком. Не рекомендуется применять засыпки в печах с вибрационными нагрузками. Конструкция пода определяется типом узла поддержания (перемещения) нагреваемых изделий и исполнением нагревателей. При больших нагрузках на под в качестве опор применяют

огнеупорные кирпичи или специальные блоки. Для перекрытия прямоугольных пролетов применяют арочные и плоские своды, для перекрытия круглых отверстий (например, в шахтных печах) - сферические своды (рис.44). Арочные и сферические своды выкладывают клиновым кирпичом или комбинацией клинового и прямого кирпичей. Плоские своды выполняют специальными огнеупорными плитами, фасонными балками или блоками на металлических подвесках. Дверцы обычно выполняют в виде двойного металлического кожуха, заполненного теплоизоляцией. Электропечи сопротивления обычно закрываются сплошным металлическим кожухом. Кожух печей с контролируемой атмосферой выполняют газонепроницаемым материалом с минимальным количеством разъемов и отверстий. Для герметизации мест разъемов кожуха или муфеля не рекомендуется применять материалы, теряющие пластичность, а также песочные затворы.

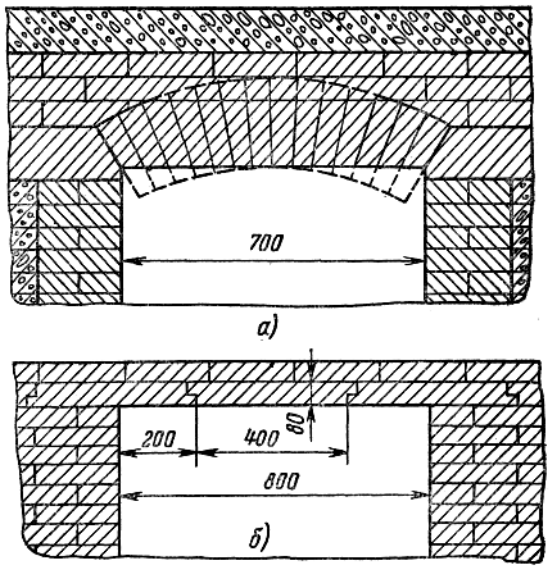


Рисунок 44. Перекрытие проемов, а - арочный свод из кирпича; б - перекрытие плитами,

Расчет потерь тепла в печах производят с допущениями. В рабочем режиме все элементы конструкции, включая футеровку, находятся в стационарном тепловом режиме, т. е. не изменяют свою температуру во времени. Небольшие

изменения температуры, связанные с автоматическим регулированием при этом не учитывают. Расчет футеровки одной из стенок печи может быть произведен в следующем порядке [18]:

1. Задаются исходные данные:

- количество слоев
- материалы футеровки
- коэффициенты теплопроводности материалов
- максимальные рабочие температуры каждого слоя

2. Назначается температура на наружной поверхности стенки (110 ^{o}C для печей периодического действия и 60 ^{o}C для печей непрерывного действия).

3. Рассчитывается удельный тепловой поток через 1 м^2 стенки:

$$q = \alpha(t_{HC} - t_{OC})$$

где **q** –удельный тепловой поток через 1 м^2 стенки; α – коэффициент теплоотдачи наружной стенки в окружающую среду, $\mathbf{t_{нс}}$ – температура наружной стенки; $\mathbf{t_{ос}}$ – температура окружающей среды.

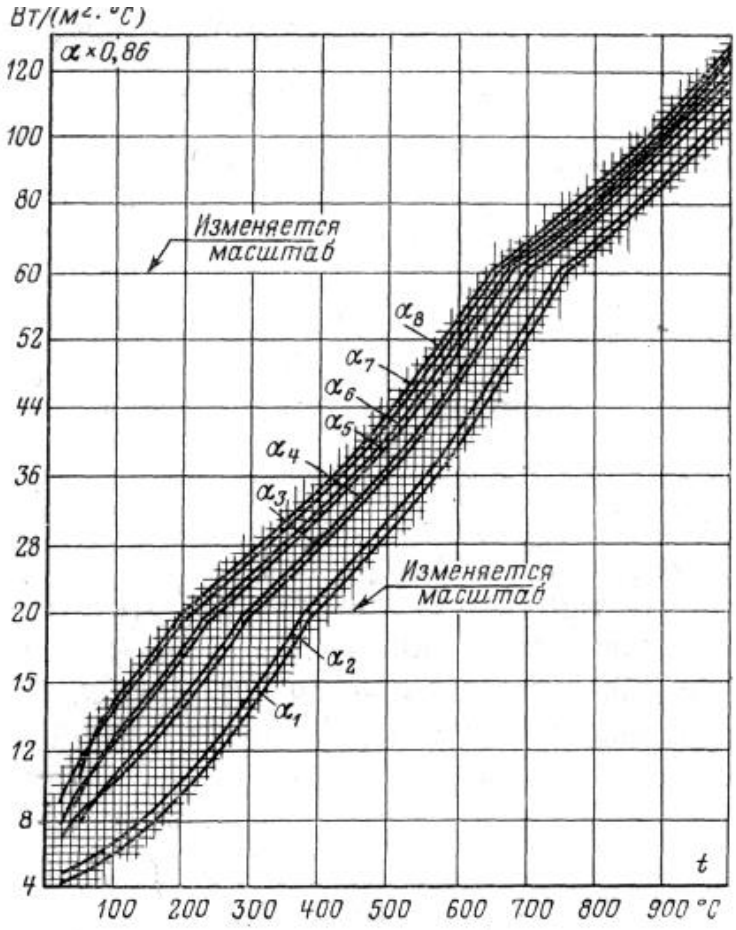


Рисунок 45. Коэффициент теплоотдачи поверхности в окружающее пространство. α_1 и α_2- коэффициенты теплоотдачи излучением в вакууме при температуре окружающего пространства 20 °С (α_1) и 40 °С (α_2); α_3 ,α_5 и α_7- коэффициенты теплоотдачи в воздухе при температуре окружающего пространства 20 °С; α_4 ,α_6 и α_8- коэффициенты теплоотдачи в воздухе при температуре окружающего пространства 40 °С; α_3 и α_4- для горизонтальной стенки обращенной вниз; α_5 и α_6- для вертикальной стенки; α_7 и α_8- для горизонтальной стенки обращенной вверх [18].

4. Назначают температуру внутренней стенки печи $\mathbf{t_{вс}}$ (равна температуре печи, если она известна, или температуре нагрева загрузки).

5. Назначают температуры t_i,. и t_{i+1}, границ между каждыми двумя слоями футеровки. Температуру границы принимают равной максимально допустимой температуре эксплуатации слоя с меньшими показателями огнеупорности.

6. Определяют термические сопротивления слоев $\mathbf{R_i}$:

$$R_i = \frac{(t_i - t_{i+1})}{q} = \frac{\delta}{\lambda}$$

Где $\boldsymbol{\delta_i}$ **–** толщина i слоя; $\boldsymbol{\lambda_i}$ – коэффициент теплопроводности i слоя.

7. Находят средние арифметические температур слоев и рассчитывают по ним средние коэффициенты теплопроводности для данного диапазона температур.

8. Определяют расчетные толщины слоев:

$$\delta_i = R_i \cdot \lambda_i$$

9. Устанавливают реальные толщины слоев, исходя из размеров используемых материалов: кирпича, толщины теплоизоляционных плит, матов и т. п.:

$$\delta_p \rangle \delta_i$$

Когда футеровка стенки сконструирована, делают поверочный расчет с целью определения потерь тепла:

а) назначают $\mathbf{t_{вс}}$, $\mathbf{t_{нс}}$, $\mathbf{t_{ос}}$ (как в предыдущем случае);

б) ориентировочно назначают температуры на границах слоев $\mathbf{t_i}$, $\mathbf{t_{i+1}}$,определяют средние арифметические температуры слоев и рассчитывают по ним средние коэффициенты теплопроводности;

в) определяют термическое сопротивление первого слоя стенки и рассчитывают температуру на ее границе:

$$Ri \cdot q = t_{BC} - t_{i+1}$$

г) последовательно, определяют температуры на границах слоев и на наружной поверхности стенки;

ж) по новым температурам границ слоев рассчитывают новые средние температуры, а по ним новые коэффициенты теплопроводности и затем делают более точный тепловой поток и температуры границ (рис.46).

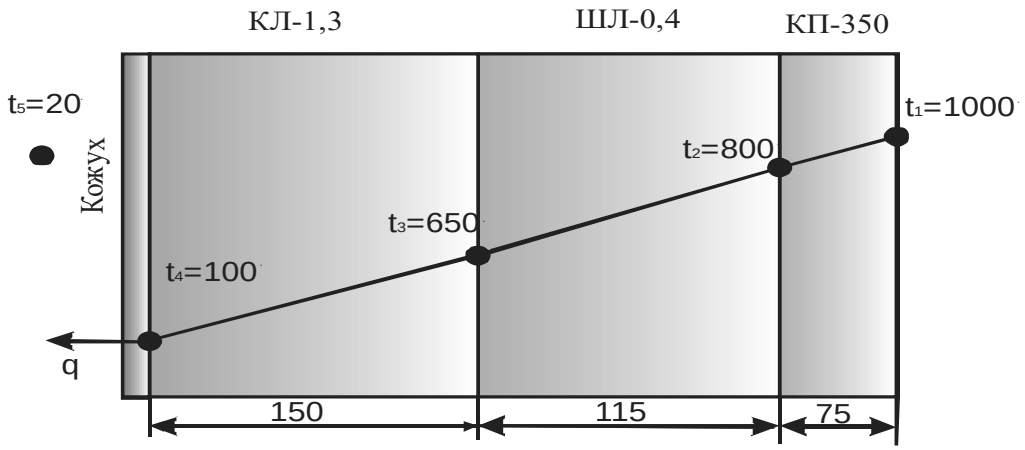


Рисунок 46. Пример расчета трехслойной футеровки печи с рабочей температурой 1000 °С.

11. Нагревательные устройства

11.1. Классификация нагревательных устройств

В зависимости от способа получения тепла нагревательные устройства условно можно классифицировать на топливные и электрические. В зависимости от используемого топлива топливные нагревательные элементы подразделяются на горелки, форсунки и топочные устройства камерного или слоевого типа. Электрические нагревательные элементы подразделяют на устройства прямого или косвенного нагрева (рис. 47).

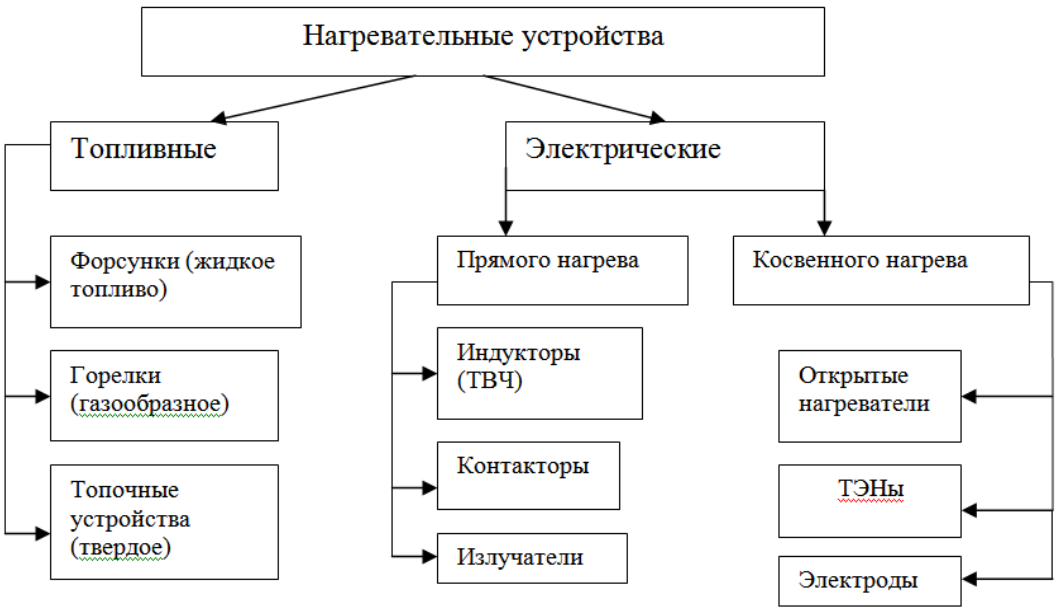


Рисунок 47. Классификация нагревательных устройств

11.2 Трубчатые нагревательные элементы

Трубчатые нагревательные элементы представляют собой спирали, закрытые кожухом [25]. Конструкция нагревательных элементов представлена на рисунке 48. Спираль ТЭНов изготавливают из сплавов никелевых сплавов марок Х15Н60, Х20Н80 или более дешевых сплавов на основе железа марок Х23Ю5Т, Х27ЮТ. Оболочку выполняют из углеродистой стали (рабочая температура до 450 ^{o}C), нержавеющих сталей сталей аустенитного класса (рабочая температура до 750 ^{o}C), из медных и алюминиевых сплавов (рабочая температура до 250 ^{o}C), а так же в некоторых случаях из никелевых сплавов (рабочая температура до 1000 ^{o}C). Стенки ТЭНа обычно имеют толщину 0,5 или 1 мм, реже 1,5 мм. В качестве наполнителя используют электротехнический периклаз (97 % MgO). Он обладает высокой теплопроводностью, при этом не электропроводен и химически нейтрален к материалу спирали. Достоинствами ТЭНов являются:

- более высокие сроки службы и вероятность безотказной работы т.к. нет доступа воздуха к нагревательному элементу;.
- повышенные свойства электробезопасности;
- стойкость к вибрации и ударным нагрузкам так как нагревательный элемент защищен и зафиксирован оболочкой и наполнителем;
- возможность применения для практически всех видов нагреваемых сред;
- возможность разветвления нагреваемой поверхности за счет применения радиального и продольного оребрения;
- большие возможности по обеспечению требуемой конфигурации вследствие большей жесткости.

Недостатки ТЭНов это:

- высокие показатели тепловой инерции;
- более высокая стоимость;
- необходимость вывода узла герметизации из зоны нагрева и защита этого узла;
- сложность применения при высоких температурах.

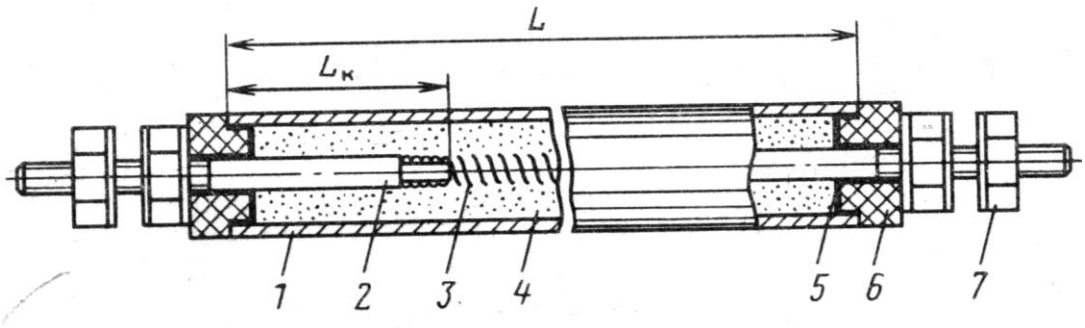


Рисунок 48. Трубчатый электрический нагревательный элемент 1- оболочка, 2- контактный стержень, 3 - спираль, 4- наполнитель, 5 - герметик, 6- изолятор, 7 – контактный стержень. L - развернутая длина ТЭНа

Трубчатые нагревательные элементы бывают одноконцевые и двухконцевые, оребреные и гладкие, круглого сечения, квадратного сечения , плоские и т.д.

Области применения ТЭНов:

- нагрев водных сред, растворы щелочей и кислот;
- нагрев воздуха (тэны с оребрением);
- нагрев газовых сред, в том числе агрессивных и взрывоопасных;
- нагрев жиров и масел (обогреватели и масляные подогреватели);
- нагрев и плавление селитры (ванны изотермической закалки);
- плавление легкоплавких металлов;
- нагрев теплопроводностью изделий из металлов (пресс-формы, штампы, плиты для литья пластмасс, спекания резины и т.д.)

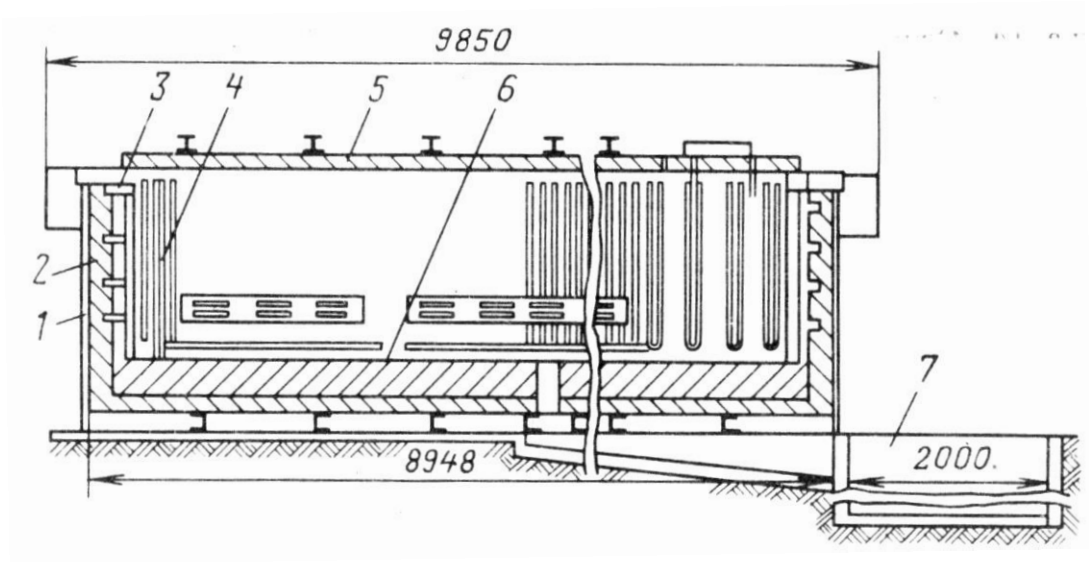


Рисунок 49. Селитровая печь - ванна 1- каркас, 2- футеровка, 3- тигель, 4- ТЭН. 5- крышка, 6- поддон, 7- аварийный слив расплава

Маркировка ТЭНов состоит из букв и цифр в определенной последовательности

- название ТЭН;
- развернутая длина по оболочке в см.;
- длина контактного стержня мм.;
- номинальный диаметр ТЭНа в мм;
- номинальная мощность кВт;
- обозначение нагреваемой среды. П- вода, Р- слабые Щелочи, С –воздух, Т -газы с повышенной агрессивностью, О- воздух с принудительной конвекцией, Л- литейные формы, И – масла;
- номинальное напряжение, В.

Порядок выбора ТЭНов.

1. Определяют желательные габаритные размеры и форму.
2. В зависимости от вида нагревательной среды и рабочей температуры определяют материал оболочки.
3. В зависимости от вида нагреваемой среды и материала оболочки определяют значения удельной поверхностной мощности нагревателей.

4. Исходя из удельной поверхностной мощности и желательной длины активной части, рассчитывают максимальную мощность одного ТЭНа.
5. Выбирают по каталогу ТЭН.
6. Исходя из определения требуемого температурного режима или исходя из необходимой скорости нагрева (времени выхода на режим) определяют необходимую суммарную мощность ТЭНов.
7. Рассчитывают общее количество ТЭНов данного вида.

Выбор вариантов размещения ТЭНов

- В устройствах для нагрева газообразных или легкоподвижных веществ в условиях естественной конвекции тэны располагают в нижней части рабочего пространства или на поде печи.
- В устройствах для нагрева движущихся газообразных и жидких сред нагреватели целесообразно располагать по всему объему рабочего пространства, при этом желательно поперечное обтекание их потоком жидкости или газа.
- При размещении ТЭНа необходимо гарантировать нахождение всей активной зоны в нагреваемой среде и обеспечить достаточное удаление узлов герметизации от активной зоны.

11.3. Радиационные трубы

Радиационные трубы это полые трубчатые нагревательные элементы печей, оснащенные горелками или открытыми нагревательными элементами [15].

К достоинствам радиационных труб можно отнести следующие аспекты:

- герметизация нагревательных элементов от агрессивной рабочей среды в печи (или наоборот в случае использования топливных горелок);
- замена радиационных труб может быть осуществлена без остановки печи;
- радиационные трубы с топливными горелками могут быть использованы для нагрева жидких сред.

К основным недостаткам радиационных труб можно отнести более низкий коэффициент полезного действия и более высокую стоимость по сравнению с открытыми нагревательными элементами.

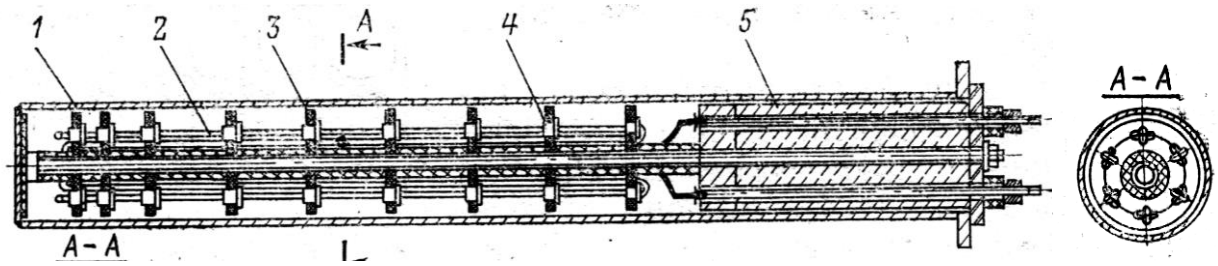


Рисунок 50. Радиационная труба с электрическим нагревательным элементом. 1- труба, 2- нагревательный элемент, 3- шайба. 4- изолятор, 5- пробка.

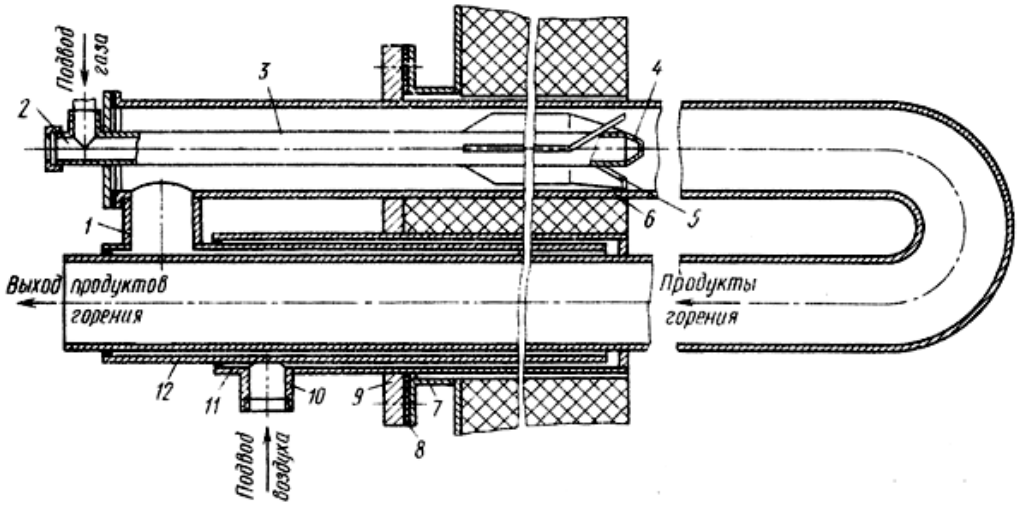


Рисунок 51. U-образная топливная радиационная труба: 1- патрубок ввода нагретого воздуха; 2- отверстие для розжига; 3- труба подачи газа; 4 – газовое сопло; 5 – завихритель; 6 – излучающая труба; 7 - фланец кожуха печи; 8 – прокладка; 9 – крышка; 10 – патрубок холодного воздуха; 11 – внешняя труба рекуператора; 12 – средняя труба рекуператора.

11.4. Открытые нагревательные элементы

Открытые нагревательные элементы обычно изготавливают из сплавов на основе никеля (нихромов), хромоникелевых сплавов на основе железа,

железохромоалюминиевых сплавов (фехралей), тугоплавких металлов (Mo, W). Область применения материалов определяется рабочими температурами, средой в рабочем пространстве и планируемым ресурсом работы нагревательных элементов. По сечению нагреватели бывают проволочными и ленточными. Проволочные нагреватели изготавливают зигзагообразными или спиралеобразными, ленточные - в виде зигзагов. Размещение нагревателей в печи зависит в первую очередь от способа передачи тепла от нагревателя к загрузке, свойствами загрузки и требованиями к равномерности температуры. В высокотемпературных печах нагреватели размещают на стенах, поде и своде печи для того, чтобы обеспечить равномерность излучения. В прецизионных печах нагреватели дополнительно размещают на торцевых стенках и загрузочных окнах. В низкотемпературных печах нагреватели обычно крепят на стенках при помощи фасонных керамических втулок или на керамических трубках, а вентиляторы устанавливают на крышке или своде печи (рис. 52, 53). В печах излучения зигзагообразные нагреватели крепят на специальных керамических или металлических крючках, подовые нагреватели - на керамических опорах. Диаметр крючков обычно равен диаметру проволоки, длина крючка определяется толщиной слоя кладки. Под подовыми нагревателями оставляют зазор для сбора мусора и окалины. Нагреватели могут быть сварены, но только на прямолинейных участках и внахлест. К обоим концам нагревателя привариваются выводы диаметром в 3..4 раза большим, чтобы избежать перегрева. Подвод тока к нагревателям происходит через зажимы, надеваемые на выводы за пределами печи. Так как нагреватели имеют ограниченный ресурс работы, конструкция печи предусматривает легкость их замены или ремонта. Нихромовые нагреватели можно в процессе ремонта сваривать, железохромоалюминиевые нагреватели в процессе работы охрупчиваются и не ремонтопригодны. Наиболее тяжелые условия эксплуатации у подовых нагревателей, которые экранированы садкой и на которые сыплется окалина. Подовые нагреватели обычно делают быстросъемными и соединяют параллельно, так как при такой схеме соединения выход из строя одного нагревателя не приводит к выходу остальных

нагревательных элементов. При наличии в печи агрессивной среды или возможности механического повреждения, нагревательные элементы помещают в радиационные трубы. С точки зрения затрат энергии такая конструкция не является оптимальной, однако позволяет повысить ресурс работы и ремонтопригодность нагревателей, а так же не требует останова печи для замены вышедшей из строя радиационной трубы.

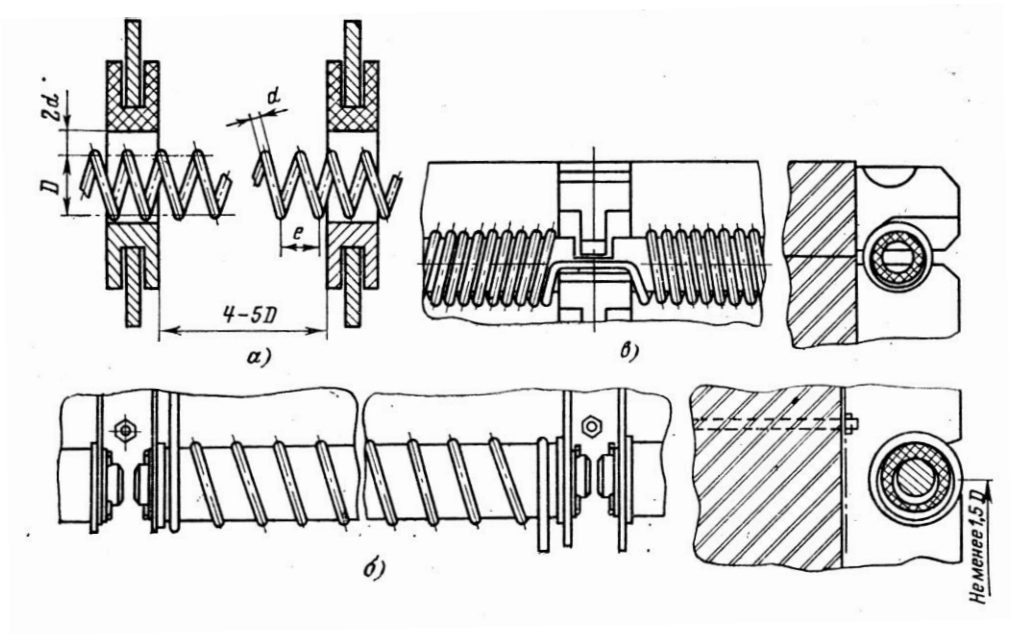


Рисунок 52. Размещение спиральных нагревательных элементов. а- в фасонных керамических втулках, б- на керамической трубке, укладываемой на металлические кронштейны, в - на керамической трубке, укладываемой на керамические консольные опоры.

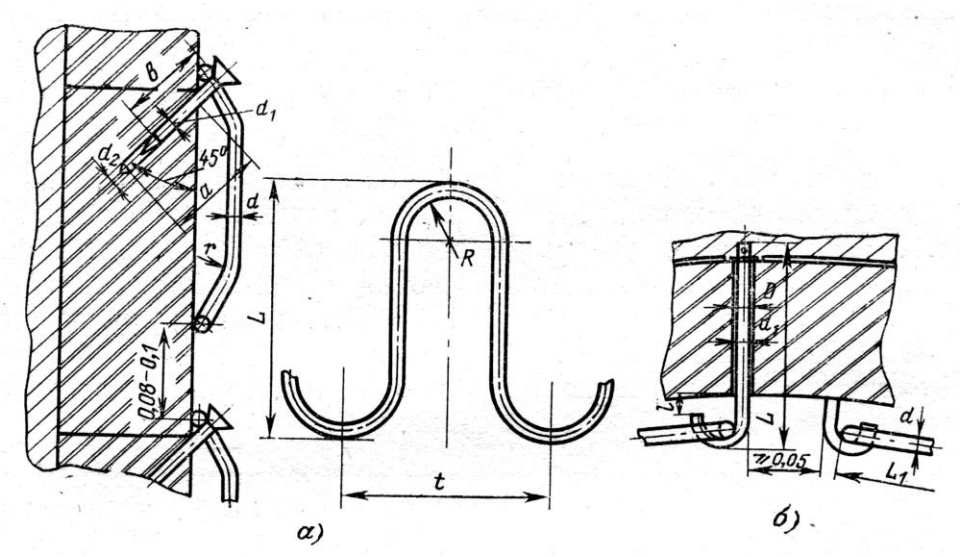


Рисунок 53. Размещение зигзагообразных нагревательных элементов. а- на боковых стенках, б- на своде

11.5. Расчет электрических нагревательных элементов

Расчет нагревательных элементов осуществляется в следующей последовательности [11]:

1. Определяется номинальная мощность печи:

$$P_{ном} = K \cdot P_{нэ}$$

Где $P_{нэ}$- мощность (тепло) выделяемая нагревательными элементами (определяемая по приходной части уравнения теплового баланса); К – коэффициент запаса, равный 1,2-1,3 для печей непрерывного действия, 1,4-1,5 для печей периодического действия.

2. Определяется количество фаз. Если мощность печи выше 15 кВт, то печь конструируется трехфазной, менее 15 кВт - однофазной. Для трехфазной печи определяется мощность фазы:

$$P_{ф} = \frac{P_{ном}}{3}, \text{ кВт}$$

3. Если мощность фазы получается большой, тогда в каждой фазе берется по несколько N параллельных ветвей. Определяется мощность одной параллельной ветви:

$$P_{пв} = \frac{P_{ф}}{N}, \text{ кВт}$$

4. Определяется фазовое напряжение:

$$V_{ф} = \frac{V_{л}}{\sqrt{3}}, \text{ В}$$

где$V_{л}$ - линейное напряжение сети, 380В

5. Определяется сопротивление фазы:

$$R_{ф} = \frac{V_{ф}^2}{P_{ф} \cdot 10^3}, \text{ Ом}$$

где $V_{ф}$ - фазовое напряжение, В; $P_{ф}$ - мощность фазы, кВт; 10^3 - множитель для перевода киловатт в ватты.

6. Определяется сопротивление параллельной ветви:

$$R_{пв} = \frac{V_{ф}^2}{P_{пв} \cdot 10^3}, \text{ Ом}$$

7. Выбирается тип, форма и материал нагревательных элементов. В основном применяются три конструкции электронагревателей: проволочный зигзаг, ленточный зигзаг, проволочная спираль. При выборе конструкции и материала электронагревателей учитывают необходимую температуру нагревателя и срок его службы. Сечение и материал нагревателя выбираются по рекомендациям (таблица 27).

Таблица 27. Рекомендации по выбору нагревательных элементов [12].

Для рабочей температуры печи	Размер нагревателя мм		Материал нагревателя
	Лента (ширина	Проволока (диаметр)	
До 300	8*1	1	Х13Ю5, Х17Ю5
300-600	10*1	2	Х13Ю5, Х17Ю5
600-300	15*1,5	3 - 4	Х13Ю5, Х17Ю5
800-1000	20*2	4 - 5	ХI5Н60

8. Определяется тепловой поток с единицы поверхности нагревателя на изделие. Тепловой поток зависит от температур нагревателя и нагреваемого изделия, их взаимного расположения, а также конструкции нагревателя.

Тепловой поток с единицы поверхности нагревателя q, кВт/м^2, (удельная тепловая мощность) определяют по формуле

$$q = C_{пр} \cdot 10^{-3} [(\frac{t_н + 273}{100})^4 - (\frac{t_м + 273}{100})^4] \cdot К_{эф} \cdot К_г \cdot К_р$$

где $t_н$ и $t_м$ — температура нагревателя и нагреваемого металла, °С; $С_{пр}$ - приведенный коэффициент излучения, Вт/(м2*К4); $k_{эф}$, - коэффициент эффективности излучения (0,68 –для проволочного зигзага, 0,4 – для ленточного зигзага, 0,32 для проволочной спирали); $k_г$ - коэффициент шага, зависящий от относительного межвиткового расстояния (от 0,8 до 2); $k_р$ – коэффициент, учитывающий соотношение поверхности нагреваемых изделий, обращенных к нагревателям $F_{из}$ и поверхности стен, занятых нагревателями $F_{ст}$

$$K_р = 1,25 \cdot \frac{F_{из}}{F_{ст}}$$

Таблица 28. Допустимая поверхностная удельная нагрузка для металлических нагревателей

Температура	Удельная нагрузка, Вт/см^2	Температура	Удельная нагрузка, Вт/см^2
400 - 600	3,0	900 - 1000	1,0
600 - 800	2,0	1000 - 1100	0,8
800 - 900	1,5	1100 - 1200	0,5

9. Рассчитывают сечение ленты или диаметр проволоки. При использовании ленты толщиной a мм и шириной b мм обычно принимается следующее отношение ширины к толщине: m = a/b = 8-12; толщина ленты определяется из формулы

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^5 Q P^2}{2m(m+1)V^2\omega}}, мм,$$

где Q удельное сопротивление материала нагревателя Ом $мм^2$/м,

P - мощность печи, кВт;

V - напряжение питающей сети, В;

ω - удельная поверхностная мощность нагревателя Вт/$см^2$.

Ширину ленты обычно назначают исходя из следующего отношения: в = a/m.

диаметр проволоки определяется по формуле:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\times10^5 \rho P^2}{\pi^2 V^2 \omega}}, \text{ мм}$$

где ρ — удельное сопротивление материала нагревателя Ом*мм^2/м; Р - мощность печи в кВт (или мощность одной фазы, если печь трехфазная); V - напряжение питающей сети в В; ω - удельная поверхностная мощность нагревателя в Вт/см^2.

10. Определяют площадь поперечного сечения нагревательного элемента:

$$q = a \cdot b$$

11. Определяется длина элемента сопротивления в одной параллельной ветви:

$$L_{пв} = \frac{R_{пв} \cdot q}{Q}, \text{ м}$$

где $R_{пв}$ - сопротивление параллельной ветви, Ом; q - площадь сечения в, $мм^2$;

Q – удельное сопротивление материала нагревателя, - $Ом^* \ мм^2/м$.

12. Определяется длина сопротивления в фазе:

$$L_ф = N \cdot L_{пв}, \text{ м}$$

где N - число параллельных ветвей. Общая длина элементов сопротивления в печи будет:

$$L_{об} = 3 \cdot L_ф, \text{ м}$$

13. Рассчитается вес ленточного нагревателя:

$$G = \frac{y \cdot q \cdot L_{об}}{10^3}, \text{ кг}$$

где y - удельный вес, г / $см^2$; q - сечение нагревателя, $мм^2$.

14. Рассчитывают геометрические параметры нагревательных элементов Проволочные элементы сопротивления располагают в печах в виде

цилиндрической спирали, для которой характерны два коэффициента: $К_с$ - коэффициент сердечника и $К_н$ - коэффициент плотности намотки:

$$K_c = \frac{D}{d};\ \ K_н = \frac{h}{d}$$

Таблица 29. Коэффициенты для расчета геометрических параметров спиральных нагревателей

Температура, °С	Кс		Кн
	Нихромы	Хромали	
Менее 750	8—11	4-5	2-4
750 - 950	6—8	4-5	2-4
Более 950	5-6	4-5	2-4

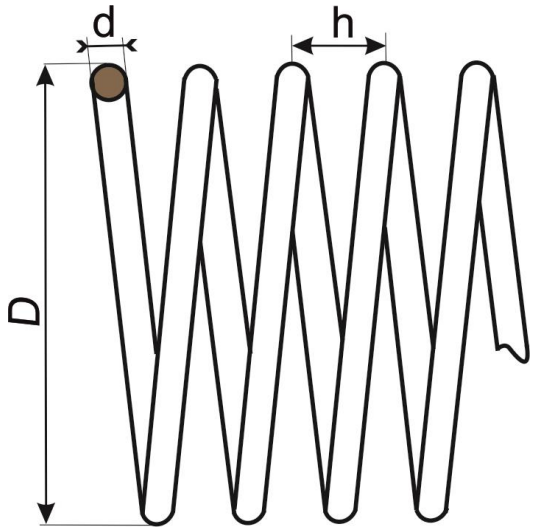


Рисунок 54. Схема спирального нагревателя. D – диаметр спирали, h- шаг спирали, l- длина спирали.

Определяют длину витка

$$L_{вит} = \pi \cdot D\text{, мм}$$

Длина выводов нагревателя берется из следующего расчета:

$$L_{выв} = b + 100\text{, мм}$$

где b - толщина стены печи в мм.

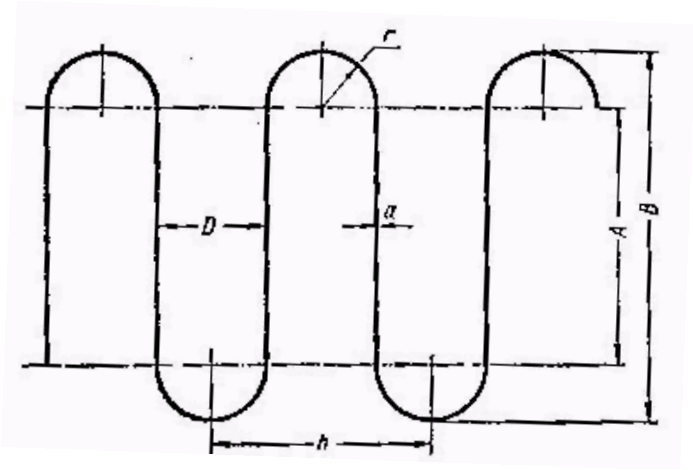


Рисунок 55. Схема зигзагообразного нагревателя. D - расстояние внутри зигзагов, B- высота зигзага, h- шаг зигзага, r- радиус зигзага, A - высота зигзага между центрами закруглений

Количество витков в спирали в одной фазе

$$n = \frac{L_ф}{L_{вит}}$$

Длина спирали

$$L_{сп} = h \cdot n$$

Ленточные элементы сопротивления располагают обычно зигзагом на стенках, своде и поде печи. Расстояние внутри зигзагов D принимают не менее ширины ленты—10 - 60 мм, чаще 15 - 25 мм. Высоту зигзагов B выбирают 150 - 500 мм при вертикальном расположении — на стенках печи и 100 - 200 мм при горизонтальном расположении - на своде и в поде печи. При больших размерах печи ленточные нагреватели располагают в два или три ряда. Поверхность излучения нагревательных элементов определяется

а) для проволочных нагревателей:

$$S = \pi \cdot d \cdot L_{об}$$

где d — диаметр проволоки мм; $L_{об.}$- общая длина проволоки в м;

б) для ленточных нагревателей периметр ленты равен:

$$2a + 2b = 2a + 2am = 2a(1 + m)$$

Поверхность излучения

$$S = 0,97 \cdot 2a(1 + m) \cdot L_{об}$$

где а - толщина ленты в мм; в - ширина ленты в мм; 0,97 - коэффициент, учитывающий уменьшение величины периметра прокатанной ленты с закругленными краями.

15. Удельная поверхностная нагрузка на нагревательные элементы является конечной целью расчета:

$$\Delta = \frac{P_{ном}}{S}$$

$P_{ном}$ - номинальная мощность печи; S - поверхность излучения нагревательных элементов.

Удельная поверхностная нагрузка (мощность) должна быть не более допустимой (таблица 30).

Таблица 30. Допустимая поверхностная удельная нагрузка для металлических нагревателей

Температура, °С	Удельная нагрузка, Вт/ см^2	Температура, °С	Удельная нагрузка Вт/ см^2
400 - 600	3,0	900 - 1000	1,0
600 - 800	2,0	1000 - 1100	0,8
800 - 900	1,5	1100 - 1200	0,5

11.6. Выбор и расчет горелочных устройств

Выбор и расчет горелочных устройств осуществляют в следующей последовательности [13,15].

1. С помощью уравнения теплового баланса определяется необходимое количество теплоты для обогрева термического устройства.
2. Выбирается тип топлива и определяются его теплотехнические характеристики.
3. Определяется расположение и количество горелок в рабочем пространстве печи и расход топлива через одну горелку.
4. Выбирается тип горелки.
5. Рассчитываются или определяются параметры горелки.

Для обогрева печей обычно используют газовое топливо, сжигаемое в горелках, реже мазут, сжигаемый при помощи форсунок. В зависимости от степени развития процесса смешения топлива с воздухом горелочные устройства можно разделить на три типа: устройства без предварительного смешения (топливо смешивается с воздухом для горения вне пределов горелочного устройства), с улучшенным смешением (горение начинает развиваться уже в горелочном туннеле, а в рабочем пространстве или топке оно лишь завершается) и с предварительным смешением (сгорание происходит в пределах горелочного туннеля**).**

Горелки без предварительного смешения рекомендуется применять, когда необходимо;

- обеспечить концентрированный подвод тепла с помощью небольшого количества крупных горелок;
- получить широкие пределы регулирования;
- работать попеременно на газе или мазуте.

Расчет горелок без предварительного смешения заключается в определении проходных сечений для газа, воздуха и газовоздушной смеси. Наибольшее распространение получили горелки типа "труба в трубе". Их выпускают в трех размерах: малой тепловой мощности - серия М, средней - С, и большой - серия Б. Горелки имеют два исполнения: для газов с высокой теплотой сгорания (10 - 35 МДж/м^3) - исполнение В; для газов с низкой теплотой сгорания (3,5 - 10 МДж/м^3)

- исполнение Н (отличаются соотношением проходных сечений для воздуха и газа).

Таблица 31. Рекомендуемые значения скоростей газа, воздуха и газовоздушной смеси для горелок типа "труба в трубе".

Характерное место	**Скорость, м/с**		
	Воздуха	**Газа**	**Смеси**
Трубопровод перед горелкой	8 - 10	10 - 15	
Входные сечения горелки при избытке давления при недостатке давления	 18 - 20 5 - 7	 18 - 20 5 - 7	
Газовое сопло до выходного сечения в выходном сечении		 20 - 25 80 - 100	
Носик горелки максимальная минимальная			 25 - 30 4 - 5

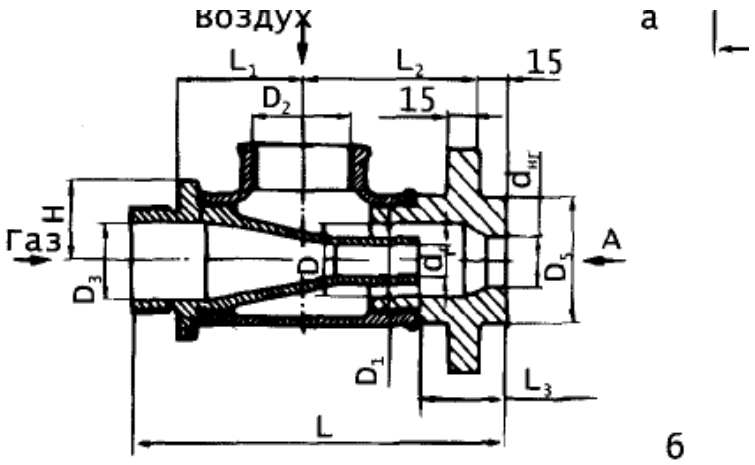


Рисунок 56. Горелка типа "труба в трубе" малой тепловой мощности

.

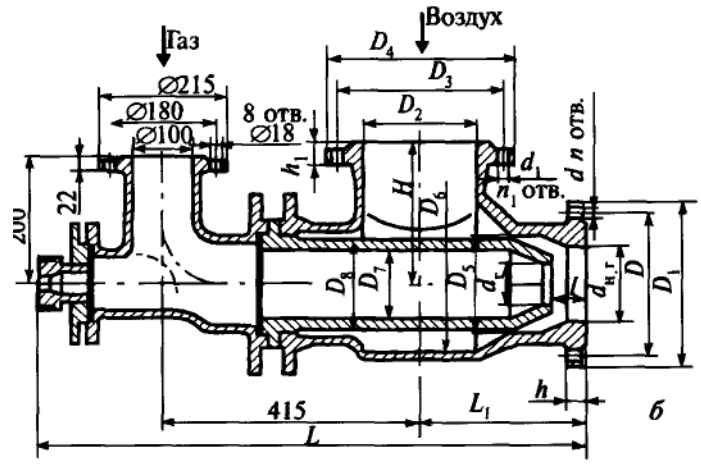


Рисунок 57. Горелка типа "труба в трубе" средней тепловой мощности

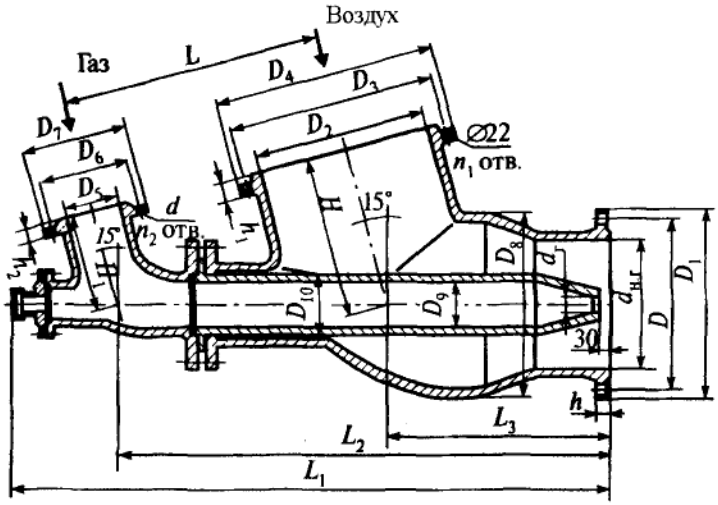


Рисунок 58. Горелка типа "труба в трубе" большой тепловой мощности

Обозначение горелок состоит из букв и цифр: первая буква Д - горелка дутьевая, вторая (В или Н) - исполнение горелки, третья (М, С или Б) - серия горелки; первая цифра - диаметр носика горелки (мм), вторая (через косую) - диаметр газового сопла (мм). Например, обозначение горелки ДНС 110/60 означает: дутьевая горелка типа "труба в трубе" средней тепловой мощности для газа с низкой теплотой сгорания, имеющая диаметр носика 110 мм и диаметр газового сопла 60 мм.

Горелки с улучшенным смешением (рис 59) обеспечивают получение короткого и высокотемпературного факела и получение факела заданной формы и с необходимыми характеристиками. Это достигается:

- увеличением пути перемешивания и продолжительности контакта газа и воздуха внутри горелки;
- разделением потока газа и (или) воздуха на мелкие струи;
- направлением потоков газа и воздуха под углом друг к другу;
- закручиванием потоков газа и (или) воздуха.

В основном используют следующие виды факела:

- *укороченный* (при ограниченном объеме камеры сгорания или при сжигании газов с низкой теплотой сгорания, горелки типа ГНП, ГДУВ);

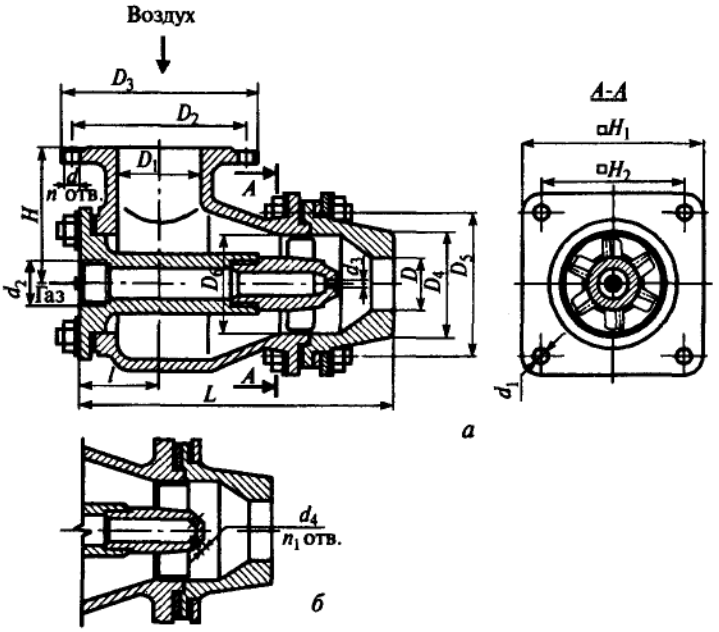


Рисунок 59. Горелка для природного газа низкого давления типа ГНП: а — с одноструйным газовым соплом типа Б; б — с многоструйным наконечником

- *плоский* (образуется при сжигании газа в тонком слое, стелющемся по поверхности огнеупорного кирпича, в результате чего обеспечивается интенсивный и равномерный нагрев металла излучением от разогретой кладки печи, применяется преимущественно при сводовом отоплении печей, горелки ГР, ГПП);
- *низкотемпературный* (необходим в термических печах, получают при сжигании газа с повышенным коэффициентом расхода воздуха горелки с переменным избытком воздуха типа ПИВ);

- *скоростной*_(для создания мощной циркуляции газов и интенсификации конвективного теплообмена ,скоростные горелки ПИВс).

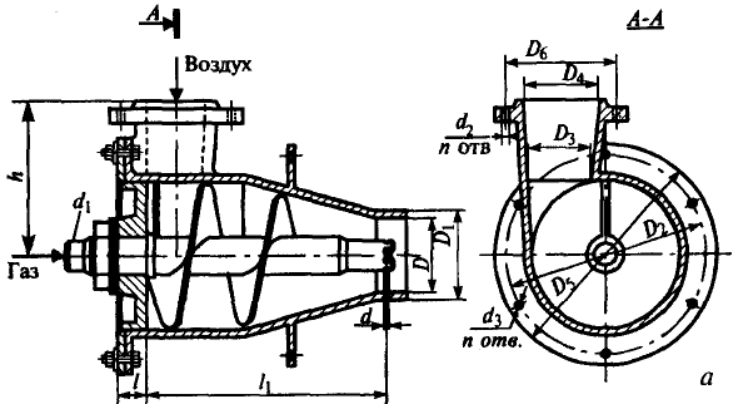


Рисунок 60. Плоскопламенная горелка типа ГПП

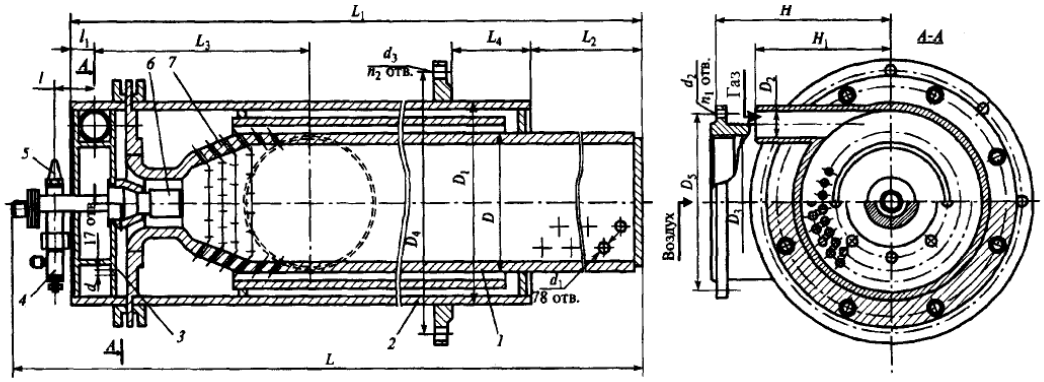


Рисунок 61. Горелка типа ПИВ с переменным избытком воздуха: 1 - камера сгорания; 2 - двухходовой контур охлаждения камеры сгорания; 3 - камера предварительного смешения; 4 - пилотно-защитное устройство; 5 - свеча электрозажигания; б - газовое сопло; 7 - периферийный струйный стабилизатор.

Таблица 32. Конструктивные размеры горелок низкого давления ГНП для природного газа[15]

Параметр	ГНП-1		ГНП-2		ГНП-3		ГНП-4		ГНП-5		ГНП-6		ГНП-7		ГНП-8		ГНП-9	
Размеры, мм:																		
D	25		33		45		55		73		92		110		128		142	
D_1	36		41		68		80		106		131		151		175		188	
D_2	90		100		130		150		170		200		225		255		255	
D_3	120		130		160		185		205		235		260		290		290	
D_4	45		60		80		90		130		130		150		170		180	
D_5	70		90		115		135		185		185		220		250		270	
D_6	45		58		82		98		132		132		158		182		200	
d	14		14		14		18		18		18		18		18		18	
d_1	14		14		14		14		18		18		18		23		23	
H	80		90		110		120		140		160		170		200		200	
H_1	110		120		150		170		225		225		260		290		320	
H_2	80		90		115		130		175		175		210		240		260	
h	10		10		12		12		14		15		16		16		16	
L	180		205		260		300		362		397		453		515		568	
l	45		50		55		75		90		105		120		135		145	
n	4		4		4		4		4		8		8		8		8	
Для природного газа																		
d_2	¾"		¾"		1"		1"		1¼"		1½"		2"		2½"		2½"	
d_3	5,5		7,0		10,0		13,5		16,0		20,0		24,0		28,0		31,0	
d_4	3,2		4,2		4,8		6,6		7,8		9,6		11,8		13,5		15,5	
Число отверстий n_1	4		4		6		6		6		6		6		6		6	
Для сжиженного газа																		
d_2	½"		½"		¾"		¾"		1"		1¼"		2"		2½"		2½"	
d_3	4,5		5,8		8,0		9,5		13,0		16,0		20,0		23,0		25,0	
d_4	2		2,8		3,4		3,7		6,4		8,0		9,0		10,6		12,0	
Число отверстий n_1	4		6		8		10		6		6		6		6		6	
Масса горелки, кг	6,6		7,8		14,4		22,0		37,0		43,0		58,0		81,0		96,0	
Тип сопла	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
Длина факела, мм**	230	340	264	330	420	480	550	Нет св.	1740	2060	1680	1990	1300	Нет св.	1140	1660	2270	2700

* Кроме указанных особо.
** Длина факела природного газа при давлении газа перед горелкой 4 кПа.

Горелки с предварительным смешением обеспечивают образование перемешанной газовоздушной смеси, которая сгорает при выходе или внутри горелки в коротком и высокотемпературном факеле. Наиболее распространены - инжекционные, в которых газ высокого давления подсасывает воздух, причем соотношение газ - воздух сохраняется при изменении давления газа. Горелки с предварительным смешением обеспечивают полное сгорание при коэффициенте расхода воздуха, близком к единице, а так же не требуют специальных устройств для подачи и регулирования количества воздуха, что существенно упрощает систему отопления печи. Горелки используют и при отоплении печей газами с высокой теплотой сгорания (тип В) и низкого (тип Н).

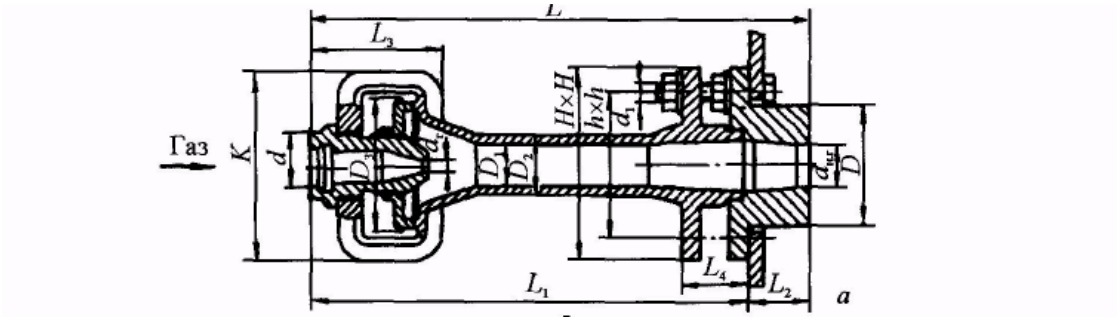


Рисунок 62. Инжекционная горелка типа Н:

Выбор горелок (тип "труба в трубе")

Для выбора горелки обычно задают параметры газа, воздуха и пропускную способность горелки по газу $V_{ог}$ (определяется из уравнения теплового баланса термического оборудования). Выбор горелки состоит в определении ее типа, размера и диаметра газового сопла. Расчет и выбор горелки осуществляют в следующей последовательности.

1. По рекомендациям выбирается давление в воздушной магистрали.
2. Определяется необходимое для сжигания газа количество воздуха

$$V_{ов} = \alpha L_o V_{ог}$$

где α - коэффициент расхода воздуха, который для обеспечения полного сжигания в горелках без предварительного смешения принимают не менее 1,1-1,15 (за исключением особых случаев нагрева в продуктах неполного сгорания); Lo, - стехиометрическое (при а = 1,0) количество воздуха на единицу объема газа.

3.Выбирается тип горелки по графикам в зависимости от количества воздуха и его давления перед горелкой. Графики построены для холодного воздуха (20 °С). При температуре воздуха t горелку следует выбирать по расчетному количеству воздуха $V_в$ ($м^3$/ч)

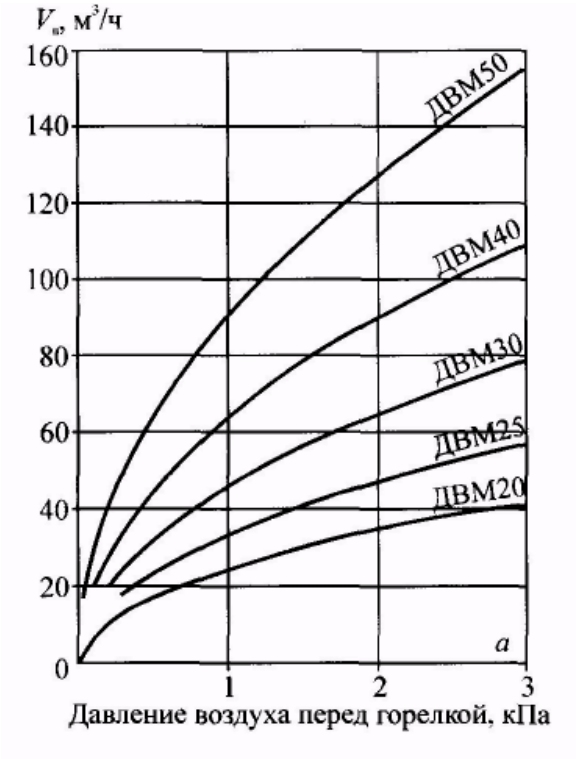


Рисунок 63. Пропускная способность по воздуху горелок типа ДВМ при температуре воздуха 20 °С.

4. Для данного типа горелки выбирают типоразмер газового сопла для газа с температурой 20 °С по графику в зависимости от необходимой пропускной способности горелки по газу $V_{ог}$ и его давления перед горелкой. Для газа с температурой t и плотностью р горелку следует выбирать по расчетному количеству газа Vг ($м^3$/ч)

$$V_г = V_{ог} K_t K_\rho$$

где поправку на температуру K_t вычисляют по формуле

$$K_t = \sqrt{\frac{T_г + 273}{273}}$$

K_ρ - поправка на плотность газа, равная

$$K_\rho = \sqrt{\rho_{0г}}$$

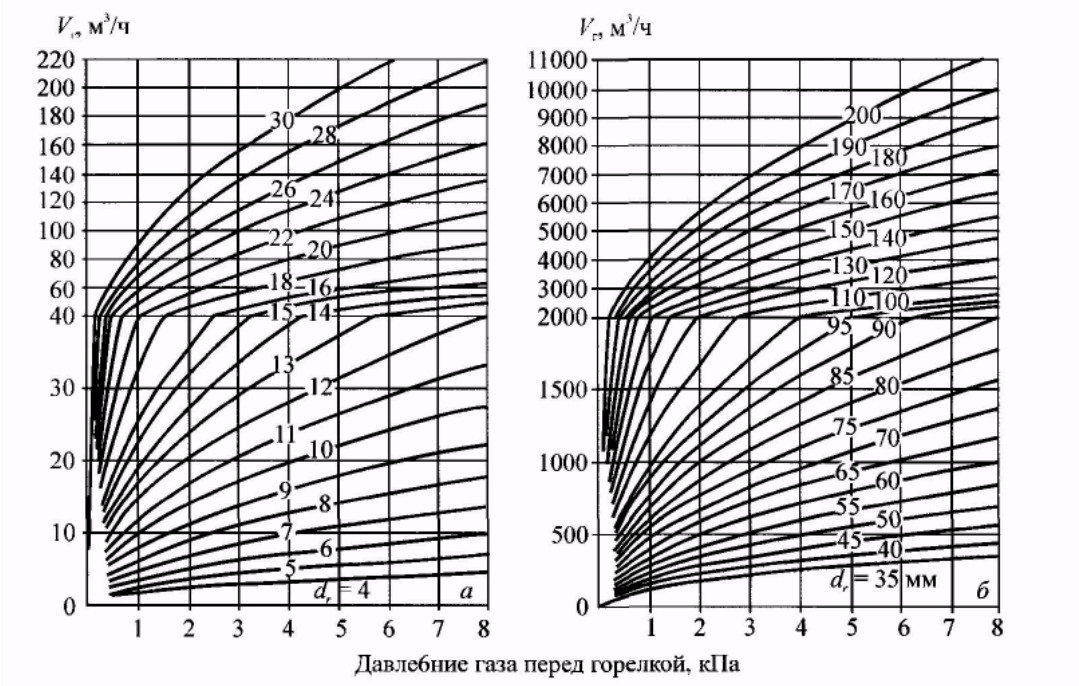


Рисунок 64. Пропускная способность по газу горелок типа "труба в трубе" с диаметром газового сопла: а — 4-30 мм; б — 35-200 мм (температура газа 20 °С; р = 1,0 кг/м3)

Таблица 33. Конструктивные размеры типа «труба в трубе» ДВМ и ДНМ малой тепловой мощности[15]

Обозначение горелки	$d_г$	$d_{н.г}$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	L	L_1	L_2	L_3	H	H_1	h	Масса горелки, кг
ДВМ 20/$d_г$	4–30	20	27,5	23	1 1/2"	–	1″	55	157	62	80	40	50	100	70	3,0
ДНМ 20/$d_г$	4–30	20	26,5	23	1 1/2"	1 1/2"	–	55	177	60	80	40	50	100	70	3,0
ДВМ 25/$d_г$	4–30	25	29	23	1 1/2"	–	1″	55	157	62	80	40	50	100	70	2,9
ДНМ 25/$d_г$	4–30	25	28	23	1 1/2"	1 1/2"	–	55	177	60	80	40	50	100	70	3,0
ДВМ 30/$d_г$	4–30	30	31	23	1 1/2"	–	1″	55	157	62	80	40	50	100	70	2,9
ДНМ 30/$d_г$	4–30	30	30	23	1 1/2"	1 1/2"	–	55	177	60	80	40	50	100	70	2,9
ДВМ 40/$d_г$	4–30	40	49	42,5	2 1/2"	–	2″	80	200	85	100	35	69	120	90	5,9
ДНМ 40/$d_г$	4–30	40	48	42,5	2 1/2"	2 1/2"	–	80	223	81	100	35	69	120	90	6,0
ДВМ 50/$d_г$	4–30	50	51,5	42,5	2 1/2"	–	2″	80	200	85	100	35	69	120	90	5,7
ДНМ 50/$d_г$	4–30	50	50	42,5	2 1/2"	2 1/2"	–	80	223	81	100	35	69	120	90	5,8

* Кроме указанных особо.

Таблица 34. Конструктивные размеры инжекционных горелок типа «Н»

Обозначение горелки	$d_{н.г}$	$d_г$	D	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	d	d_1	d_2	H	h	h_1	K	L	L_1	L_2	L_3	L_4	l	l_1	Число отверстий n	Масса горелки, кг
Н15/$d_г$	15	4,0–9,2	60	15	30	71	—	—	¾"	М12	—	120	80	—	110	220	195	25	101	44	—	—	—	5,1
Н18/$d_г$	18	4,8–11,0	60	18	30	71	—	—	¾"	М12	—	120	80	—	110	245	220	25	101	44	—	—	—	5,7
Н21/$d_г$	21	5,5–13,0	60	21	35	86	—	—	1"	М12	—	120	80	—	130	275	250	25	110	44	—	—	—	6,3
Н24/$d_г$	24	6,5–14,5	80	24	40	86	—	—	1"	М16	—	140	100	—	130	305	265	40	110	48	—	—	—	9,5
Н28/$d_г$	28	7,5–17,0	80	28	40	111	—	—	1 1/4"	М16	—	140	100	—	160	340	300	40	114	48	—	—	—	10,6
Н32/$d_г$	32	8,5–19,5	80	32	45	111	—	—	1 1/4"	М16	—	140	100	—	160	375	335	40	114	48	—	—	—	11,1
Н37/$d_г$	37	10,0–22,5	100	37	50	111	—	—	1 1/4"	М16	—	160	120	—	160	420	365	55	114	52	—	—	—	14,0
Н42/$d_г$	42	11–26	100	42	55	147	—	—	2"	М16	—	160	120	—	195	480	425	55	142	52	—	—	—	17,0
Н48/$d_г$	48	13–29	120	48	65	147	—	—	2"	М16	—	180	140	—	195	530	460	70	142	56	—	—	—	23,6
Н56/$d_г$	56	15–34	120	56	70	147	—	—	2"	М16	—	180	140	—	195	600	530	70	142	56	—	—	—	27,4
Н65/$d_г$	65	17–40	140	65	85	175	160	200	75	М16	17	210	170	20	260	760	660	100	275	56	—	—	4	44,6
Н75/$d_г$	75	20–46	140	75	95	175	160	200	75	М16	17	210	170	20	260	845	745	100	265	56	—	—	4	44,7
Н86/$d_г$	86	23–52	220	86	105	210	180	220	100	½"	17	145	40	22	305	990	185	200	190	130	90	55	8	81,3
Н100/$d_г$	100	27–61	260	100	120	210	180	220	100	½"	17	150	40	22	305	1110	255	200	190	130	90	55	8	97,5
Н116/$d_г$	116	31–71	300	116	135	235	210	250	125	½"	17	200	50	22	330	1250	290	240	220	160	110	65	8	128
Н134/$d_г$	134	36–82	350	134	155	300	240	285	150	¾"	22	200	50	24	420	1435	380	240	220	160	110	65	8	190
Н154/$d_г$	154	41–94	410	154	175	300	240	285	150	¾"	22	250	50	24	420	1595	435	280	260	200	150	65	8	258
Н178/$d_г$	178	48–109	470	178	200	335	295	340	200	1"	22	250	55	26	470	1840	550	280	260	200	150	65	8	343
Н205/$d_г$	205	55–126	490	205	230	435	350	395	250	1"	22	280	70	28	610	2120	640	300	280	220	170	65	12	500
Н235/$d_г$	235	64–144	510	235	260	435	350	395	250	1"	22	280	70	28	610	2365	805	300	280	220	170	65	12	531

* Кроме указанных особо.

Выбор форсунок для сжигания жидкого топлива

В качестве топлива для жидкостных горелок используют, как правило, высоковязкие топочные мазуты, подогретые до температуры 90-105 °С. Чаще всего применяют форсунки высокого давления с паровым и пневматическим распыливанием и газомазутные горелки. Для получения длинного и жесткого факела и высокой единичной пропускной способности применяют форсунки

высокого давления. Распылителем является компрессорный воздух или пар высокого давления Р = 400-600 кПа.

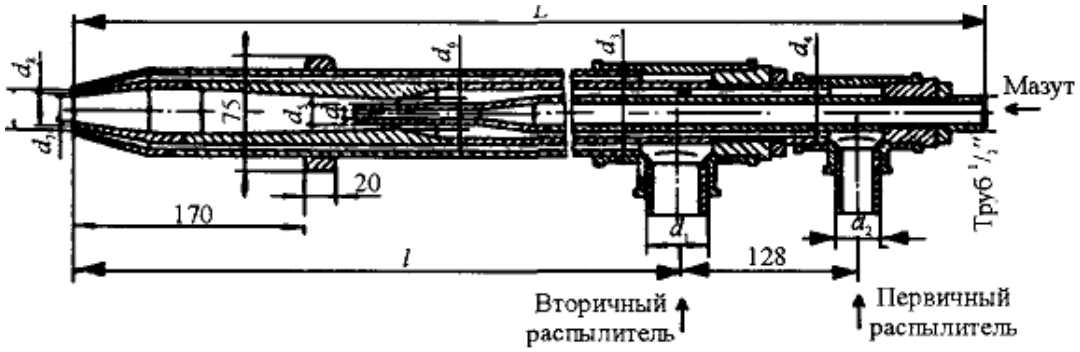


Рисунок 65. Форсунка высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД

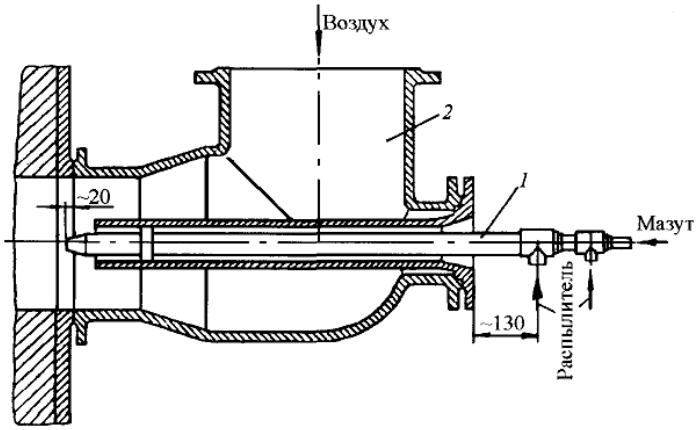


Рисунок 66. Форсунка высокого давления с двойным распиливанием типа ФВД в форсуночной коробке: 1 - форсунка; 2 - форсуночная коробка



Рисунок 67. Пропускная способность по мазуту форсунок высокого давления с двойным распыливанием типа ФВД

Таблица 35. Конструктивные размеры форсунок типа ФВД [15]

Обозначение форсунки	Номинальная пропускная способность по мазуту, кг/ч	d	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	L	l	Масса форсунки, кг
ФВД-100	100	3,0	½"	½"	1½"	1"	10	10,8	12	16	17	1270	1050	10,2
ФВД-150	150	3,8	¾"	½"	1½"	1"	10	11,3	15	19	20	1270	1050	10,2
ФВД-200	200	4,3	¾"	½"	1½"	1"	10	11,7	17	21	22	1270	1050	10,2
ФВД-300-1	300	5,3	1"	¾"	2"	1¼"	10	12,5	21	25	26	1270	1050	12,9
ФВД-300-11	300	5,3	1"	¾"	2"	1¼"	10	12,5	21	25	26	1470	1250	14,8
ФВД-400-1	400	6,0	1"	¾"	2"	1¼"	10	13,0	24	28	29	1270	1050	12,9
ФВД-400-11	400	6,0	1"	¾"	2"	1¼"	10	13,0	24	28	29	1470	1250	14,8
ФВД-500	500	6,8	1¼"	1"	2"	1¼"	13	16,0	27	31	32	1470	1250	14,9
ФВД-600	600	7,5	1¼"	1"	2"	1¼"	13	16,5	29	33	34	1470	1250	14,9

* Кроме указанных особо.

В термических печах обычно применяются газомазутные горелки. Они могут работать на мазуте и газе по отдельности и имеют более короткий и менее жесткий факел. Их можно применять и в небольших печах при малой единичной пропускной способности. При работе горелки на мазуте компрессорный воздух подается в горелку по газовой трубе и через тангенциальные отверстия попадает в акустический излучатель, где создает вихревые потоки. Это улучшает распыление мазута, интенсифицирует процессы перемешивания топлива с воздухом и горения. Кроме того, создающиеся в нем вихревые потоки имеют разрежение по оси, что препятствует закоксовыванию мазутного сопла.

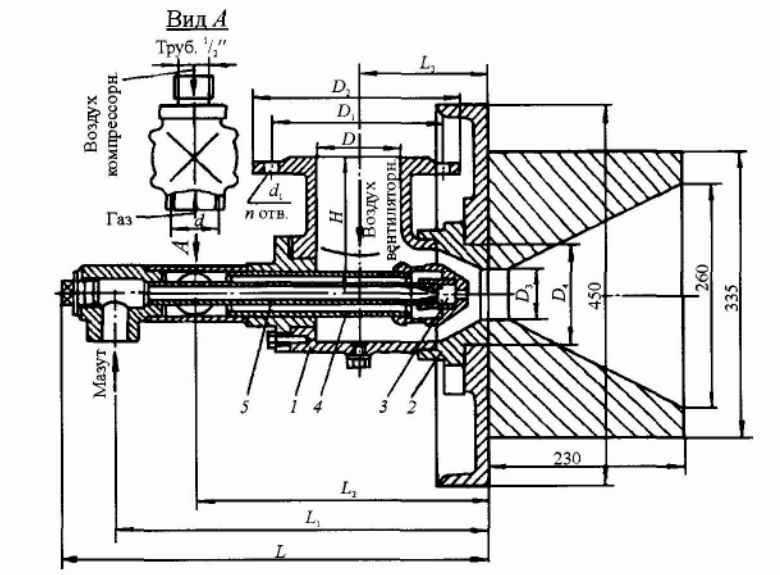


Рисунок 68. Газомазутная горелка типа КГМГ. 1- насадка, 2- акустический излучатель, 3- газовая труба, 4- корпус, 5- мазутная труба.

Расчет комбинированных горелок

Расчетное количество газа определяют по формуле:

$$V_г^{расч} = V_{ог} K_t$$

где поправку на температуру K_t вычисляют по формуле:

$$K_t = \sqrt{\frac{T_г + 273}{273}}$$

Расчетное количество мазута:

$$Вм = V_{ог} \frac{(Q_н^P)_г}{(Q_н^P)_м}$$

Где $Q_н^P$ -низшая удельная теплота сгорания газа и мазута соответственно.

Далее по номограммам и таблицам выбирают марку горелки.

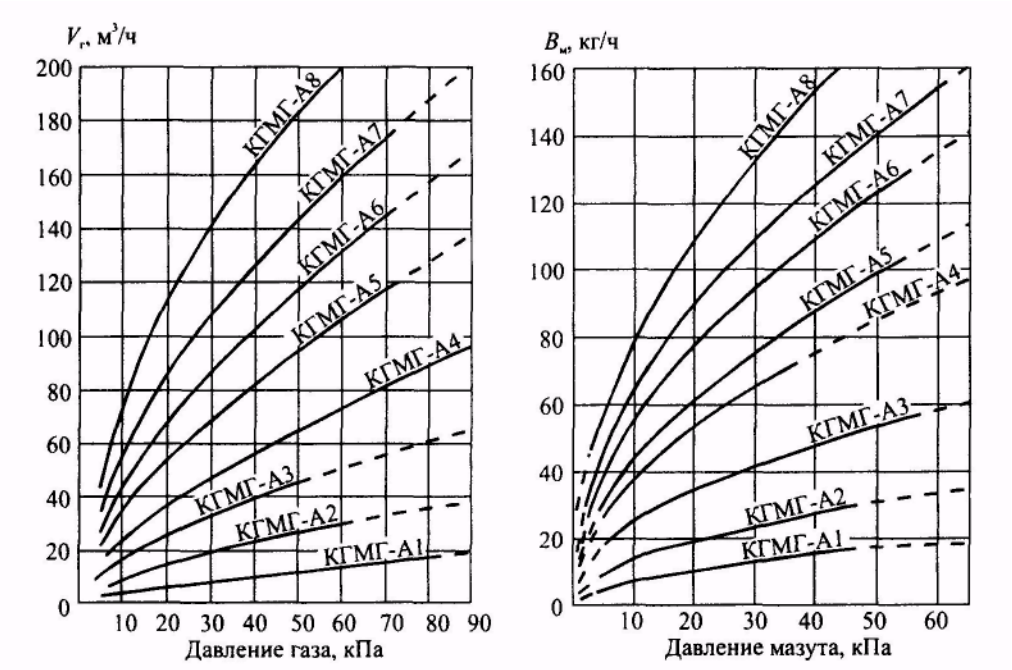


Рисунок 69. Пропускная способность по газу и мазуту горелок типа КГМГ

Таблица 36. Конструктивные размеры газомазутных горелок типа КГМГ-А[15]

Обозначение горелки	Номинальная пропускная способность по газу, м³/ч	D	D_1	D_2	D_3	D_4	d	d_1	H	L	L_1	L_2	L_3	Число отверстий n	Масса, кг		
															горелки	горелочной плиты	горелочного камня
КГМГ-А1	15	65	130	160	40	75	1"	13	100	320	280	218	100	4	7,5	26,5	37,5
КГМГ-А2	25	80	150	185	48	90	1"	17	100	390	350	278	136	4	13,6	26,0	37,5
КГМГ-А3	50	90	170	205	60	120	1"	17	120	403	372	300	155	4	24,0	25,4	37,5
КГМГ-А4	75	120	200	235	70	130	1"	17	140	437	397	325	165	4	23,3	25,0	37,0
КГМГ-А5	100	130	200	235	80	140	1"	17	150	476	436	359	190	8	25,0	27,2	37,0
КГМГ-А6	125	140	225	260	90	150	1"	17	160	491	451	374	200	8	28,4	26,9	37,0
КГМГ-А7	150	160	225	260	100	160	1"	17	190	511	471	394	210	8	36,0	30,5	40,0
КГМГ-А8	200	180	255	290	115	180	1¼"	17	220	555	515	432	230	8	42,0	30,0	40,0

* Кроме указанных особо.

12. Термическая обработка с индукционным нагревом

Сущность индукционного нагрева заключается в помещении заготовки или детали в переменное магнитное поле проводника, по которому пропускают ток промышленной или повышенной частоты. Вследствие электромагнитной индукции в детали возникает вихревой ток (ток Фуко), который её нагревает. Магнитные материалы нагреваются также теплом, выделяющимся при

перемагничивании заготовки. Количество выделившегося тепла (Q), можно вычислить по формуле Джоуля–Ленца:

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

где I – сила тока, А; R – электрическое сопротивление материала заготовки, Ом; τ – время нахождения детали в переменном магнитном поле индуктора, с.

Количество тепла и, следовательно, температуру и скорость нагрева можно регулировать изменением силы тока I. Индукционные токи, возникающие в детали, оттесняются к её поверхности (рис 69). У поверхности детали плотность вихревого тока i_x максимальна и убывает по мере приближения к центру детали по экспоненциальному закону (поверхностный эффект):

$$i_x = \frac{I_0}{e^{x/\delta}}$$

где i_x – плотность индукционного тока на глубине x от поверхности детали, А/см^2; i_0 – плотность тока на поверхности детали, А/см^2; e – основание натурального логарифма (e = 2,718); x – расстояние от поверхности детали, см; δ – глубина проникновения вихревого тока в металл, см

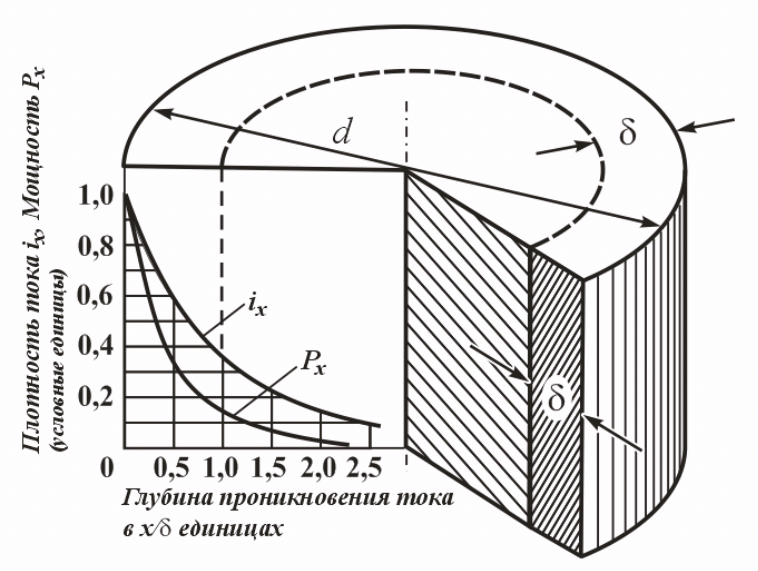


Рисунок 70 . Плотность ТВЧ тока i_x и поглощаемая деталью мощность P_x как функция расстояния от поверхности детали

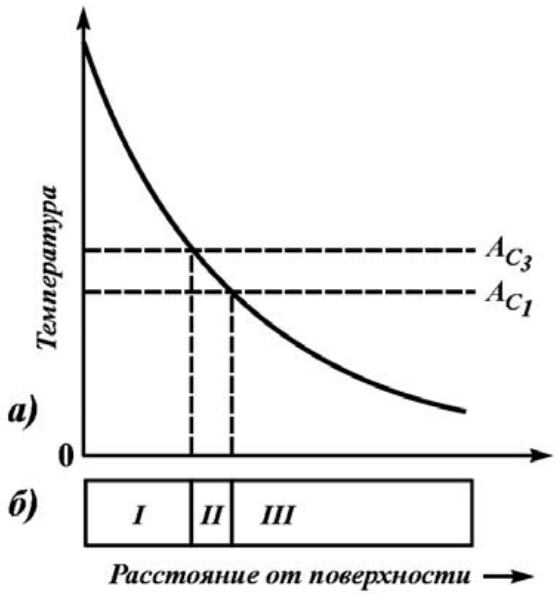


Рисунок 71. Распределение температуры по сечению детали при поверхностной закалке (а) и зоны доэвтектоидной стали после закалки (б): I – полная закалка; II – неполная закалка; III – незакалённая зона с сохранившейся исходной структурой

Преимущества индукционного нагрева:

1. передача энергии осуществляется непосредственно в нагреваемое тело, что позволяет значительно увеличить скорость нагрева;
2. более высокая твердость и малое окисление поверхности детали;
3. максимальный уровень температур нагрева лимитируется в основном только применяемыми огнеупорными материалами;
4. максимальная мощность выделяется в поверхностном слое нагреваемого изделия, позволяя получить ее высокую твердость при сохранении относительно вязкой сердцевины (рис.71);
5. быстрота и экономичность по сравнению с другими методами поверхностного упрочнения;
6. передача энергии в нагреваемое тело при индукционном нагреве не требует контактных устройств, что значительно упрощает конструкцию оборудования;
7. высокая производительность труда, хорошие санитарно-гигиенические условия производства;
8. в индукционных плавильных печах возникающие при передаче энергии в

расплав электродинамические усилия способствуют циркуляции расплава в объеме тигля, что позволяет получать металл со стабильными и однородными свойствами.

Недостатки индукционного нагрева:

1. большая дефектность поверхностного слоя вследствие высокой скорости нагрева;
2. нерациональность применения для единичного и мелкосерийного производства вследствие высокой стоимости индивидуальной технологической оснастки;
3. низкий КПД установок при нагреве изделий сложной формы (10-20 %);
4. сложность обеспечения равномерности нагрева изделий;
5. сложность применения индукционных установок для низкотемпературного нагрева.

Индукционный метод нагрева проводниковых материалов применяют для:

- плавки металлов;
- сквозного нагрева заготовок перед пластической деформацией (ковкой, штамповкой, прессованием, прокаткой и т. д.);
- термической обработки;
- химико-термической обработки;
- сварки металлов;
- пайки и наплавки и т. д.

По цели нагрева индукционные установки подразделяют на:

1. нагревательные (объемного нагрева);
2. закалочные (поверхностного нагрева);
3. плавильные;
4. специализированные.

Методы обработки деталей с индукционном нагревом.

1. *Метод единовременной закалки*, при котором происходит одновременный нагрев и охлаждение всей поверхности детали (рис 72) . При одновременной закалке для нагрева крупных деталей требуется генератор большой мощности, поэтому этот способ применяют в основном при термической обработке небольших деталей - мелкомодульных шестерён, валиков, втулок и др. деталей малого сечения, а также при местной закалке части детали. Обычно при такой закалке ширина закалённой полосы детали оказывается примерно на 10 - 20 % меньше высоты индуктора, чем и руководствуются при выборе высоты индуктирующего провода.

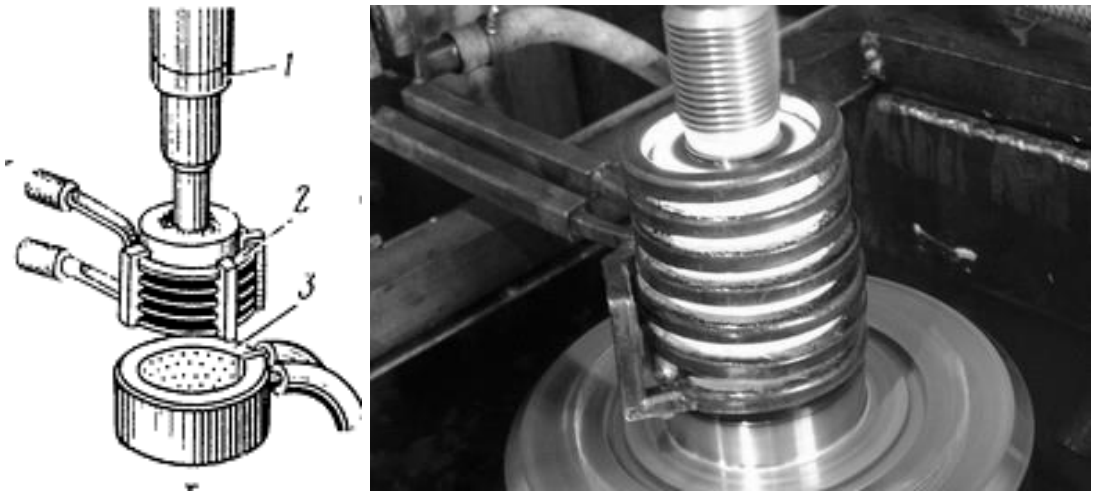


Рисунок 72. Закалка валика с единовременным нагревом. 1- деталь, 2- индуктор, 3- спреер

2. *Метод последовательной закалки* отдельных участков деталей. Этот метод применяют в тех случаях, когда мощность генератора не позволяет производить одновременный нагрев всех элементов детали. Закалку осуществляют путём последовательного нагрева и охлаждения отдельных частей детали (рис.73)

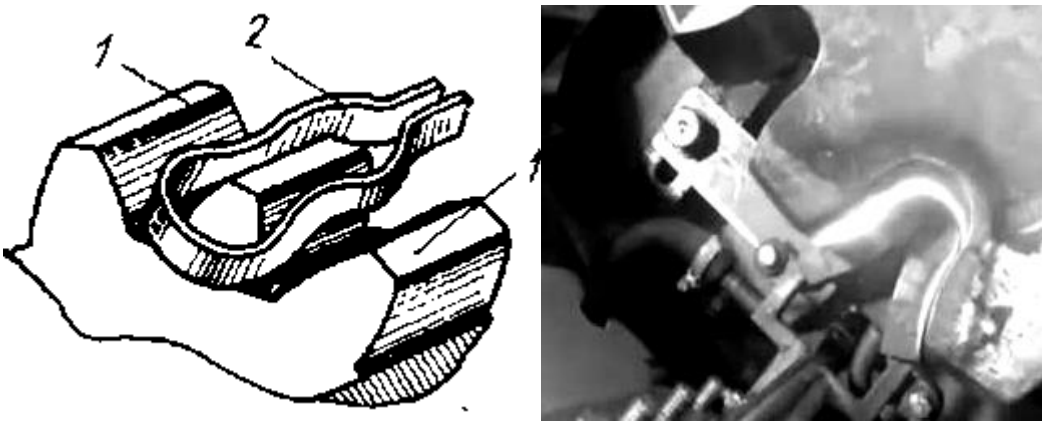


Рисунок 73. Последовательная закалка шестерни 1- зуб шестерни, 2- индуктор

3. *Метод непрерывно-последовательной закалки* изделий большой длины и одинакового сечения по всей длине (валы, трубы, профили т.д.) при непрерывном движении изделия относительно индуктора (рис 74). Такой способ позволяет осуществлять закалку крупногабаритных изделий при небольшой мощности генератора, в связи с чем, его широко применяют при термической обработке деталей металлургического и горнорудного оборудования. Непрерывно-последовательным способом осуществляют закалку крупных валов и других деталей. Высоту индуктора, определяющую ширину нагреваемой поверхности детали, здесь выбирают в зависимости от мощности генератора.

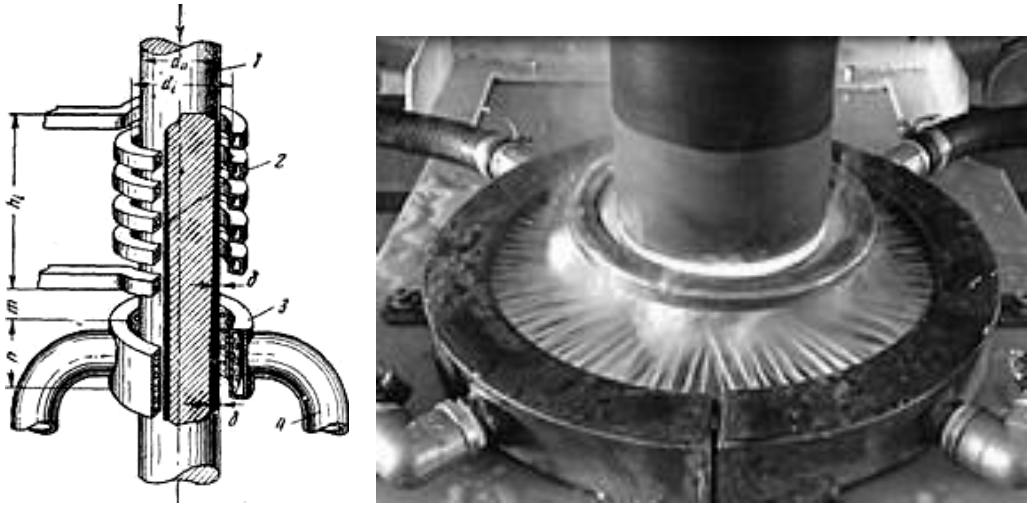


Рисунок 74. Непрерывно-последовательная закалка.1- деталь, 2- индуктор, 3- спреер. 4 - водоподводящая трубка

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

5. *Метод закалки под водой,* отличающийся тем, что индуктор и нагреваемую деталь погружают в воду, где производится нагрев. Это позволяет достичь более высокой скорости охлаждения, закаливать труднодоступные места, т.к. индуктор не требует охлаждения, применять в качестве охлаждающих сред горючие материалы и получать блестящие поверхности. Однако КПД таких установок очень низок, кроме того этим методом сложно обрабатывать большие поверхности.

Индукционный нагрев металла происходит в индукторе, который является одним из основных элементов высокочастотной установки и в значительной мере определяет КПД установки и толщину закалённого слоя. Основная часть индуктора - индуктирующий провод. Обычного его изготавливают из медной трубки круглого или прямоугольного сечения, внутри которой с целью охлаждения пропускают проточную воду (рис 75). Форма индуктора определяется конфигурацией детали. При малой длине обрабатываемого участка применяют одновитковые индукторы, при значительной длине – индукторы спирального типа (рис 76). По способу закалки индукторы делятся на два основных типа: для одновременного и для непрерывно-последовательного нагрева. Характерными размерами индуктора являются ширина Н индуктирующего провода, его толщина В и зазор между рабочей поверхностью индуктора и нагреваемой деталью. При одновременном нагреве ширина индуктирующего провода зависит от требуемой ширины закаленного слоя. Если нагревается участок на поверхности, то ширина индуктора Н делается на 10- 20 % больше ширины заготовки. Толщина стенок индуктора, постоянно охлаждаемого водой, составляет 1,5 - 2 мм. При спрейерной закалке, когда вода в трубки поступает

только в момент охлаждения детали (рис 77), толщина стенок активной части индуктора обычно составляет 4 - 6 мм.

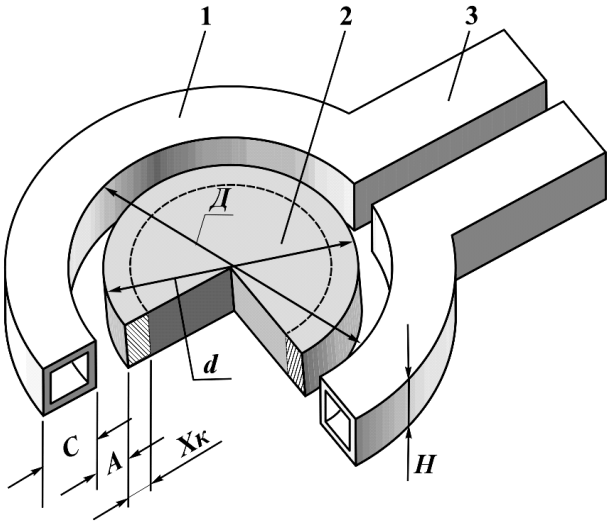


Рисунок 75. Схема одновиткового индуктора. 1 – индуктор, 2 – деталь, 3 – токоподводящая шина, Н – высота индуктора, С – ширина индуктора, А – воздушный зазор между деталью и индуктором, Хк – нагретый слой детали.

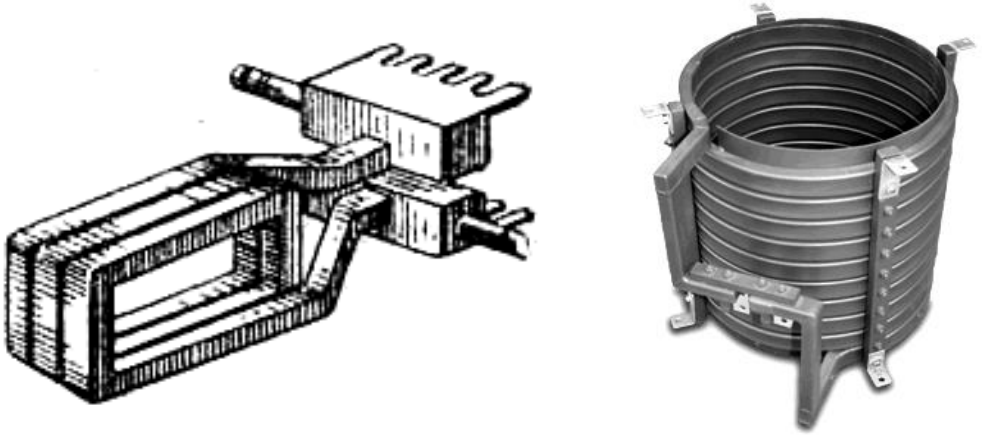


Рисунок 76. Многовитковые индукторы

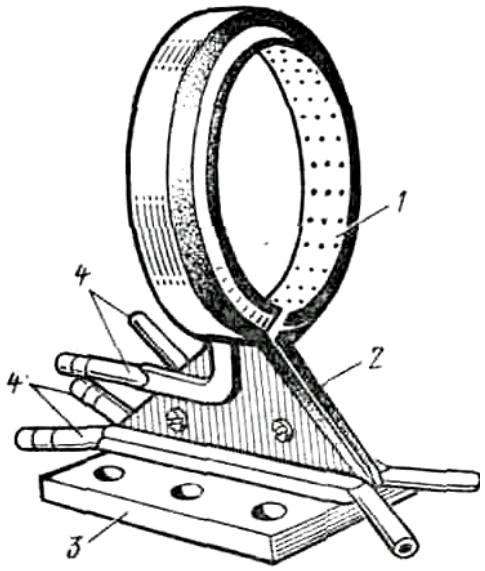


Рисунок 77. Индуктор для спреерной закалки наружных циллиндрических поверхностей 1- индуктирующий провод, 2 – токоподводящие шины, 3 контактная колодка, 4 – водоохлаждающие трубки

Источником питания в индукционном оборудовании являются преобразователи частоты различного типа, которые преобразовывают 3-фазный ток промышленной частоты и напряжения в однофазном требуемой частоты и напряжения. В настоящее время существуют три типа преобразователей частоты: машинные, ламповые и полупроводниковые (тиристорные или транзисторные).

По частоте питающего тока оборудование подразделяют на следующие группы:

а) оборудование промышленной частоты, питающееся от сети 50 Гц непосредственно или через специальные понижающие трансформаторы;

б) оборудование повышенной частоты (150 - 10000 Гц), питающееся от электромашинных преобразователей частоты;

в) высокочастотное оборудование (свыше 10000 Гц), питающееся от ламповых или полупроводниковых генераторов.

Область применения различных источников питания показана на рисунке 78.

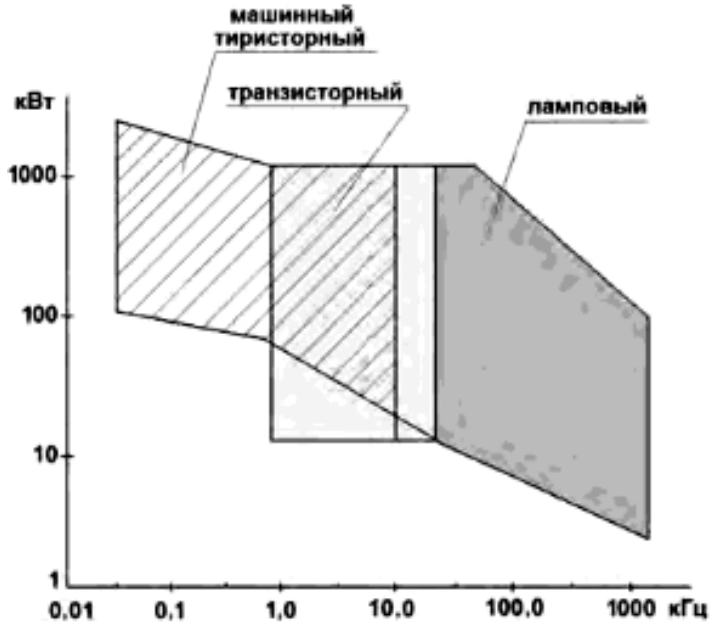


Рисунок 78 . Области применения различных типов преобразователей для технологий индукционной термообработки

Закалка осуществляется в закалочных установках, состоящих из:

- технологической оснастки для закрепления и перемещения деталей (или индуктора) и системы охлаждения детали;
- закалочной головки, состоящей из закалочного трансформатора и индуктора;
- конденсаторной батареи;
- системы автоматического и ручного управления технологическим процессом;
- источника питания с пусковой и коммутирующей аппаратурой.

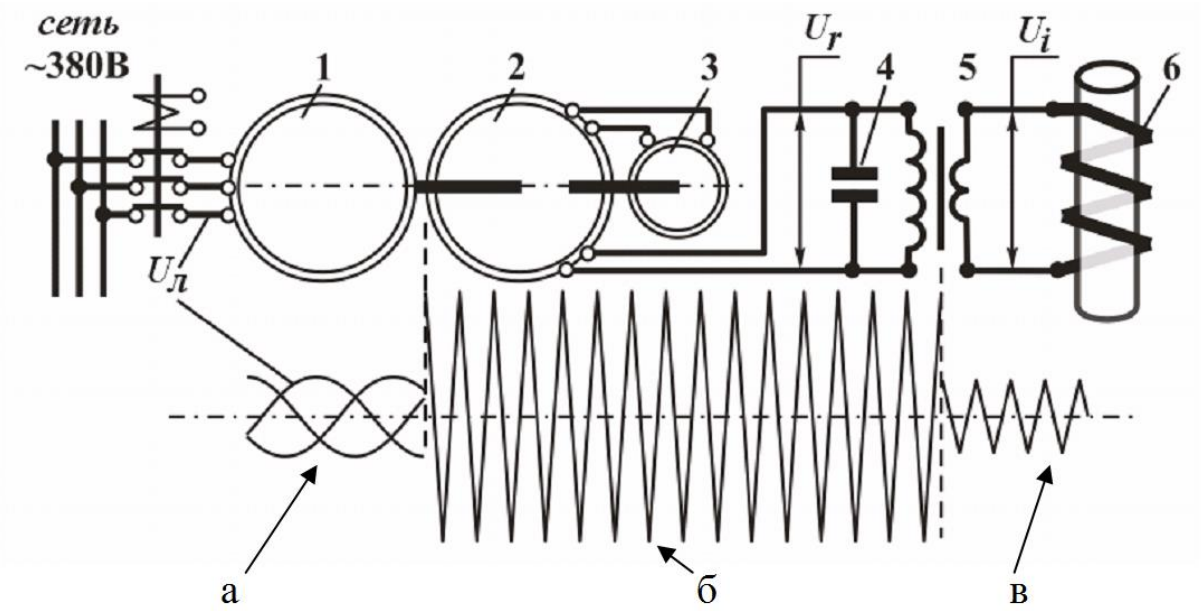


Рисунок 79. Скелетная схема индукционной установки с машинным генератором и 'последовательность преобразования тока. а - переменный ток промышленной частоты; б - переменный ток повышенной частоты высокого напряжения; в - переменный ток повышенной частоты низкого напряжения. 1 - двигатель, 2 - машинный генератор, 3 – возбудитель, 4 - конденсаторные батареи, 5 - понижающий трансформатор, 6 - индуктор.

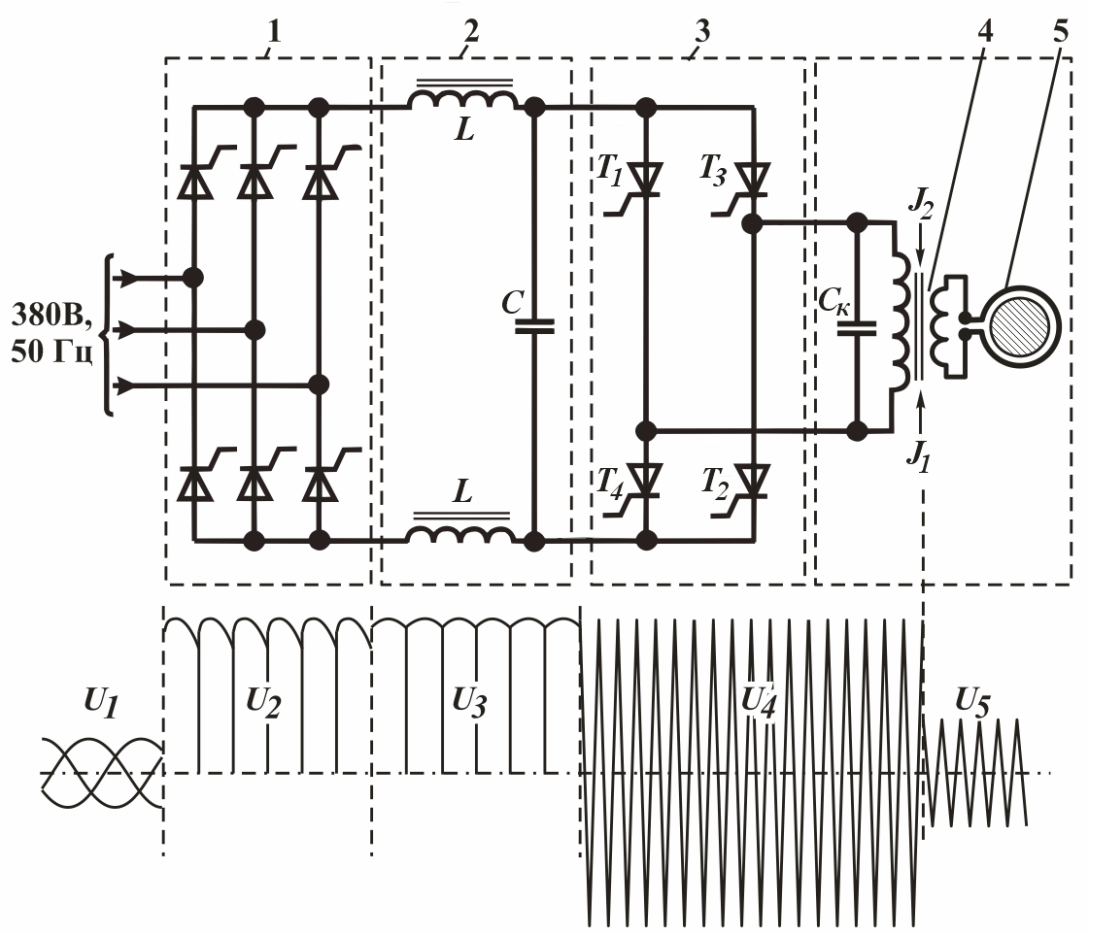


Рисунок 80. Схема установки с тиристорным преобразователем и диаграмма напряжений. U1 - переменный ток низкого напряжения промышленной частоты (50 гц); U2 - переменный ток высокого напряжения промышленной частоты (50 гц); U3 - постоянный ток высокого напряжения; U4 - переменный ток высокого напряжения высокой частоты; U5 - переменный ток низкого напряжения высокой частоты. 1- выпрямитель на управляемых тиристорах; 2- фильтр, 3- инвертор, 4 - трансформатор, 5 - индуктор

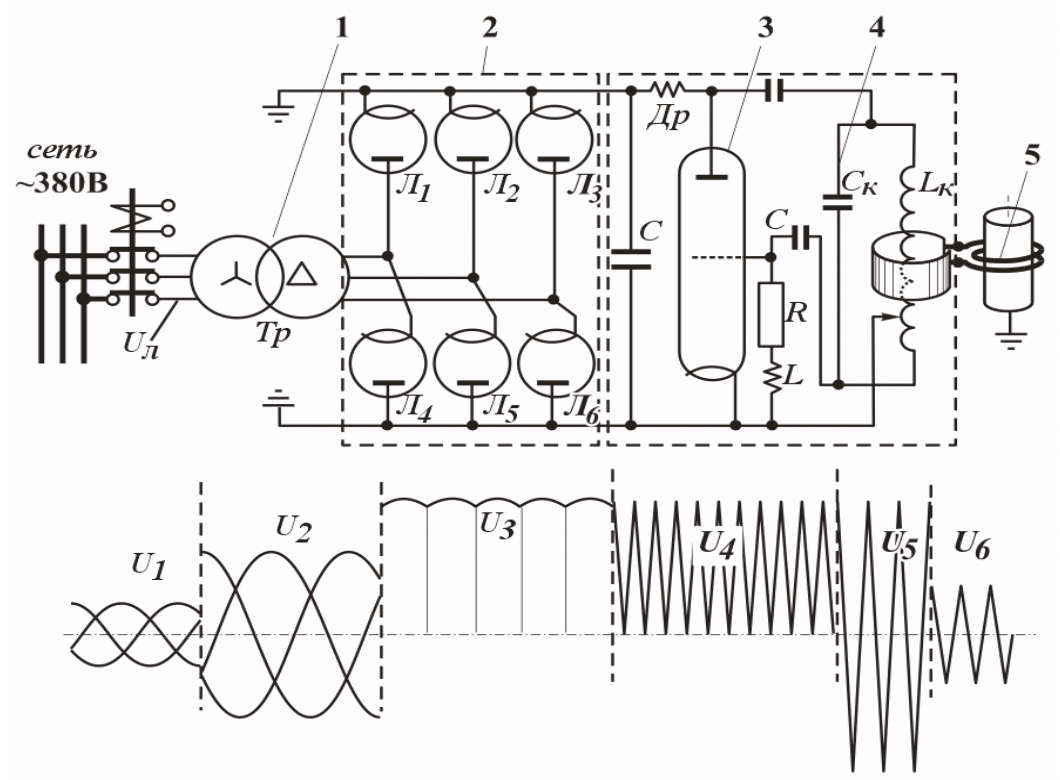


Рисунок 81. Скелетная схема индукционной установки с ламповым генератором. U1 - переменный ток низкого напряжения промышленной частоты (50 гц); U2 - переменный ток высокого напряжения промышленной частоты (50 гц); U3 - постоянный ток высокого напряжения; U4 - импульсы тока в анодной цепи генераторной лампы; U5 - переменный ток высокого напряжения высокой частоты; U6 - переменный ток низкого напряжения высокой частоты. 1 – повышающий трансформатор, 2 - выпрямитель с анодным трансформатором, 3 - генераторный блок, 4 -колебательный контур 5- индуктор.

В индукционных установках при средних частотах применяют машинные генераторы ТВЧ (рис 79). Двигатель1 вращает возбудитель3 генератора 2, которой генерирует переменный ток высокой частоты. Конденсаторная батарея 4 предназначена для компенсации реактивной мощности установки. Трансформатор 5 понижает напряжение до безопасного уровня 30 - 50 В и одновременно увеличивает силу тока до 5000- 8000 А. Обмотка трансформатора соединена с индуктором 6, генерирующим переменное магнитное поле. Машинные генераторы надежны и сравнительно просты в эксплуатации, что позволяет успешно использовать их для термической обработки в массовом производстве.

Установка с тиристорным преобразователем (рис. 80) состоит из выпрямителя 1 на управляемых тиристорах; фильтра 2, включающего индуктивность L и конденсатор С для сглаживания пульсации выходного напряжения выпрямителя; тиристорного инвертора 3, который преобразует постоянный ток в переменный заданной частоты. Индуктор 5 подключается через трансформатор 4. Тиристорные преобразователи имеют мощность 5 - 500 кВт и частоту 1000 - 60 000 Гц Полупроводниковые тиристорные преобразователи частоты по сравнению с машинными имеют более высокий КПД (на 10…15 %), меньшие габариты и возможность регулирования рабочей частоты. Однако менее надежны.

Установки ТВЧ с ламповым генератором обладают высокими показателями надежности, менее требовательны к выбору индуктора по сравнению с полупроводниковыми устройствами, однако они более громоздки и потребляют больше электроэнергии. В состав установки с ламповым генератором входят повышающий трансформатор 1, выпрямитель 2 с анодным трансформатором, генераторный блок 3, колебательный контур 4 и система управления (рис.81). Напряжение питающей сети повышается трёхфазным трансформатором до 8000 - 10 000 В. Затем это напряжение подаётся на газотронный выпрямитель 2, преобразующий переменный ток высокого напряжения в постоянный с напряжением. Выпрямленный ток поступает в ламповый генератор, работающий на самовозбуждение, с автотрансформаторной сетчатой связью, в котором постоянный ток высокого напряжения преобразуется в переменный ток высокой частоты напряжением. Высокочастотный трансформатор понижает напряжение и подает его . на индукторе 5 для нагрева под закалку.

Выбор установок для индукционного нагрева.

При объемном нагреве осуществляется нагрев поверхностного слоя, затем тепло за счет теплопроводности передается вглубь детали. Выбор частоты определяется соображениями достижения приемлемого электрического КПД при

высокой скорости нагрева. На практике для цилиндрического изделия (загрузки) частоту тока *f* выбирают в диапазоне [28]:

$$\frac{3\cdot 10^6 \rho}{d^2\cdot\mu} < f < \frac{6\cdot 10^6 \rho}{d^2\cdot\mu}$$

Где ρ –удельное электросопротивление материала детали; d- диаметр детали; μ – магнитная проницаемость поверхности детали

Для изделий с плоской поверхностью, нагреваемых с двух сторон

$$\frac{3\cdot 10^6 \rho}{b^2\cdot\mu} < f < \frac{6\cdot 10^6 \rho}{b^2\cdot\mu}$$

Где в - толщина детали.

Для поверхностной закалки основной целью является получение высокой твердости поверхностного слоя при сохранении вязкой сердцевины. При упрочнении стали это происходит за счет быстрого прогрева поверхностного слоя на глубину $b_к$ до заданной температуры нагрева, которая в свою очередь зависит от скорости нагрева. При медленном нагреве в печи температура нагрева под закалку закалки стали обычно составляет 760 - 870 °С, при скорости 250 °С/с нагрев под закалку до более высоких температур 780 – 920 °С, при скорости 500 °С/с температурный диапазон нагрева составляет 820 – 1020 °С. При индукционном нагреве температуру нагрева поверхности при расчете установок чаще всего принимают близкой к 900 ° С. Для получения стабильного высокого качества производят принудительное охлаждение поверхности детали спреерными устройствами. Частота тока при индукционной обработке *f* обычно выбирается в зависимости от глубины упрочненного слоя b_k

$$b_k = \frac{0,25}{\sqrt{f}}$$

Частоту тока можно так же выбрать в соответствии с рекомендациями (таблица 37).

Таблица 37. Оптимальная частота для сквозного нагрева стальных изделий, Гц

Диаметр или толщина, мм	Частота при нагреве, Гц

	Ниже точки Кюри	Выше точки Кюри
5-10	2500	100000 -200000
10-25	1000	100000 -200000
25-40	1000	8000
40-50	50	2500
50-160	50	1000
Более 160	50	50

.

13. Устройства электроконтактного нагрева

В устройствах электроконтактного нагрева нагрев происходит вследствие протекания по поверхности детали тока большой плотности (до 400 А/мм^2) [29]. В связи с малым сопротивлением материала изделия для его нагрева напряжение понижают до 4 - 20 В, при этом сила тока превышает 10^3 А. Основные части установки электроконтактного нагрева - понижающий трансформатор и контактное устройство, состоящее из медных электродов. Питание установок осуществляется переменным током частотой 50Гц при напряжении 220 или 380 В. Электроконтактные устройства могут быть периодического действия (ток подводят через неподвижные контакты к неподвижному изделию) и непрерывного действия. В этом случае ток подводят через скользящие, вращающиеся или жидкостные контакты к непрерывно движущемуся изделию.

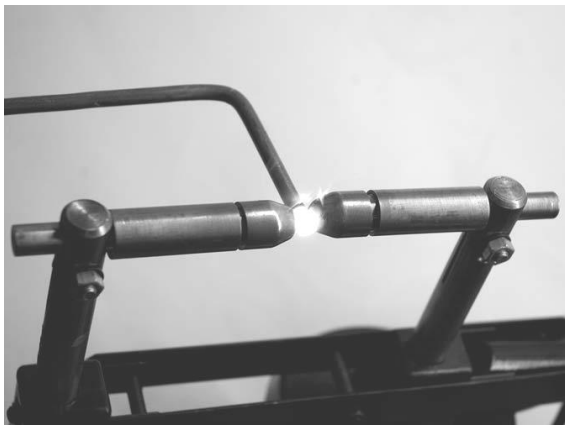


Рисунок 82. Установка электроконтактного нагрева проволоки

Достоинства электроконтактного нагрева:

1. высокая скорость нагрева (до 1000 град /сек);
2. простота встраивания в поточные линии;
3. возможность локальной термической обработки;
4. малое окисление и обезуглероживание поверхности;
5. температура нагрева лимитируется материалами детали и контактной группы;
6. высокий КПД.

Недостатки электроконтактного нагрева:

1. локальный разогрев в месте присоединения контактной группы (до возникновения электродуги);
2. неравномерность при нагреве деталей разного сечения и сложной формы. Если деталь имеет переменное сечение по длине, то равномерный нагрев осуществляется путем секционного подвода тока к различным участкам детали;
3. способ не применим для нагрева диэлектриков;
4. образование отпущенных полос на стыках мест нагрева при непрерывной обработке.

Способ электроконтактного нагрева применяют в основном для тепловой обработки изделий, имеющих одинаковое сечение по длине. Для расчета установок, используемых в машиностроении для нагрева стальных заготовок, чаще применяется полуэмпирическая методика расчета. Время нагрева заготовки при средней удельной теплоемкости определяют по формуле:

$$\tau_н = \frac{m \cdot c \cdot (tк - tн)}{a}$$

где m - масса заготовки на погонный метр ее длины, С - средняя теплоемкость материала детали, а - средняя мощность, выделяющаяся на 1 м длины заготовки а= (17— 25)10^4 Вт; $t_к$ и $t_н$ - конечная и начальная температура нагрева.

14. Нагрев в электролите

При реализации этого метода используют явление нагрева катода в электролитической ванне, питающейся постоянным током при напряжении 200 - 300 В. На катоде (нагреваемой детали) выделяется водород, который образует на поверхности детали газовую оболочку, обладающую высоким электрическим сопротивлением и низкой теплопроводностью, что приводит разогреву поверхности детали. В качестве электролитов обычно применяют 5 - 10% водные растворы соды (Na_2CO_3) или поташа (KCO_3). Скорость нагрева изделий регулируют изменением состава и концентрации электролита, а также изменением напряжения и плотности тока. Температура электролита в ванне обычно составляет 50 - 70 °С. В электролитах можно осуществлять сквозной, поверхностный нагрев и местный нагрев изделий, а также их закалку. В этом случае после нагрева выключают питание установки и охлаждают изделия, не вынимая их из ванны.

15. Пламенный нагрев

Метод пламенной поверхностной закалки изделий заключается в нагреве поверхностного слоя толщиной 1- 6 мм до температуры закалки газокислородным пламенем при помощи специальных горелок и последующего охлаждения этого слоя водой, или водными растворами [17]. Пламенную поверхностную закалку широко при ремонте изделий и термической обработке крупногабаритных изделий. Иногда этот способ является единственным возможным методом поверхностного упрочнения крупных стальных деталей. Существующие способы пламенной поверхностной закалки подразделяются на циклические, при которых нагревается вся подлежащая закалке поверхность изделия, затем охлаждается при помощи разбрызгивателя и непрерывные, когда горелка и изделие перемещаются относительно друг друга, а прикрепленный к горелке разбрызгиватель непрерывно закаливает нагретую поверхность изделия. В свою очередь среди циклических способов пламенной поверхностной закалки можно выделить

стационарный способ и способ быстрого вращения. При стационарном способе поверхность неподвижной детали нагревается неподвижной горелкой, затем охлаждается водой При реализации способа быстрого вращения поверхность вращающейся детали нагревается неподвижной горелкой, а затем охлаждается водой.

Для непрерывной пламенной поверхностной закалки существуют так же существуют различные технологические приемы, среди которых можно выделить:

- плоско-поступательный способ. Горелка и разбрызгиватель перемещаются на некотором расстоянии друг от друга (или деталь относительно них);
- спирально-поступательный способ. Горелка и разбрызгиватель перемещаются прямолинейно параллельно оси вращающейся цилиндрической детали.

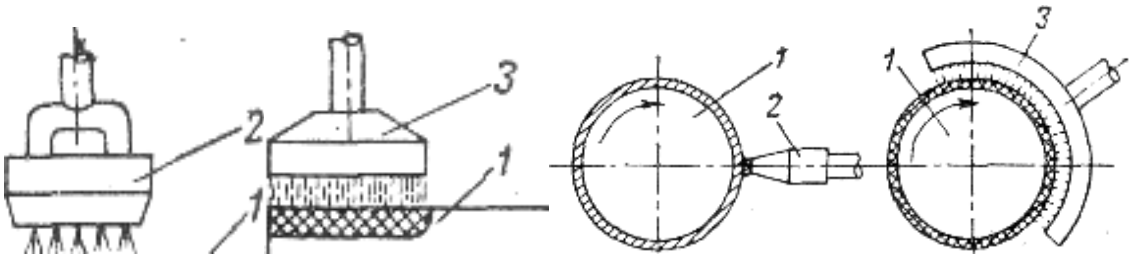


Рисунок 83. Циклические способы поверхностной закалки плоских и цилиндрических поверхностей. 1- обрабатываемая деталь, 2- горелка, 3- охлаждающая форсунка

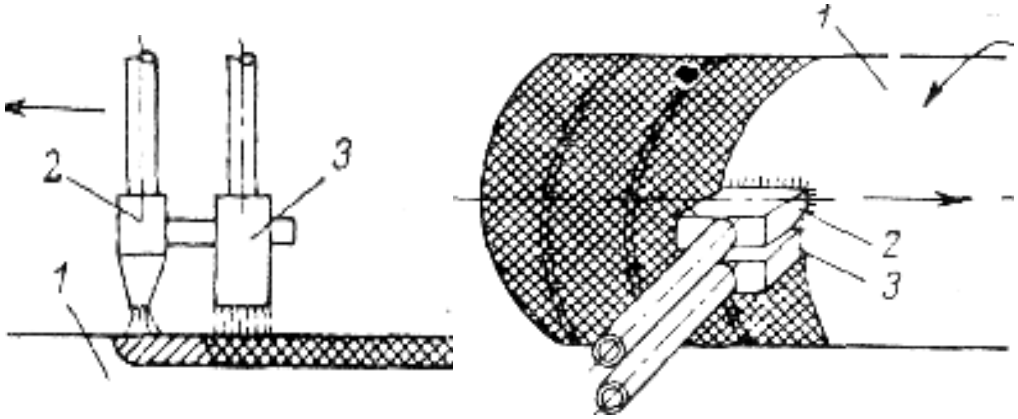


Рисунок 84. Непрерывные способы поверхностной закалки плоских и цилиндрических поверхностей. 1- обрабатываемая деталь, 2- горелка, 3- охлаждающая форсунка

Достоинствами пламенного нагрева являются простота, возможность локальной термической или химико-термической обработки, а так же возможность обработки при отсутствии внешних источников энергоснабжения (ремонтные технологии). Недостатки пламенного нагрева связаны со сложностью регулировки и контроля параметров процесса и соответственно низким качеством термической обработки, сильным окислением поверхности деталей и сложностью нагрева массивных изделий. Для закалки с нагревом газо-кислородным пламенем в ремонтных цехах обычно используют обычные сварочные горелки с набором наконечников (рис.85). В массовом производстве для газопламенного нагрева используются специализированные установки.

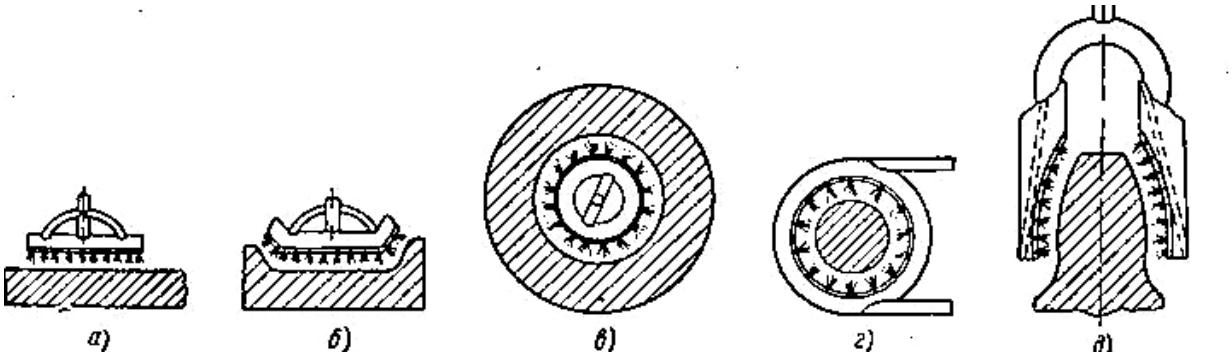


Рисунок 85. Формы наконечников на газовые горелки. а- плоский, б- для тавровых профилей, в- для внутренних отверстий, для циллиндрических деталей, д- для шестерен.

16. Плазменный нагрев

Низкотемпературная плазма это газообразное вещество, содержащее положительно и отрицательно заряженные частицы - ионы и электроны. Устройства, позволяющие получать плазму, называют плазмотронами. По своему назначению плазмотроны могут быть разделены на два типа [30]: плазмотроны, в которых дуга горит между электродами внутри плазмотрона (струйные); плазмотроны, в которых дуга горит между электродом в плазмотроне и анодном пятном на изделии (плавильные). Плазмотроны применяют для высокотемпературного нагрева (в пределах 2000 - 6000 К). Обычно в качестве плазмообразующего газа используется аргон, но в зависимости от требований технологий состав газа может меняться и использоваться кислород, воздух, азот, аргон, водород, метан и другие газы и их смеси. Струйные плазмотроны, могут быть разделены на две группы, отличающиеся способом стабилизации дуги: плазмотроны с продольно обдуваемой дугой (линейные) и плазмотроны с поперечно обдуваемой дугой (коаксиальные). В линейных плазмотронах стабилизация дуги осуществляется газовым вихрем, образующимся благодаря тангенциальному вводу плазмообразующего газа в вихревую камеру, откуда вихревой поток входит в зону горения дуги, стабилизируя ее вдоль оси потока. Наиболее широко используются одно - и двухкамерные линейные плазмотроны. При включении плазмотрона между его электродами каким-либо способом (например, высокочастотным осциллятором) возбуждается дуга. Газовый поток выдувает дугу из межэлектродного промежутка и вытягивает ее вдоль оси выходного электрода. Опорное пятно дуги в цилиндрическом электроде в результате вращения радиального участка столба газовым вихрем перемещается по поверхности водоохлаждаемого электрода и тем самым предохраняет его от быстрого разрушения. Для увеличения частоты вращения дуги используется магнитное поле создаваемое катушкой. Длина дуги в плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги (рис.86) определяется расходом газа и током (с ростом тока длина дуги уменьшается). Эти плазмотроны имеют падающие вольтамперные характеристики. Существенным недостатком

плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги является ограничение мощности дуги и температуры нагреваемого газа вследствие «явления шунтирования» - пробоя газового промежутка между столбом дуги и стенкой электрода. С ростом силы тока длина дуги уменьшается, так как пробой наступает быстрее. Аналогичный эффект имеет место при увеличении температуры газа. Для уменьшения разрушения материала катода применяют двухкамерные плазмотроны, в которых магнитные катушки меняют положение пятна контакта на цилиндрических электродах (рис 87). Применяются так же схемы плазмотронов с фиксированной длиной дуги. Наиболее распространенной является схема плазмотрона со ступенчатым выходным электродом (рис. 88).

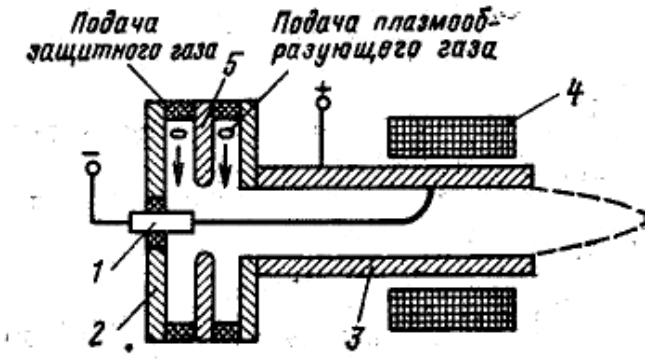


Рисунок 86. Однокамерный плазмотрон с торцесым вольфрамовым катодом. 1- катод, 2- вихревая камера, 3- анод, 4 –магнитная катушка, 5- диафрагма.

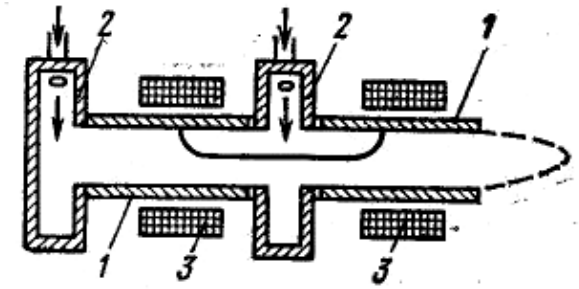


Рисунок 87. Двухкамерный плазмотрон. 1- электроды, 2- вихревая камера, 3- магнитная катушка

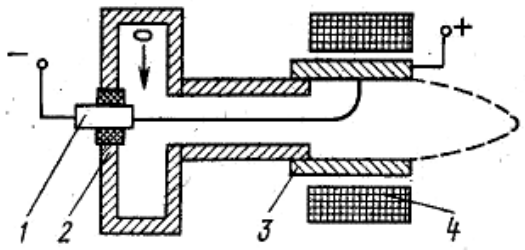


Рисунок 88. Плазмотрон со ступенчатым выходным электродом. 1- катод, 2- вихревая камера, 3- анод, 4- магнитная катушка

К достоинствам плазменного нагрева можно отнести высокие скорости процессов, возможность получения высоких температур и малые габариты оборудования. Недостатками плазменного нагрева являются малый КПД, быстрое разрушение материала катода и сложность контроля температурного режима нагреваемого изделия. Вследствие вышеуказанных достоинств и недостатков основные области применения плазменного нагрева это плавильные печи, сварочные установки и установки напыления покрытий.

17. Оборудование для обработки холодом (криогенное оборудование)

Термическая обработка стали холодом целесообразна, если после закалки в структуре стали сохраняется значительное количество остаточного аустенита. Обычно такой вид тепловой обработки применяется для углеродистой стали при содержании углерода больше 0,6 % или для легированных сталей . Обработку стали при температурах ниже 0 °С целесообразно проводить для:

- повышения твердости и улучшения стойкости металлорежущего инструмента;
- повышения твердости и износостойкости цементованных деталей;
- повышения твердости нержавеющих инструментальных сталей мартенситного класса (например марок 40Х13, 95Х18);
- стабилизации размеров деталей шарикоподшипников, криогенной техники и измерительных инструментов;

- повышения магнитных свойств постоянных магнитов из углеродистых и легированных сталей;
- восстановления размеров изношенного измерительного инструмента (например, гладких калибров),
- для стабилизации размеров изделий из специальных сплавов, чугуна, стального и цветного литья.

Операция обработки холодом не является конечным этапом термической обработки закаленных деталей и после нее необходим традиционный отпуск изделий. Существуют различные способы охлаждения в область отрицательных температур. Наиболее применяемыми являются следующие способы.

1. Охлаждение за счет изменения агрегатного состояния вещества, сопровождающегося поглощением тепла (плавление, парообразование, возгонка, растворение).
2. Охлаждение за счет расширения сжатого газа с отдачей внешней работы, сопровождающегося понижением температуры.
3. Охлаждение за счет расширения газа путем дросселирования (эффект Джоуля - Томсона).

Рабочие тела холодильных машин называют холодильными агентами (хладагентами, таблица 38), которые делят на три группы.

1. Газы, воздух, кислород, азот и др. В газовых циклах холодильных машин рабочее тело (хладагент) не изменяет своего агрегатного состояния.
2. Пары жидкостей. Наиболее распространенными хладагентами являются вода, аммиак, сернистый ангидрид, углекислота, хлористый метил, фреоны и другие вещества. В паровых циклах жидкое рабочее тело превращается в пар, который затем конденсируется при более высоком давлении.
3. Растворы. Из растворов наиболее распространенным является водоаммиачный раствор.

Выбор хладагента определяется различным факторами: рабочей температурой; характером взаимодействия с водой и смазочными материалами; пожаро и

взрывобезопасностью; токсичностью; инертностью к деталям криогенной техники.

Таблица 38. Физические свойства рабочих тел криогенной техники

Рабочее тело	Химическая формула	Молекулярная масса m	Нормальная температура кипения t_s °С	Критическая температура $t_{кр}$ °С	Критическое давление $p_{кр}$		Температура затвердевания $t_з$ °С
					кн/см²	*ата*	
Вода	H_2O	18,016	+100,0	374,15	2,21	225,65	0,0
Аммиак	NH_3	17,031	— 33,4	132,4	1,13	115,2	— 77,7
Сернистый ангидрид	SO_2	64,06	— 10,08	157,2	0,79	80,28	— 75,2
Углекислота	CO_2	44,01	— 78,5	31,0	0,74	75,0	— 56,6
Хлорметил	CH_3Cl	50,49	— 23,74	143,1	0,67	68,09	— 97,6
Дихлорметан	CH_2Cl_2	84,94	+ 40,0	239,0	0,62	63,3	— 96,7
Ф-11	$CFCl_3$	137,39	+ 23,7	198,0	0,44	44,6	—111,0
Ф-12	CF_2Cl_2	190,92	— 29,8	111,5	0,40	40,86	—155,0
Ф-13	CF_3Cl	104,47	— 81,5	28,78	0,39	39,36	—180,0
Ф-14	CF_4	88,0	—127,8	—45,45	0,37	38,13	—184,0
Ф-21	$CHFCl_2$	102,93	+ 8,9	178,5	0,52	52,69	—135,0
Ф-22	CHF_2Cl	86,48	— 40,8	96,0	0,49	50,3	—160,0
Ф-23	CHF_3	70,01	— 82,2	—	—	—	—163,0
Этан	C_2H_6	30,06	— 82,6	32,1	0,49	50,3	—183,2
Пропан	C_3H_8	44,1	— 42,17	96,8	0,42	43,39	—187,1
Кислород	O_2	32	—182,97	—	—	—	—218,4
Азот	N_2	28	—195,8	—	—	—	—209,8
Воздух	—	—	—192	—	—	—	—

Холодильные установки, работающие с готовыми хладагентами.

Наиболее простыми являются холодильные установки, работающие с готовыми хладагентами. Они позволяют получать температуры от -10 до - 180 °С. Охлаждение изделий до низких температур достигается за счет испарения холодильного агента, вводимого при атмосферном давлении. В качестве холодильных агентов используют сжиженные газы, имеющие низкую температуру кипения (азот, кислород, воздух) или твердую углекислоту (сухой лед). Температуры до -75 °С получают при возгонке сухого льда, температуры в диапазоне от - 75 до - 180 °С получают при испарении сжиженных газов. Конструктивно установки изготавливают в виде термоизолированных сосудов, в которые загружаются детали и помещают хладагент. Самый простой способ охлаждения - это загрузка изделий непосредственно в хладагент, однако при этом

вследствие интенсивного испарения и кипения хладагента у поверхности температурное поле деталей может быть неравномерным, что приводит термическим поводкам деталей. Обычно для обеспечения равномерного охлаждения в качестве теплопроводящей применяют жидкие среды с высокими показателями теплопроводности и теплоотдачи - спирт, ацетон, бензин, керосин, которые в свою очередь охлаждают хладагентом в виде сжиженного газа, пропускаемого по змеевикам. Обычно в качестве хладагента используется жидкий азот, т.к. сжиженные газы - кислород и воздух взрывоопасны.

Холодильная установка, работающая с готовыми хладагентами (рис.87), состоит из емкости (танка) и холодильной камеры с оборудованием для подачи и отвода холодильного агента [12]. Танк помещен в железный кожух. Пространство 19 между кожухом и танком заполнено теплоизоляционным материалом. На верхней части 2 танка смонтирован щит 1 для измерительных и контролирующих приборов. Обрабатываемые изделия загружают в контейнер цилиндрической формы и помещают, в рабочую камеру холодильной установки. Рабочую камеру сверху закрывают крышкой 7 с защитной термоизоляцией 6. Крышка 7 поднимается с помощью рычажного подъемного механизма 5. Главной частью рабочей холодильной камеры является двустенный пустотелый цилиндр 11, изготовленный из алюминия и покрытый теплоизоляцией. Междустенное пространство закрыто теплоизолированной съемной кольцевой крышкой. Циркуляцию воздуха в рабочей камере обеспечивает вентилятор 4. В пространстве между внутренней стенкой рабочей камеры холодильной установки и контейнером с изделиями установлен основной спиральный охлаждающий змеевик 10 из медной трубы. Из испарителя 15 пары хладагента поступают в верхнюю часть танка, где вентилем 3 регулируют подачу хладагента в змеевик рабочей камеры. Внутрь танка входит также труба с вентилем для заливки хладагента и труба 18 для подачи сжиженного газа в холодильную камеру с косым срезом 14 вблизи днища танка и запорным вентилем 3.

Достоинствами установок, работающих с готовыми хладагентами, являются простота; высокая эксплуатационная готовность; низкая стоимость оборудования.

К их основным недостаткам можно отнести малый КПД; высокие эксплуатационные затраты; необходимость наличия устройств для хранения хладагентов и сложность использования в поточном производстве.

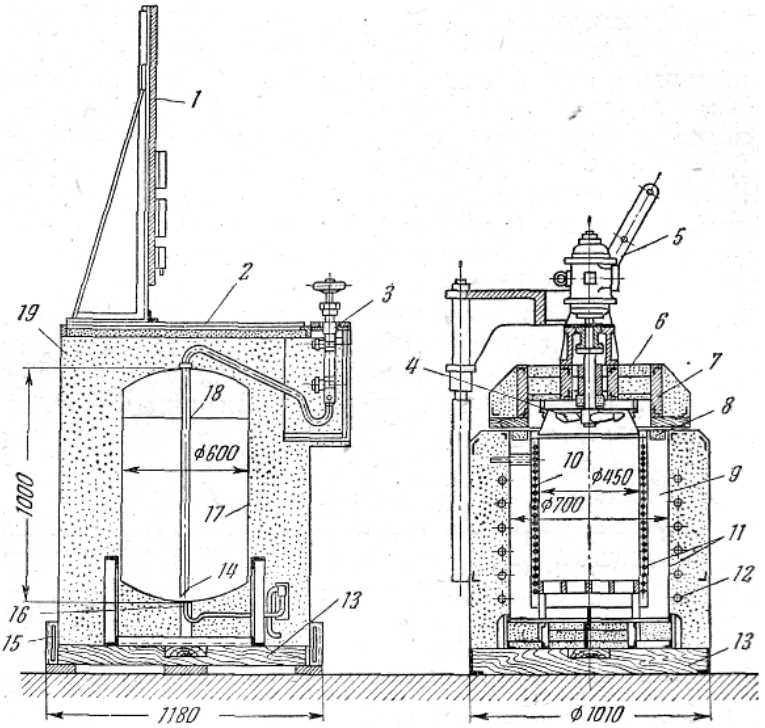


Рисунок 89. Холодильная установка, работающая на жидком азоте.

Холодильные машины замкнутого типа

Основной принцип работы холодильных машин замкнутого типа основан на сжатии паров хладагента, охлаждении и обращении их в жидкость с последующим испарением жидкости в змеевике рабочей камеры. Цикл работы машин состоит из следующих стадий (рис. 90).

- Из испарителя 2 компрессор отсасывает пары хладагента с низкой температурой и сжимает их. При сжатии температура паров повышается.
- Сжатые пары хладагента поступают в конденсатор 4, где их охлаждают водой (или другими охладителями), превращают в жидкость.
- Жидкий хладагент через регулирующий вентиль 3 поступает вновь в испаритель 2, где, превращаясь в пар, совершает необходимую работу (охлаждение рабочей среды).

- Пары хладагента вновь засасывает компрессор и сжимает их.
- Затем цикл повторяется

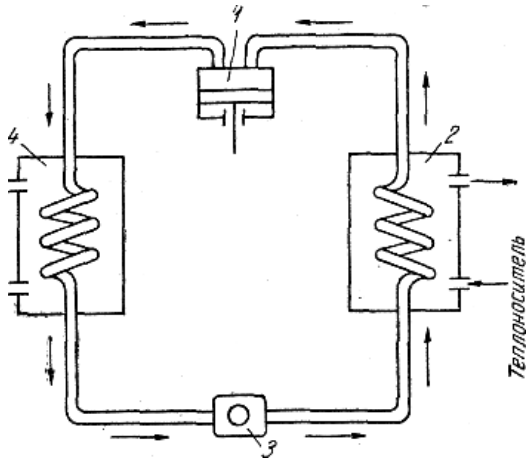


Рисунок 90. Схема однокаскадной холодильной машины. 1- компрессор, 2- испаритель; 3- регулятор, 4 –конденсатор.

Для получения температуры ниже -50 °С применяют двух-, трех- и многоступенчатое сжатие и охлаждение хладагента. Главной особенностью таких установок является применение разных хладагентов в отдельных каскадах (рис. 85).

Принцип действия каскадной холодильной машины заключается в последовательном сжижении двух газов с понижающимися температурами кипения. Например в верхнем каскаде применяют фреон 22 с температурой кипения – 40 °С, а в нижнем каскаде фреон 13 с температурой кипения - 81,5 °С. Цикл работы каскадной машины состоит из следующих стадий:

- из испарителя верхнего каскада компрессор К2 непрерывно отсасывает пары фреона-22 и сжимает их;
- сжатые пары поступают в конденсатор КР, где их охлаждают водой и сжижают;
- через регулирующий вентиль РВ1 жидкий фреон-22 поступает в испаритель верхнего каскада, где, превращаясь в пар, отнимает тело от конденсатора нижнего каскада и охлаждает его;

- компрессор К1 отсасывает из испарителя И нижнего каскада пары фреона-13 и сжимает их. Сжатые пары через промежуточный охладитель О поступают в конденсатор нижнего каскада, где их охлаждают и сжижают;
- жидкий фреон-13 через регулирующий вентиль РВИ поступает в испаритель И и, превращаясь в пар, отнимает тепло от охлаждаемой среды и охлаждает воздух в рабочем пространстве холодильной камеры;
- затем цикл в нижнем каскаде повторяется.

Холодильные машины замкнутого типа не требуют постоянного пополнения их хладагентами, поэтому более экономичны и удобны при непрерывном процессе глубокого охлаждения изделий, однако имеют высокую первоначальную стоимость, требуют высокой культуры эксплуатации, плохо переносят вибрации и ударные нагрузки.

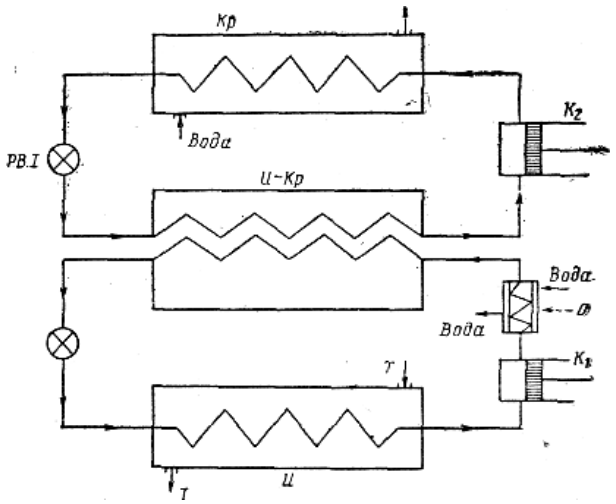


Рисунок 91. Схема двухкаскадной машины. К1 и К2 - компрессоры нижнего и верхнего каскада; И - испаритель; КР - конденсатор; И-КР - испаритель-конденсатор; РВ1 и РВИ - регулирующие вентили; О - охладитель до температуры окружающей среды; Т - теплоноситель

Воздушные холодильные машины

В зависимости от способа способы охлаждения в область отрицательных температур воздушные холодильные машины подразделяются на машины низкого давления (турбодетандерные с рабочим давлением до 5 атм.) и машины высокого давления (холодильные машины с дросселированием и рабочим

давлением до 200 атм.). Принцип работы турбодетандерной холодильной машины может быть описан следующим образом (рис. 90). Сжатый воздух поступает через кран 1 в один из рекуператоров 2. Затем его направляют через клапан 3 в турбодетандер 5, где температура воздуха понижается за счет совершения внешней работы. Охлажденный воздух направляют в рабочую камеру 4. В рабочей камере 4 температура воздуха снижается до заданной (до минус 100° С и ниже). При этом выходящий из рабочей камеры отработанный холодный воздух поступает во второй рекуператор, дополнительно охлаждает его набивку (металлическую стружку) и выбрасывается в атмосферу. При переключении воздушного потока сжатый воздух, поступающий в установку, дополнительно охлаждают холодом, накопленным в стружке рекуператора перед детандером. Работа рекуператоров регулируется автоматически переключателем 6. Температуру в рабочей холодильной камере регулируют, изменяя количество сжатого воздуха, подаваемого в турбодетандер. Достоинствами воздушных холодильных машин являются высокий КПД (60 - 70 %), экологичность, малая чувствительность к ударам и вибрации, простота встраивания в поточные линии. Недостатки воздушных холодильных машин связаны с необходимостью использования производительных компрессоров и предварительной осушке воздуха в системах масловлагоотделения.

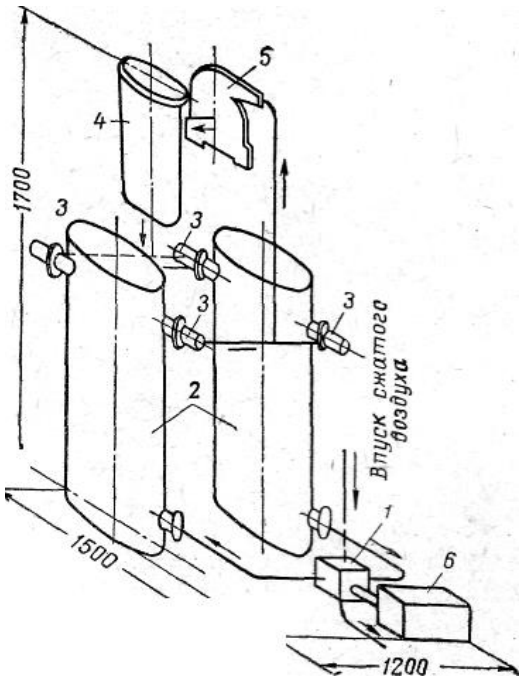


Рисунок 92. Схема турбодетандерной холодильной машины.

Расчет холодильных установок, работающих на принципе испарения сжиженных газов, основан на составлении уравнения теплового баланса:

$Q_х = Q_м+Q_п+Q_{из}+Q_{отв}+Q_{тр}+Q_{ак}+Q_{неучт}$

Где

$Q_х$- тепло, затрачиваемое на испарение хладагента;

$Q_м$- тепло, затраченное на охлаждение металла;

$Q_п$ – тепло, уносимое парами хладагента;

$Q_{из}$ – потери холода через тепловую изоляцию;

$Q_{отв}$- потери через открытые отверстия;

$Q_{тр}$ – потери на охлаждение транспортирующих устройств;

$Q_{ак}$ – аккумуляция холода тепловой изоляцией;

$Q_{неучт}$ – неучтенные потери.

Расчет каждого компонента уравнения теплового баланса производят по формулам, которые аналогичны для расчета термических устройств (см, п 10.1).

18. Дополнительное и вспомогательное оборудование

Дополнительное оборудование используется для проведения операций по улучшению качества изделий. Подразделяется на оборудование для: очистки, правки (рихтовки), промывки, вырезки образцов (для дальнейших контрольных операций).

18.1 Оборудование для очистки окалины

В зависимости от механизма воздействия на поверхность способы очистки подразделяют на несколько групп:

- механические способы;
- химические способы;
- электрохимические способы;
- термические способы.

Крацевание это обработка изделий при помощи металлических щеток. Крацевание осуществляют вручную, с использованием ручного электроинструмента или на специальных станках при помощи вращающихся щеток. Крацевание производится всухую или с применением жидкости (воды, соды, мыльных растворов и др.), в которой смачиваются щетки и обрабатываемые детали. Для крацевания твердых металлов - стали и чугуна применяют щетки, изготовленные из стальной проволоки диаметром 0,15- 0,2 мм. Для крацевания мягких цветных металлов используют щетки из латунной проволоки от 0,1 до 0,2 мм.

Шабровка это способ обработки для получения гладких, чистых и ровных поверхностей. Шабровка осуществляется ручными или механизированными инструментами - шаберами, имеющими острое заточенное лезвие, при помощи которого с изделия снимают тонкую стружку. При черновой шабровке толщина снимаемой стружки обычно составляет 0,05 - 0,02 мм, при чистовой шабровке - 0,02 - 0,01 мм. Шабровку обычно производят попеременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Это позволяет получать наиболее ровные

поверхности, без волнистости, которая неизбежно возникает при шабровке в одном направлении.

Шлифование. При отделке шлифованием в качестве режущего инструмента применяют войлочные или шлифовальные круги с абразивными зернами. Шлифование осуществляют вручную, при помощи электрических углошлифовальных машин или на специальных шлифовальных станках.

Галтование - это процесс очистки поверхности мелких изделий во вращающихся барабанах различного типа (роторных, консольных, герметичных, перфорированных, планетарных и т. д.) при помощи стальных шариков, конусов и т. п. При вращении барабана мелкие изделия и шарики непрерывно перемешиваются. При этом шарики ударами и трением об изделие сглаживают неровности и шероховатости на его поверхности. Для создания более чистой поверхности в барабан заливают растворы соды, мыла и др., которые смывают грязь и ускоряют процесс очистки. Размер шариков подбирают в зависимости от характера поверхности и формы изделий, подлежащих галтованию (обычно от 3 до 5 мм). Скорость вращения барабана задают от 60 до 200 оборотов в минуту. Продолжительность обработки составляет: 2 - 8 часов для латунных штампованных изделий; 10 - 15 часов для бронзовых литых изделий; 24 - 48 часов для изделий из ковкого чугуна; 70 - 80 часов для изделий из серого чугуна..



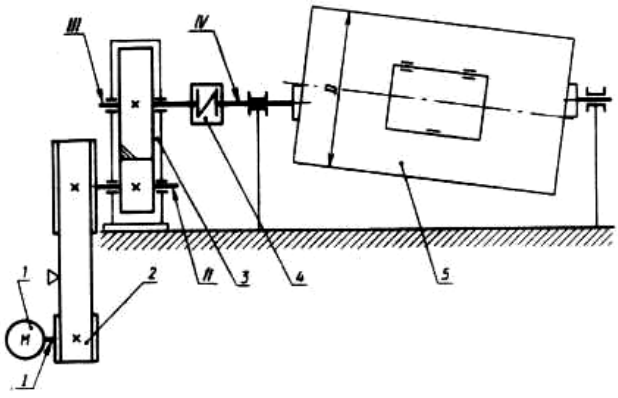


Рисунок 93. Галтовочные установки консольного типа и схема галтовочной установки барабанного типа 1-– двигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – цилиндрический редуктор; 4 – упругая муфта; 5 – галтовочный барабан.

Сильно загрязненные детали перед галтовкой обезжиривают или травят. Не рекомендуется этим способом обрабатывать тонкостенные изделия и изделия сложной формы ввиду их возможного механического повреждения

Пескоструйная и дробеструйная очистка производится путем воздействия высокоскоростной струи песка или дроби, направляемой на очищаемый объект. Струя создается сжатым воздухом (дробеструйная и пескоструйная обработка) или разгоняется быстровращающимися лопастными колесами (дробеметная и пескометная обработка). В дробеструйных и дробеметных установках поверхность деталей очищается струей стальной или чугунной дроби. По сравнению с пескоструйной дробеструйная обработка имеет следующие преимущества:

• дробь служит дольше песка и не требует сушки;

• на 10 -15% снижается расход сжатого воздуха;

• поверхность металла не только отделывается, но и упрочняется, наклепывается;

• аппаратура (сопло) изнашивается меньше.

Основным недостатком дробеструйной обработки по сравнению с обработкой песком является более низкое качество поверхности. В зависимости от размера дроби поверхностное упрочнение (наклеп) происходит на глубину 0,1-0,3 мм. Чем крупнее дробь, тем грубее фактура, получаемая в результате дробоструйной или дробеметной обработки. Дробеметные установки по сравнению с дробеструйными имеют более простую конструкцию и не требуют источников сжатого воздуха, однако менее надежны и долговечны (рис. 92). Ресурс работы лопаток и распределительного колеса у дробеметных установок в среднем составляет 30 - 50 часов. Установки дробеструйной обработки требуют наличия устройств подачи воздуха и герметизации рабочего пространства, однако более долговечны. Для защиты окружающей атмосферы обычно нагнетательная система делается двухкамерной (рис. 93) . Достоинства способов очистки дробью и песком:

- относительная простота;
- высокая производительность;

- совмещение очистки с пластической деформацией поверхности;
- совмещение операции очистки с операцией отделки.

Основными недостатками дробеструйной и дробеметной обработки являются:

- сложность очистки труднодоступных мест;
- шумность и вибрации;
- запыленность;
- сложность обработки изделий с низкой шероховатостью и жесткостью.

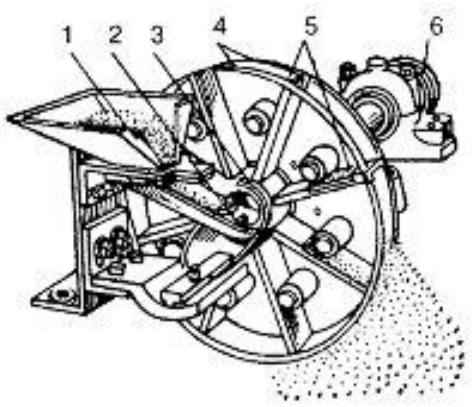


Рисунок 94. Дробеметный аппарат: 1 - загрузочная воронка; 2 - распределительное колесо (импеллер); 3 - ротор; 4 - диски ротора; 5 - лопатки ротора; 6 – электродвигатель.

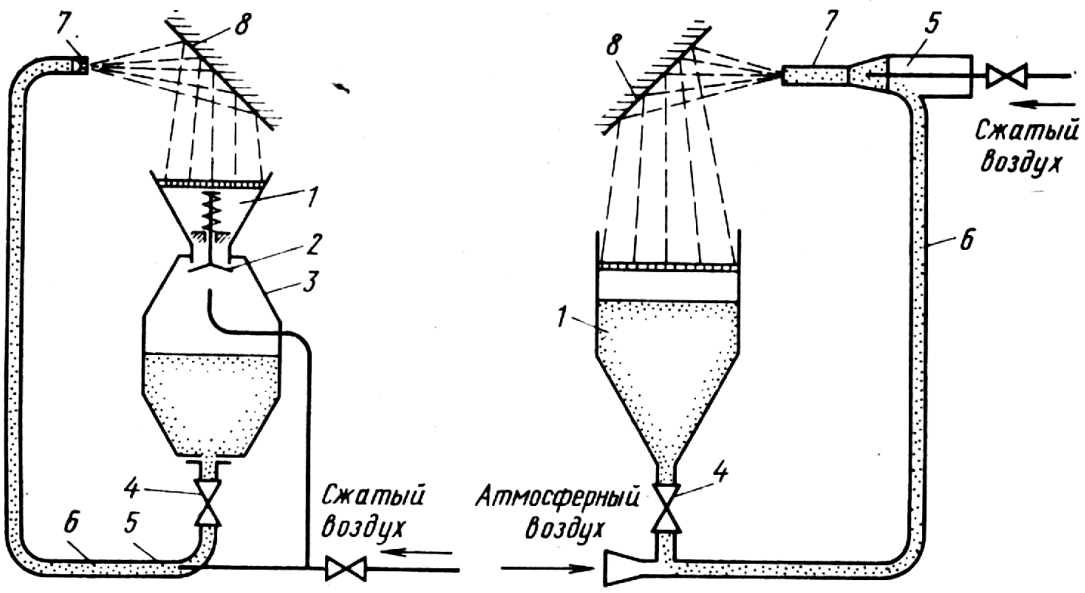


Рисунок 95. Схемы дробеструйных аппаратов а- нагретательного действия, б- всасывающего действия. 1- бункер, 2- клапан, 3- резервуар, 4-кран, 5- смесительная камера, 6-шланг, 7-сопло, 8- обрабатываемая поверхность.

Гидроочистка. Принцип гидроочистки основан на эффекте силового воздействия высоконапорной водяной струи на обрабатываемую поверхность. Агрегаты высокого и сверхвысокого давления представляют собой новое высокоэффективное, экологически чистое и энергосберегающее оборудование на базе водоструйных технологий высокого давления. Введение в струю абразива позволяет легко очищать поверхности металлических и неметаллических материалов. Преимущества гидроочистки:

- мобильность;
- компактность;
- высокая эффективность;
- высокая экономичность;
- Многофункциональность;
- экологичность;
- простота в эксплуатации ;
- невысокая стоимость оборудования;
- низкая стоимость обслуживания.

Основные недостатки:

- необходимость предварительной очистки воды;
- сильное динамическое воздействие струи на поверхность;
- необходимость последующей сушки.

Ультразвуковая обработка достигается за счет применения эффекта кавитации, вызванного ультразвуковыми колебаниями в жидкости. Эффект кавитации происходит за счет чередующихся волн высокого и низкого давления, вызванных звуком высокой частоты (ультразвуком). Диапазон частот ультразвуковых аппаратов для очистки лежит в пределах 20 - 40 кГц, интенсивность ультразвуковых колебаний обычно составляет 0,5 - 5 Вт/см^2. В качестве моющих жидкостей применяют водные растворы щелочей, кислот, солей с добавлением поверхностно-активных веществ. Температура моющей жидкости обычно составляет 60 - 75 ºС. Стандартная ультразвуковая установка состоит из:

- рабочей емкости (ванны от 0,5 до 1000 и более литров);
- блока питания;
- генератора ультразвуковых колебаний (18-44 кГц);
- излучателей ультразвуковых колебаний;
- блока управления.

Достоинства ультразвуковой очистки:

- механическая очистка деталей самых сложных форм;
- отсутствие применения токсичных веществ;
- отсутствие химических реакций на поверхности детали;
- высокая скорость;
- возможность очистки полированных поверхностей.

Недостатки ультразвуковой очистки:

- сложность удаления толстых и прочных окисных пленок;
- высокая стоимость технологического оборудования.

Химический способ очистки (травление) заключается в том, что поверхность очищают погружением металла в ванну с раствором кислоты (серной, соляной и т.д.) и последующей нейтрализации, промывке и обезжиривании поверхности (рис. 90). Наиболее эффективен этот метод для удаления прочных оксидных пленок. Однако применение химической очистки ограничено вредностью производства и высокой стоимостью оборудования для очистки и нейтрализации сточных вод.

Электрохимическое обезжиривание - это процесс удаления жиров и масел с поверхности изделия. Электрохимическое обезжиривание может происходить на катоде, на аноде и может быть комбинированным - на катоде с последующим кратковременным переключением на анод. Процесс электрохимического обезжиривания на катоде заключается в омылении жиров гидроксильными ионами, концентрация которых у катода бывает повышенной благодаря выделению газообразного водорода, способствующего механическому отрыву капель жиров и масел. Механизм процесса анодного обезжиривания аналогичен катодному, но скорость обезжиривания на аноде меньше, что объясняется

меньшей щелочностью у анода и тем, что выделяющийся на аноде кислород слабее воздействует на обделение жиров и масел от поверхности изделий.

Электрохимическое травление это удаление с поверхности изделий различных окислов и продуктов коррозии. Очистку от загрязнений производят в растворах кислот, содержащих различные добавки (например, ингибитор коррозии), в щелочных растворах или расплавах при постоянном или переменном токе. Электрохимическое травление используют для осуществления электрохимического фрезерования с целью получения заданного "рисунка" на поверхности детали локальным анодным растворением металла. Места, которые не должны подвергаться растворению, покрывают слоем фоторезисторного материала.

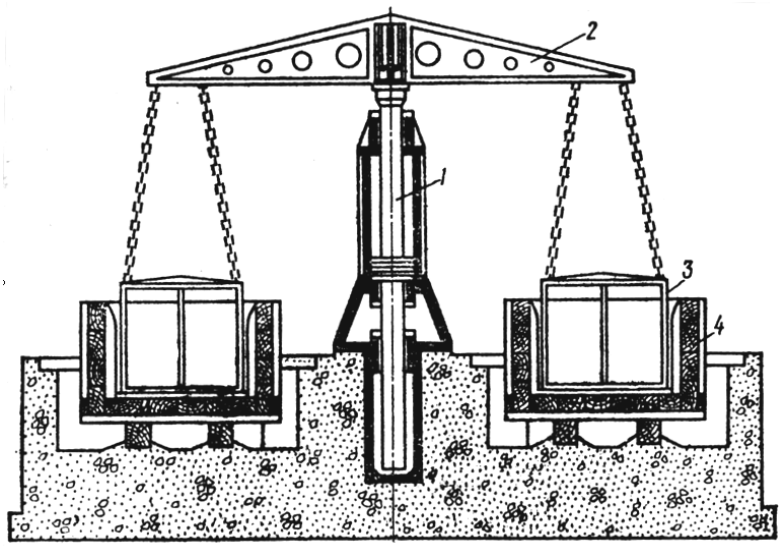


Рисунок 96. Травильный бак с краном. 1 - поворотное устройство, 2 - стрела, 3 - корзина, 4 - травильный бак.

18.2 Моечные машины

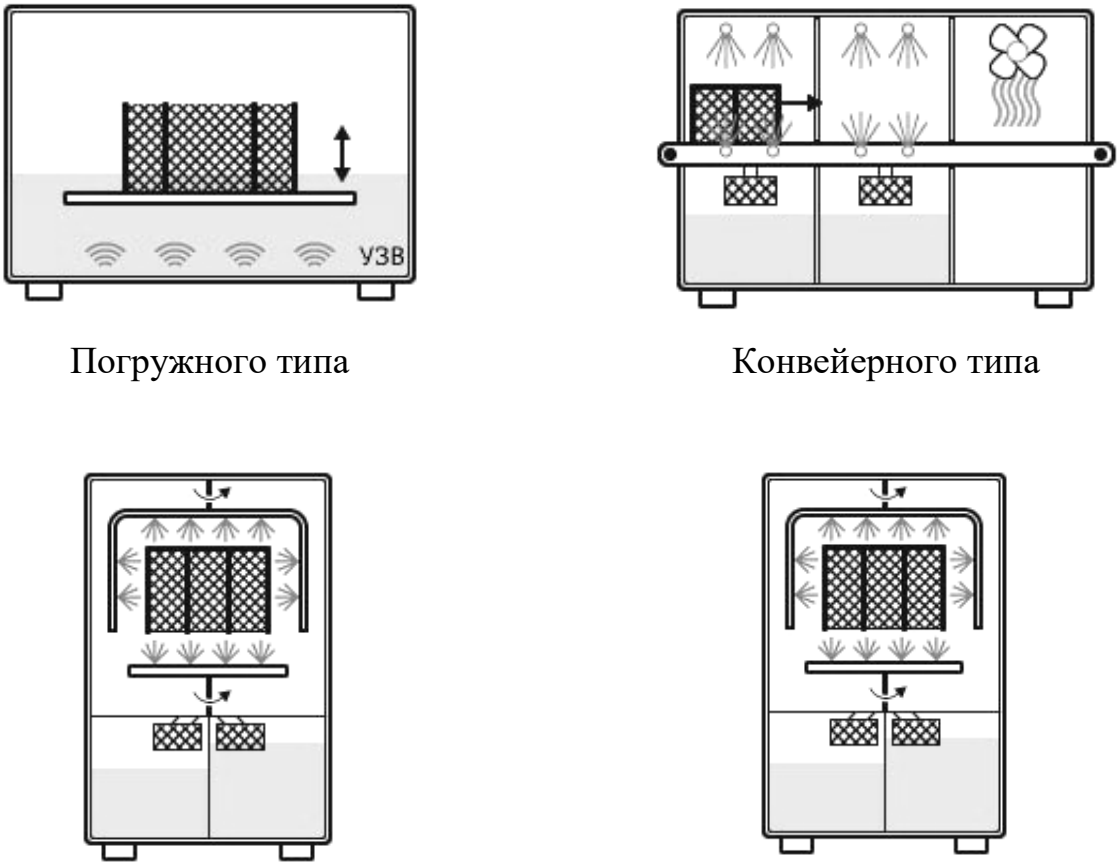
Моечные машины применяют для очистки деталей после механической обработки (от стружки, абразива, масел, СОЖ, окалины и ржавчины), после термической обработки (от закалочной среды) и химической обработки для придания адгезионных и антикоррозионных свойств поверхности деталей.

Моечные машины подразделяются:

- по количеству загрузочных окон - на проходные и тупиковые;

- по степени автоматизации - на ручные, механизированные, автоматические;
- по виду обрабатываемых изделий - для длинномерных изделий, листов, небольших деталей;
- по типу - на карусельные, толкательные, конвейерные и т.д;
- по назначению - для очистки или обезжиривания;
- по возможности перемещения в технологическом процессе - на стационарные или мобильные.

Моечные машины бывают замкнутого (среда циркулирует, нагревается и очищается внутри моечного агрегата) или открытого цикла (среда заберется из водопровода и сливается в канализацию).



Погружного типа | Конвейерного типа

Струйного типа | Струйно-погружного типа

Рисунок 97. Схемы моечных установок

Основными критериями при выборе оборудования для очистки являются размеры рабочего пространства; максимальная нагрузка; производительность и стоимость.

18.3 Оборудование для правки изделий

При термической обработке деталей может происходить их коробление и деформация. Детали небольших размеров (5-10 мм) подвергают правке на инструментальных плитах. Для правки более крупных деталей (размером 10-30 мм) применяют ручные винтовые или реечные прессы с рабочим давлением 2 – 25 т (рис.98). Движение ползуна ручного пресса производится вращением махового колеса. Механические и гидравлические правильные прессы применяются главным образом для правки крупнотоннажных профилей, рельсов, труб больших размеров. Для правки изделий сложной конфигурации используют специальные правильные машины различных типов. Для правки листов используют роликовые правильные машины, которые имеют 2 ряда роликов, расположенных параллельно в шахматном порядке. Для правки труб с высокой точностью и для устранения овальности в поперечном сечении трубы применяют роторные машины. Растяжные правильные машины используют для правки длинномерных изделий и проволоки. Для устранения скручивания некруглых труб используют раскруточно-растяжные машины. В условиях мелкосерийного или штучного производства для правки изделий может применяться универсальное станочное оборудование (например токарные станки) с использованием специально разработанных приспособлений.



а б в

Рисунок 98. Правильные прессы. а- ручной реечный, б- ручной винтовой, в- гидравлический

19. Охлаждающие среды и устройства для охлаждения

19.1. Классификация охлаждающих сред

Охлаждающие среды должны обладать рядом комплексом эксплуатационных и технологических свойств:

- обладать способностью поглощать тепло с заданной скоростью (обычно не менее критической скорости охлаждения) для получения необходимых структур по всему объему или в поверхностном слое изделий;
- не вызывать чрезмерных закалочных деформаций и трещин. При охлаждении стали от температуры закалки до точки $M_н$ допустима высокая скорость охлаждения, так как сталь имеет пластичную аустенитную структуру (рис. 93). Обычно трещины при закалке стали возникают тогда, когда 50 % объема аустенита превращается в мартенсит, который образует твердый хрупкий каркас и препятствует развитию пластической деформации.;
- обладать высокой эксплуатационной стойкостью. Иметь высокое

сопротивление термическому разложению и окислению;

- не реагировать с поверхностями обрабатываемых деталей, закалочных устройств;
- обладать малой токсичностью и пожаровзрывобезопасностью;
- легко удаляться с поверхности деталей;
- иметь малый вынос с садкой;
- иметь малую стоимость.

Классификация охлаждающих сред. Существуют различные типы классификаций охлаждающих сред. По агрегатному состоянию охлаждающие среды подразделяются на:

- жидкие - вода, водные растворы солей, щелочей и кислот, водные эмульсии масел, водные растворы полимеров, минеральные масла, расплавленные металлы, расплавленные соли и щелочи;
- твердые - водоохлаждаемые и не охлаждаемые металлические плиты, пресс-формы, самоохлаждение вглубь изделия;
- газообразные - спокойный и циркулирующий воздух, инертные газы, вакуум, контролируемые атмосферы;
- комбинированные среды – газо-твердые (взвешенные) и газо-жидкие (туман) среды пр.



Рисунок 99. Диаграмма изотермического превращения аустенита

По изменению агрегатного состояния в процессе охлаждения среды классифицируют на следующие группы.

- Среды без изменения агрегатного состояния в процессе охлаждения. К этой группе относят расплавленные металлы, соли, щелочи и их смеси, воздух и твердые металлы. Кривые охлаждения в этих средах с понижением температуры имеют монотонный характер.
- Среды, в которых происходит изменение агрегатного состояния в процессе охлаждения. К ним воду и водные растворы солей, кислот и полимеров, минеральные и растительные масла, водно-масляные эмульсии. Процесс охлаждения в этих средах условно подразделяют на три периода. Первый период - стадия пленочного кипения. На поверхности соприкосновения нагретого металла и жидкости образуется тонкая пленка перегретого пара, которая обладает высоким термическим сопротивлением. В этот период охлаждение будет замедленным. Второй период - стадия пузырчатого кипения. Тепло интенсивно уносится пузырьками газа, при этом скорость охлаждения возрастает в 3-5 раз. Третий период - стадия конвективного теплообмена. Скорость охлаждения на этом этапе меньше в 5-10 раз по сравнению с пузырчатым кипением.

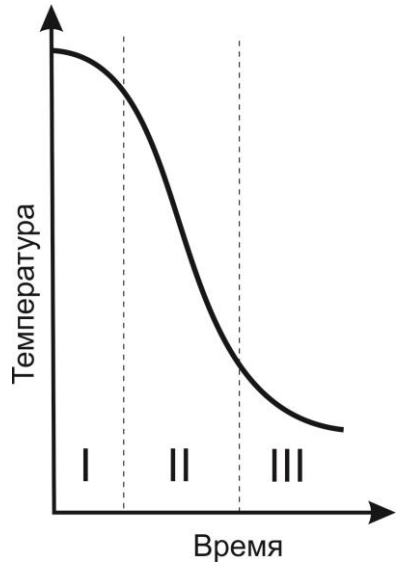


Рисунок 100. Кинетика охлаждения в жидких средах

19.2 Водные закалочные среды

Водные охлаждающие среды широко применяются с древнейших времен. Они подразделяются на собственно воду, водные растворы солей, щелочей и кислот, водные эмульсии масел, водные растворы полимеров. Вода обладает рядом достоинств:

- высокой охлаждающей способностью;
- низкой стоимостью;
- невозгораемостью;
- безопасностью для здоровья и окружающей среды;
- стабильностью свойств;
- легкостью растворения органических и неорганических соединений.

При этом вода, как охлаждающая среда, обладает рядом недостатков, важнейшими из которых являются:

- не отвечающее кинетике фазовых превращений распределение скорости охлаждения (рис.99). При закалке углеродистых сталей необходимо учитывать скорость охлаждения в двух интервалах температур — в интервале наименьшей устойчивости аустенита (650 - 550° С) и в интервале мартенситного превращения (300 - 200° С). В первом интервале необходимо иметь большую скорость охлаждения, чтобы подавить перлитное превращение. Во втором интервале необходимо охлаждение замедлить, чтобы уменьшить напряжения в стали и опасность появления закалочных трещин;
- большая зависимость охлаждающей способности от температуры среды (рис.100, таблица 39);
- сильная зависимость охлаждающей способности от скорости циркуляции среды, особенно в диапазоне температур 900- 400 ^{o}C (рис.101). Паровая оболочка на первой стадии очень нестабильна, поэтому велики термические напряжения и “пятнистость” стали;
- сильное влияние примесей на охлаждающую способность. Твердые примеси (сажа, окалина) увеличивают скорость охлаждения. Растворенные соли, кислоты, щелочи также уменьшают стойкость паровой рубашки и увеличивают

скорость охлаждения. Жиры, мыла, масла, СМС повышают устойчивость паровой рубашки и уменьшают скорость охлаждения.

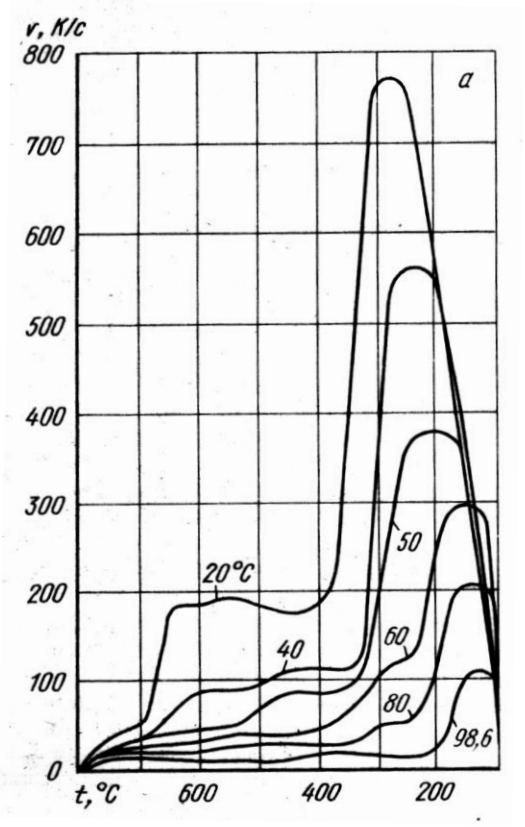


Рисунок 101. Скорость охлаждения при различной температуре охлаждающей жидкости

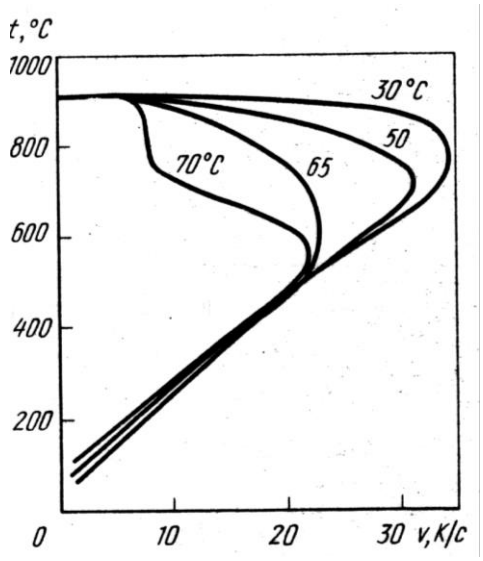


Рисунок 102. Зависимость скорости охлаждения от температуры воды. Скорость циркуляции 0,45 м/с

Таблица 39. Сравнительная охлаждающая способность различных сред

Охладитель	**Температура, °С**	**Относительная охлаждающая способность**	**Время охлаждения от 700 до100 ° С, сек**
Вода	20	1	6
Вода	50	0,77	7,75
Вода	100	0,37	16
Растительное масло	20	0,13	45
Минеральное масло	25	0,15	40

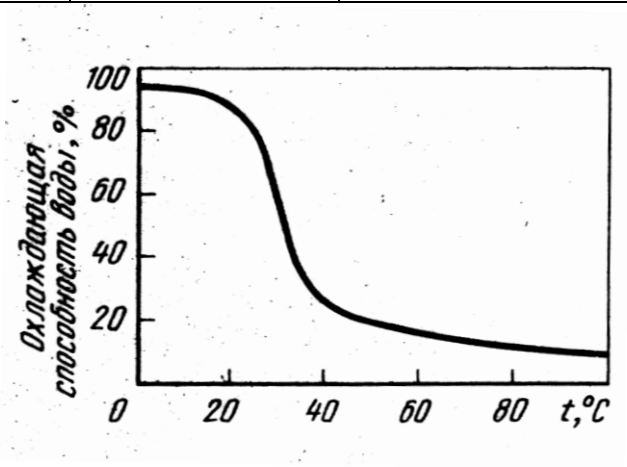


Рисунок 103. Относительная охлаждающая способность от циркуляции среды

19.3. Охлаждение в водных растворах солей кислот и щелочей.

Наиболее распространенные водные растворы изготавливают на основе следующих химических соединений: NaC1, KC1, $CaC1_2$, Ka_2CO_3, Na_2SO_4, KOH (таблица 40). Достоинства охлаждения в водных растворах солей кислот и щелочей:

- более высокая скорость охлаждения в диапазоне температур 800…600 °С (рис. 102);
- меньшее влияние температуры раствора на скорость охлаждения (до температур растворов 60-70 °С);
- слабое влияние циркуляции среды на охлаждающую способность;

- снижение вероятности образования мягких пятен;
- уменьшение разброса показателей твердости в садке плотно расположенных деталей.

Недостатки охлаждения в водных растворах солей кислот и щелочей:

- большее коробление деталей вследствие более высокой скорости охлаждения в области мартенситного превращения;
- необходимость антикоррозионной защиты оборудования и защиты персонала;
- необходимость контроля за концентрацией растворов;
- необходимость нейтрализации сточных вод.

Таблица 40. Скорость охлаждения изделий в различных средах

Закалочная среда	Скорость град/сек, охлаждения интервалах °С	
	650—550	300—200
Вода при 18° С	600	270
Вода при 50° С	100	170
Вода при 74° С	30	120
90% воды + 10% КаОН	1200	300
90% воды + 10% NaOH	1100	300
90% воды + 10% Na_2CO_3	800	270
Дистиллированная вода при 20° С	250	200
Мыльная вода	30	200
Эмульсия масла в воде	70	200
Трансформаторное масло	120	25

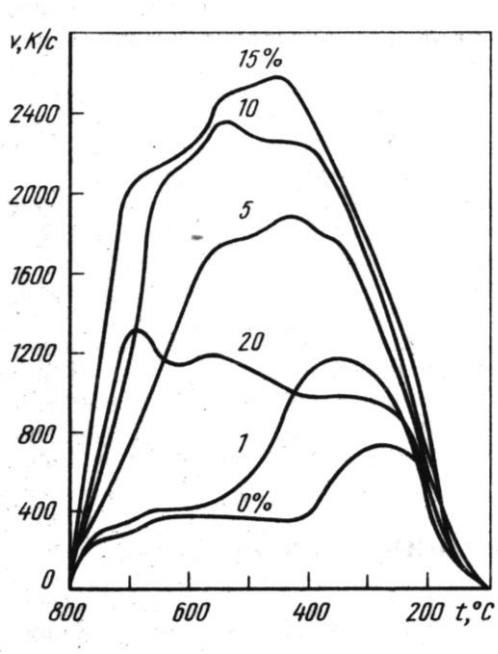


Рисунок 104. Скорость охлаждения в водном растворе хлористого натрия

19.4. Охлаждение в водно-масляных эмульсиях

Водно-масляные эмульсии характеризуются низкими скоростями охлаждения при высоких и средних температурах охлаждаемой поверхности, а при низких температурах охлаждают быстро, подобно чистой воде (рис.103). По закаливающей способности и результатам закалки эмульсии и суспензии похожи на нагретую воду (рис.104). При охлаждении в них получается пятнистая структура с нестабильными показателями твердости и прокаливаемости. Циркуляция мало отражается на их охлаждающей способности. В настоящее время водно-масляные эмульсии практически не применяются, так как они нестабильны и с течением времени разлагаются на воду и масло.

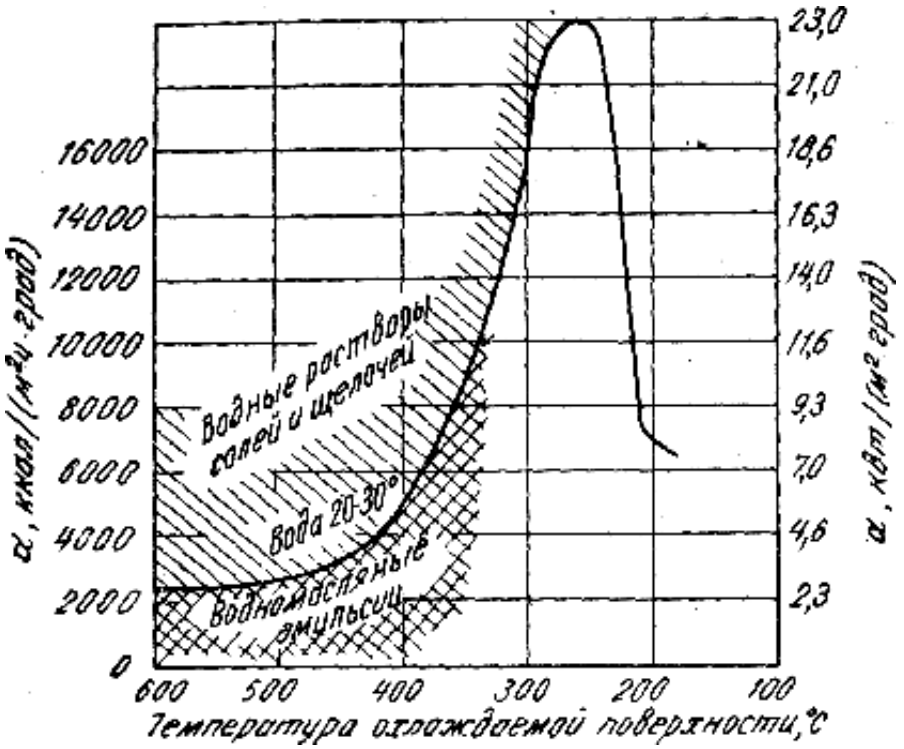


Рисунок 105. Коэффициент теплоотдачи в различных средах различных средах

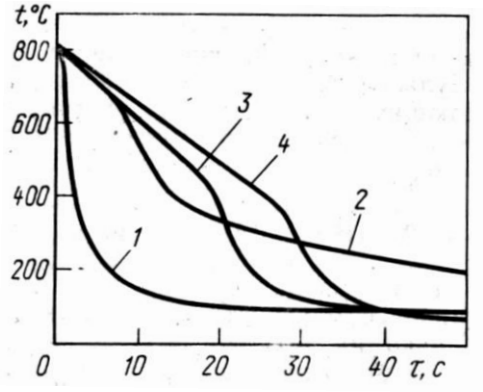


Рисунок 106. Скорости охлаждения аустенитной стали в различных средах. 1- вода, 2- минеральное масло, 3- эмульсия, содержащая 10 % масла, 4- эмульсия, содержащая 50 % масла

19.5 Охлаждение в водных растворах полимерах

Водные растворы полимеров являются наиболее перспективным видом закалочных сред, который обладает рядом достоинств. Кинетика охлаждения в них более благоприятна по сравнению с водой и может варьироваться в широких пределах. В диапазоне температур 800 - 400 °С охлаждающая способность полимерных сред выше чем у воды, при этом в области мартенситного превращения скорость охлаждения ниже, чем в воде (рис.105). Они обладают

невозгораемостью по сравнению с минеральным маслом, при этом стоимость большинства сред сопоставима со стоимостью масла.

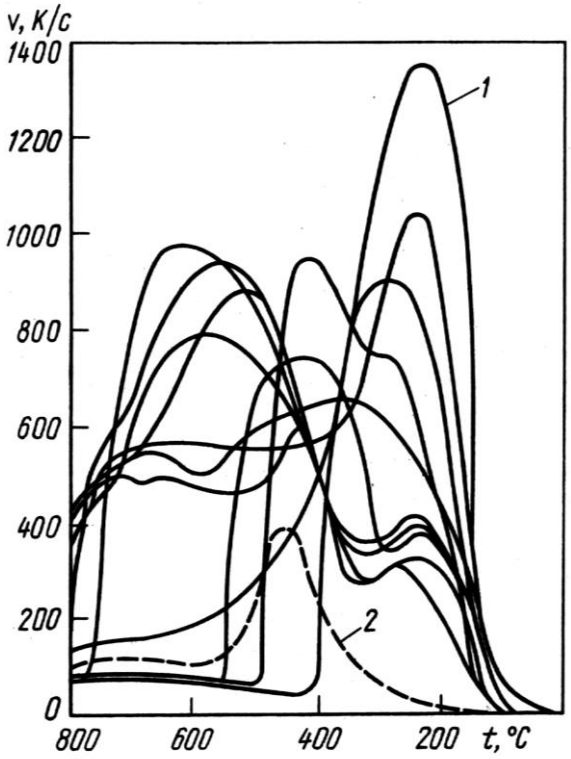


Рисунок 107. Скорости охлаждения серебряного шарика в различных средах. 1- вода, 2- минеральное масло, оставшиеся кривые - 5 % водные растворы полимеров

Основные недостатки полимерных сред:

- в области мартенситного превращения скорость охлаждения выше чем у минерального масла;
- иногда полимерные среды образуют осадок, трудноудалимый с поверхности;
- охлаждающая способность сильно зависит от концентрации полимера поэтому необходим постоянный контроль состава среды(рис.106);
- у большинства сред охлаждающая способность сильно зависит от температуры.

Наиболее широко распространены среды на основе полигликолей (тосол, антифриз) и поливинилацетата (ПВА).

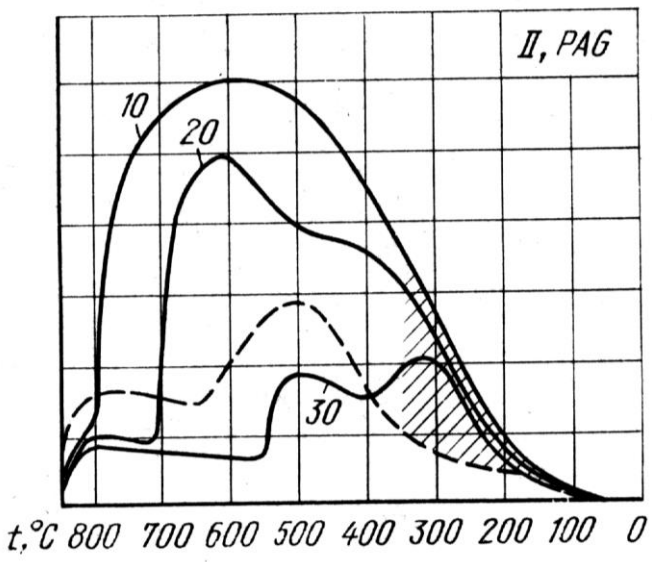


Рисунок 108. Скорость охлаждения полимерной среды с различной концентрацией полимера. Штриховая линия- охлаждение в масле

19.6. Охлаждающие среды на основе масел

В настоящее время масла являются одним из основных видов закалочных сред. В зависимости от основы они подразделяются на растительные (редко применяемые в настоящее время из-за низкой стабильности свойств) и минеральные. Достоинства сред на основе минеральных масел.

- Более благоприятная кинетика охлаждения по сравнению с водой, позволяющая получать мартенситную структуру с меньшей вероятностью коробления и возникновения закалочных трещин. скорость охлаждения при температуре 450 °С лишь в 1,5 раза ниже чем в воде, при этом в области мартенситного превращения меньше в 10-30 раз (рис. 107).
- Слабое влияние температуры масла на охлаждающую способность. Охлаждающая способность практически не меняется до температуры 80-90 °С.
- Возможность изменения свойств в широком диапазоне.
- Относительная дешевизна.

Недостатки минерального масла, как охлаждающей жидкости:

- возгораемость (рис.109);
- большой вынос с садкой;
- необходимость промывки изделий;
- недостаточная скорость охлаждения в области минимальной устойчивости переохлажденного аустенита;
- сильная зависимость охлаждающей способности от циркуляции среды (рис.108).

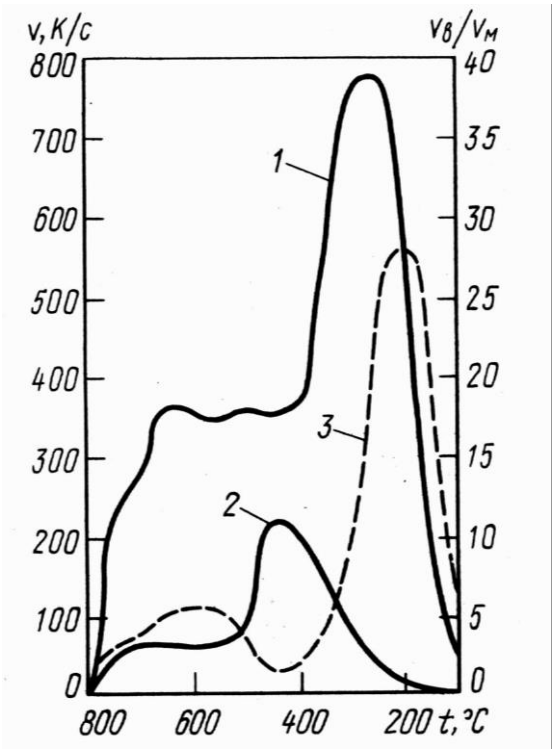


Рисунок 109. Скорость охлаждения в различных средах. 1- вода, 2- минеральное масло, 3- зависимость отношения этих скоростей от температуры.

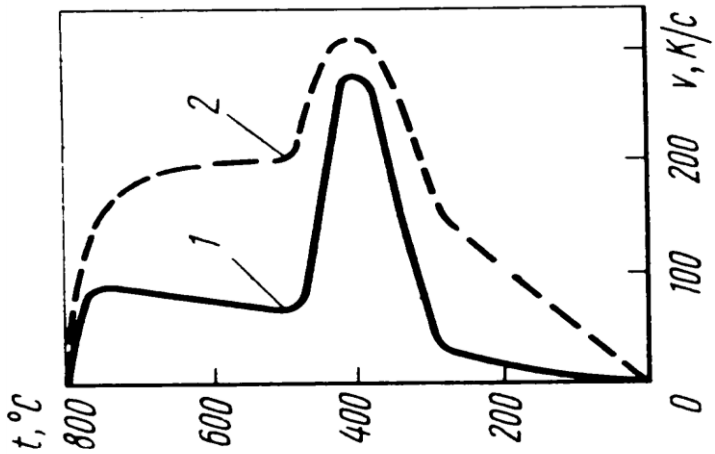


Рисунок 110. Влияние скорости циркуляции на скорость охлаждения в масле. 1- спокойное масло, 2- сильно циркулирующее масло

Разновидности масел

С точки зрения эксплуатационных свойств масла подразделяются на :

- низкотемпературные (допускающее применение при нагреве до 90 °С);
- высокотемпературные (со специальными антиокислительными присадками с рабочей температурой до 200 °С и сроком эксплуатации до 2 лет)

С точки зрения охлаждающей способности масла подразделяются на:

- медленноохлаждающие (вязкие);
- быстроохлаждающие (жидкотекучие со специальными смачивающими присадками).

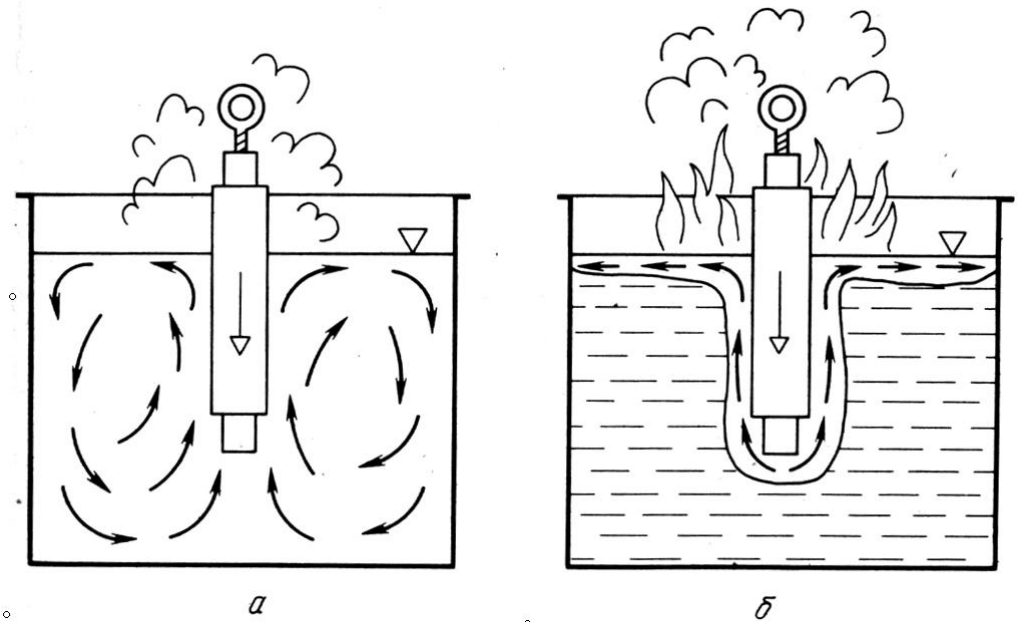


Рисунок 111. Влияние вязкости масла на охлаждающую способность и воспламенение. а- масло с малой вязкостью, б- масло с высокой вязкостью

Основные признаки старения закалочных масел это увеличение их вязкости и появление осадка. Старение закалочных масел приводит к ухудшению их охлаждающей способности. Основные способы борьбы со старением это добавление свежего масла; фильтрация и очистка масла; добавление в него противоокислительных присадок. Наличие воды в масле приводит к уменьшению

скорости и увеличению неравномерности охлаждения и увеличению пожароопасности из-за пенообразования (рис.112). Признаки наличия воды - сильное бурление масла во время охлаждения, пенообразование, разбрызгивание, сопровождающееся треском, помутнение масла. Для удаления воды из закалочных масел используют отстой масла с последующим сливом воды через дренажные отверстия внизу бака. Возможна так же “сушка” масла, заключающаяся в нагрев масла до температуры 120 - 130 °С с последующей длительной выдержкой при этой температуре.

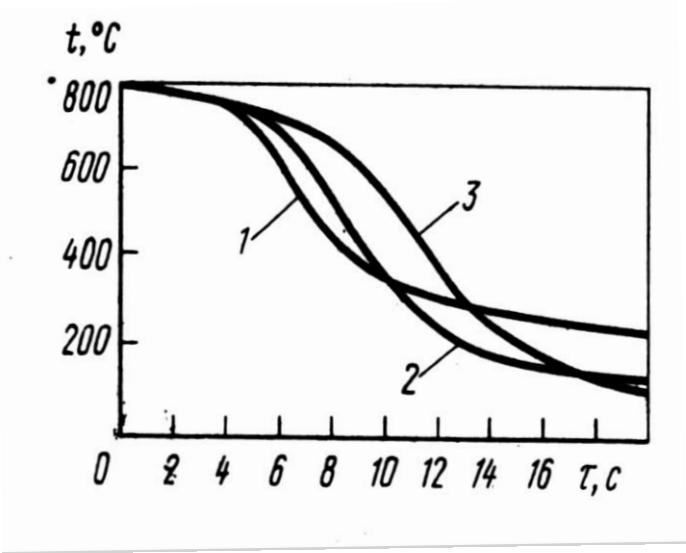


Рисунок 112. Влияние содержания воды на кинетику охлаждения в минеральном масле. 1- без воды, 2- 0,2 % воды, 2- 0,5 % воды

Воспламенение масел. Следует иметь в виду, что горит не само масло, а его пары. Возможные причины воспламенения и горения масла:

- перегрев в результате малого объема масла по отношению к обрабатываемой детали;
- слабая циркуляция из-за высокой вязкости;
- малая скорость погружения детали;
- малая глубина бака;
- наличие в масле воды.

Меры борьбы с воспламенение масел заключаются в устранении вышеперечисленных причин или подача инертных газов на поверхность закалочного бака.

19.7. Охлаждение в расплавах солей и щелочей

Охлаждение в расплавах солей и щелочей применяется для ступенчатой и изотермической закалки в рабочем диапазоне температур 150 - 550 °С (таблица 41). Температура кипения расплавов солей превышает температуру нагрева деталей под термическую обработку, поэтому стадий образования паровой рубашки и пузырчатого кипения при охлаждении в данной среде не наблюдается. Достоинства данного способа охлаждения:

- высокая охлаждающая способность в диапазоне температур 150-550 °С (рис.111);
- малая пятнистость поверхности;
- слабое окисление поверхности.

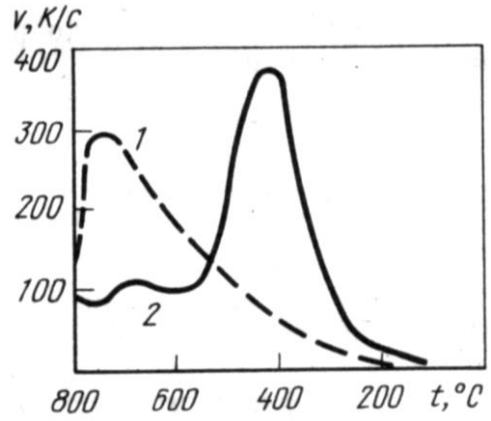


Рисунок 113. Скорости охлаждения в селитровой соли при температуре 180 °С (1) и быстрохлаждающем минеральном масле (2)

Недостатки охлаждения в расплавах солей и щелочей:

- невозможность охлаждения деталей до комнатной температуры;
- сильная зависимость охлаждающей способности от содержания воды;

- сильная зависимость охлаждающей способности от циркуляции среды;
- взрывоопасность и токсичность;
- необходимость защиты оборудования от процессов коррозии;
- необходимость промывки деталей после термообработки;
- особые требования к безопасности работы и оборудованию термических участков, использующих печи-ванны.

Таблица 41. Основные щелочи и соли, применяемые для ступенчатой изотермической закалки [14]

Химический состав	Температура плавления, ^{o}C	Температурная область применения ^{o}C
NaOH	328	350 - 700
KOH	360	400 - 650
75% NaOH+25% $NaNO_3$	280	420 - 540
37%NaOH+63% KOH	160	180 - 350
40% NaOH+35% Na_2CO_3 +25% NaCl	470	500 - 600
38%KOH+22%NaOH+20%$NaNo_3$+15%$NaNo_2$ +5%$NaPo_4$	150	160 - 360
40%KOH+30%$NaNo_3$+25%$NaNo_2$+5%$NaPo_4$	280	300 - 500
70%KOH+15%$NaNo_3$+10%$NaNo_2$+5%$NaPo_4$	250	280 - 600
$KClMgCl_26H_2O$ (криолит)	440	450 - 600

Особые требования при работе с солями.

- Участок термообработки располагают в отдельном помещении с 2 выходами с хорошей вентиляцией и дублированием систем отключения ванн.
- Разогрев ванны производят медленно, так как при быстром нагреве возможен выброс расплавленной соли из-за разрушения корки на поверхности печи-ванны.

- При использовании ванны для нагрева необходима очистка садки от воды, масла и угольной пыли.

19.8 Закалка в расплавах легкоплавких металлов

Закалка в расплавах легкоплавких металлов позволяет осуществлять быстрое охлаждение в диапазоне температур 200 - 700 ^{o}C с высокой скоростью и равномерностью охлаждения. В качестве охлаждающих сред используют сплавы основе свинца, олова, кадмия, сурьмы. Вследствие существенных недостатков: токсичности, высокой скорости окисления среды, сложности удаления остатков среды с поверхности детали и необходимости принудительного погружения деталей в закалочную емкость для ряда сплавов закалку в расплавах легкоплавких металлов применяют редко.

Таблица 42. Основные сплавы, применяемые для ступенчатой изотермической закалки [14]

Химический состав сплава	Температурная область применения, ^{o}C
100 % Pb	350 - 850
85 % Pb + 15 %Sn	300 - 600
60 % Pb + 40 %Sn	220 - 600
35 % Pb + 55 %Sn + 10 % Cd	160 - 600

19.9. Охлаждение в газовых средах

Основная отличительная особенность охлаждения в газовых средах – они не меняют своего агрегатного состояния в процессе контакта с нагретой деталью, поэтому кривая охлаждения носит монотонный характер. В основном теплоотвод осуществляется за счет конвекции, поэтому на скорость охлаждения значительное влияние оказывают коэффициент теплопроводности среды, скорость ее циркуляции, давление газа и его температура. При охлаждении высокие скорости

охлаждения могут быть получены при обдуве сжатым водородом, однако наиболее часто используется сжатый аргон, так как он не взрывоопасен и относительно дешев (относительная скорость охлаждения в спокойном состоянии: водород -1, гелий – 1,37, азот - 1,5, аргон -1,97). Для увеличения скорости охлаждения наиболее целесообразно осуществлять принудительную циркуляцию среды. Увеличение скорости среды от 0 до 2,5 м/с повышает скорость охлаждения в 2,5 раза. При этом охлаждение газа с + 20 до - 60 ^{o}C увеличивает скорость охлаждения только в 1,3 раза. Для повышения охлаждающей способности газ можно увлажнять (создание водяного тумана), однако при этом значительно увеличивается скорость окисления поверхности деталей. Достоинства охлаждения в газовых средах:

- минимальные термические деформации материала вследствие низкой скорости охлаждения;
- возможность получения неокисленных поверхностей (светлая закалка);
- возможность охлаждения локальных участков (за счет направленного обдува).

Таблица 43. Относительная охлаждающая способность различных сред

Охлаждающая среда	Скорость протекания газа, м/с	Относительная скорость охлаждения образца при температуре 100 ^{o}C
Вода дистиллированная	-	1,0
Вода водопроводная	-	0,74
Масло машинное	-	0,47
Спокойный воздух	-	0,043
Сжатый воздух	6	0,112
Сжатый воздух	44	0,350
Сжатый воздух	91	0,47
Сжатый гелий	6	0,30

Сжатый гелий	30	0,40
Сжатый гелий	44	0,47
Сжатый аргон	6	0,08
Сжатый аргон	44	0,31

Недостатки охлаждения в газах:

- сложность или невозможность получения высокопрочных структур мартенситного типа;
- неравномерность охлаждения из-за обилия “застойных зон”;
- сильная зависимость скорости охлаждения от отношения активной поверхности детали к ее массе.

Область применения газовых охлаждающих сред- операции отжига, нормализации, закалки сложнолегированных сталей и тонкостенных объемных деталей, охлаждение в вакуумных агрегатах.

19.10. Охлаждение во взвешенных средах

Сущность процесса получения взвешенных сред заключается в интенсивном перемешивании зернистого материала (кварцевого песка, дробленой руды, металлического порошка и др.) восходящим потоком газа (воздуха). Для этого измельченный материал насыпают в закалочную ванну на газораспределительную решетку. Снизу под решетку подается под давлением газ. Когда скорость поступающего в отверстия решетки газа будет превышать некоторое минимальное значение, (критическую скорость ожижения), частицы приобретают подвижность и весь слой измельченного материала становится похожим на вязкую жидкость, который называют «кипящим» (псевдоожиженным) слоем.

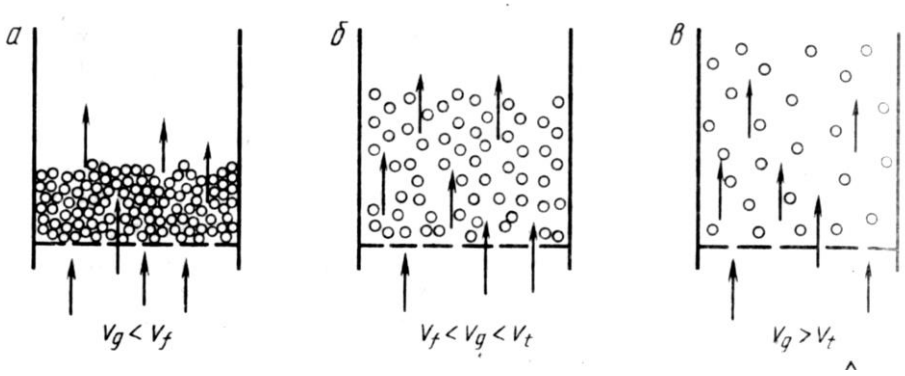


Рисунок 114. структура кипящего слоя в зависимости от скорости протекания газа

Достоинства охлаждения во взвешенных средах:

- повышенная охлаждающая способность по сравнению с газами (более чем в 5 раз):
- возможность изменения охлаждающей способности в широких пределах (за счет плотности и состава среды и ее температуры);
- не токсичность;
- высокая эксплуатационная готовность;
- практически неограниченный ресурс работы;
- дешевизна;
- ненужность дальнейшей промывки, сушки и очистки.

Недостатки охлаждения во взвешенных средах.

- Недостаточная охлаждающая способность для получения мартенситных структур в углеродистых и низколегированных сталях;
- явление “тени”, приводящее к появлению в материале участков с различной твердостью;
- необходимость специального оборудования с эффективными системами аспирации и вентиляции.

Типичное применение взвешенных сред – закалка сложнолегированных сталей и ступенчатая изотермическая закалка. Регулирование теплообмена

осуществляется за счет изменения скорости истечения газа, материала и размера зерен, температуры газа. Скорость охлаждения во взвешенных средах в 2,5 - 4 раза ниже, чем в минеральных маслах, однако, применение охлажденных газов увеличивает охлаждающую способность на 40 %.

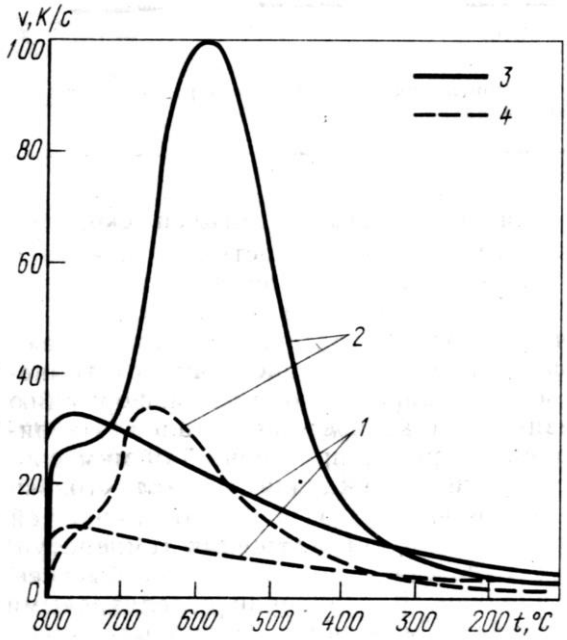


Рисунок 115. Скорость охлаждения в глубине и на поверхности образца в масле (2) и взвешенной среде (1)

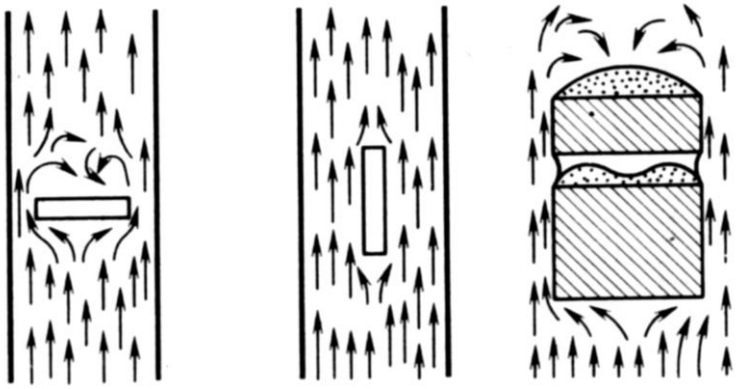


Рисунок 116. Схема влияния расположения детали на условия теплообмена и явление тени

19.11. Основы выбора охлаждающих сред

Выбор закалочной среды осуществляется в следующей последовательности.

1. По изотермическим или термокинетическим диаграммам превращения

оценивают кинетику фазовых превращений в материале. Для получения заданной структуры охлаждающая среда должна отводить тепло с заданной скоростью. Следует учитывать что охлаждающая способность сред определяется с помощью серебряных, нихромовых образцов или образцов из нержавеющей стали, поэтому при охлаждении других материалов скорость охлаждения может отличаться от справочных значений.

2. Оценивают кинетику изменения охлаждающей способности от температуры поверхности детали.
3. Оценивают зависимость охлаждающей способности от циркуляции среды.
4. Оценивают зависимость охлаждающей способности от температуры среды.
5. Определяют размеры сечения закаливаемой детали и ее термическая массивность.
6. Определяют стоимость среды.
7. Оценивают тип и конструкцию закалочных устройств, их стоимость. Общая тенденция, наблюдаемая в промышленности в последнее время – широкое применение закалочных агрегатов, для которых предъявляют повышенные требования к пожаровзрывобезопасности и неагрессивности используемых сред.
8. Оценивают экологичность и требования по охране труда.

Перспективные направления развития технологий охлаждения.

- Изотермическая закалка во взвешенных средах, после которой не нужны отпуск и очистка изделий.
- Применение полимерных водных охлаждающих сред, обладающих благоприятной кинетикой охлаждения.
- Применение технологий поверхностного упрочения, обладающих высокой производительностью и экономичностью.

19.12. Закалочные баки и машины

По способу охлаждения закалочные устройства подразделяют на:

- закалочные баки, в которых охлаждение осуществляется погружением деталей в охлаждающую жидкость (рис.117);
- спреерные (душирующие) устройства, в которых охлаждение производится разбрызгиванием охлаждающей среды (рис.118);
- струйчатые устройства, в которых охлаждение происходит в потоке жидкости (рис.119);
- камеры охлаждения, применяемые для охлаждения в газовых и диспергированных средах;
- закалочные машины, совмещающие операции деформирования и охлаждения (рис.120).

Закалочные баки являются наиболее распространенным видом устройств для охлаждения деталей в жидких средах. По степени механизации они подразделяются на немеханизированные, в которых погружение и удаление изделий осуществляется вручную; механизированные, оснащенные устройствами для погружения и извлечения изделий; автоматические, в которых процесс охлаждения осуществляется в автоматическом режиме.

По наличию дополнительных устройств охлаждения закалочной среды баки бывают с принудительным или без принудительного охлаждения. Можно выделить следящие способы охлаждения закалочной жидкости:

- закалочный бак находится в баке большего размера и между стенками наружного и внутреннего баков циркулирует вода;
- в баке укладывается змеевик из трубы диаметром 25 - 50 мм, которому непрерывно циркулирует вода;
- охлаждение закалочной жидкости производится путем механического перемешивания мешалками или сжатым воздухом (рис.122).
- циркуляция жидкости и ее охлаждение в специальной установке (например, в маслоохладительной). Закалочная жидкость поступает по трубопроводу к баку снизу, а нагретое масло отводится сверху.

В условиях массового производства закалочные системы представляют собой сложный комплекс оборудования, в который кроме закалочных баков входят устройства для очистки и охлаждения и хранения масла (рис .122).

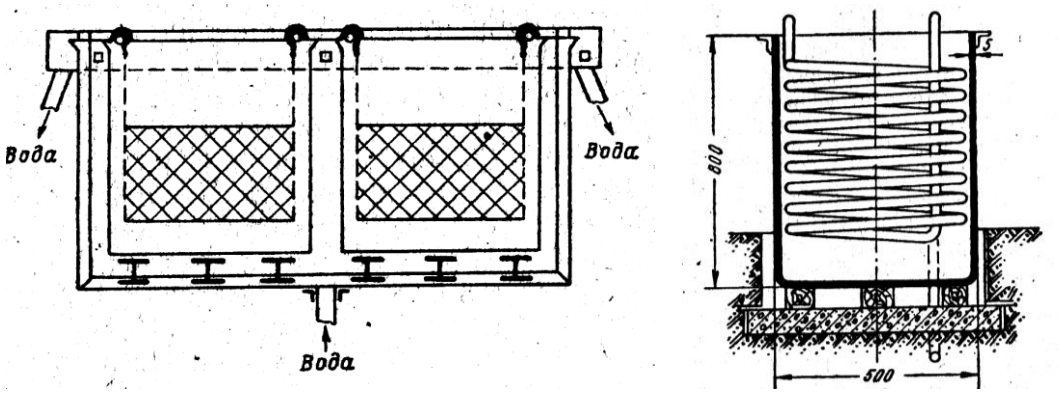


Рисунок 117. Закалочные баки с принудительным охлаждением проточной водой между стенками и охлаждающим змеевиком

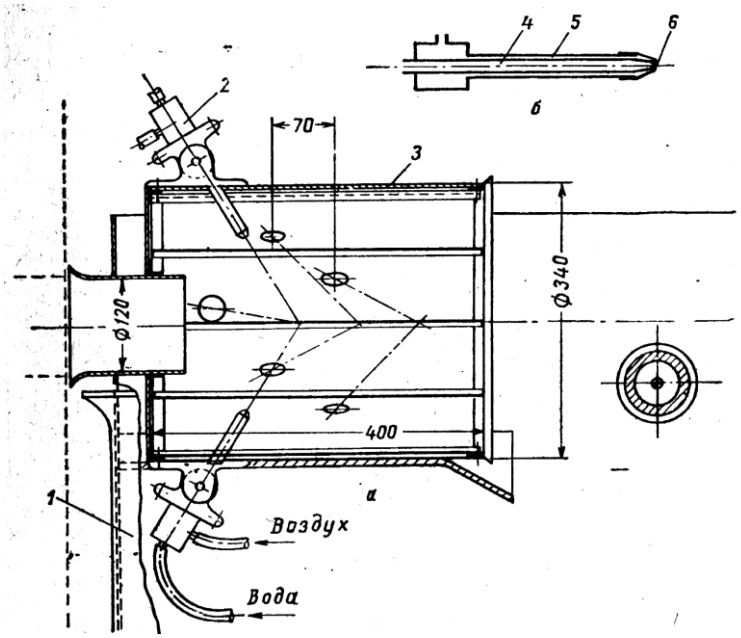


Рисунок 118. Душирующее закалочное устройство и схема форсунки. 1 -

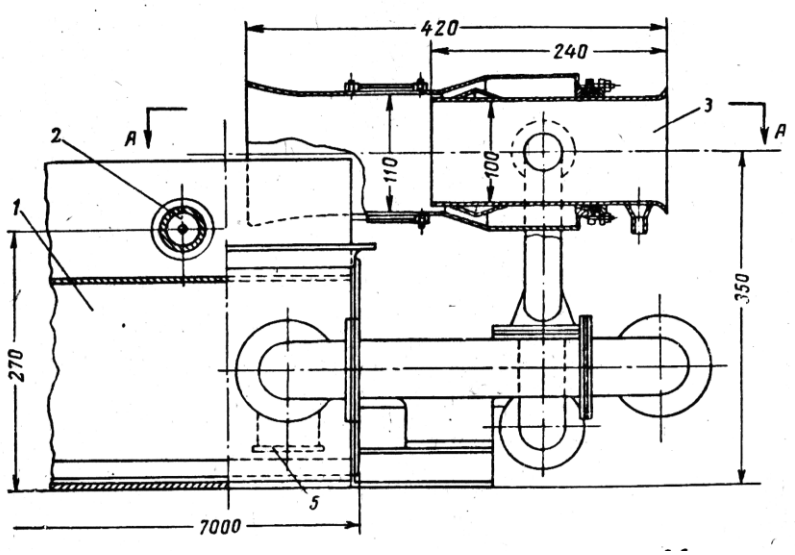


Рисунок 119. Струйчатое закалочное устройство

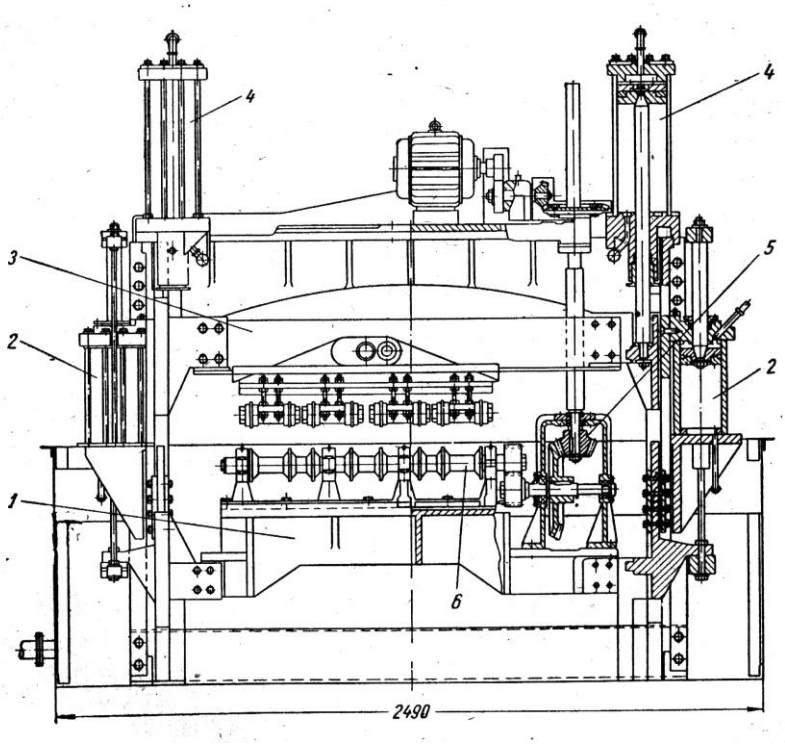


Рисунок 120. Машина для закалки кулачковых механизмов. 1 - нижняя таверса, 2 и 4- гидроцилиндры, 3 - верхняя траверса, 5 - передача, 6 - валы с роликами, 7- бак

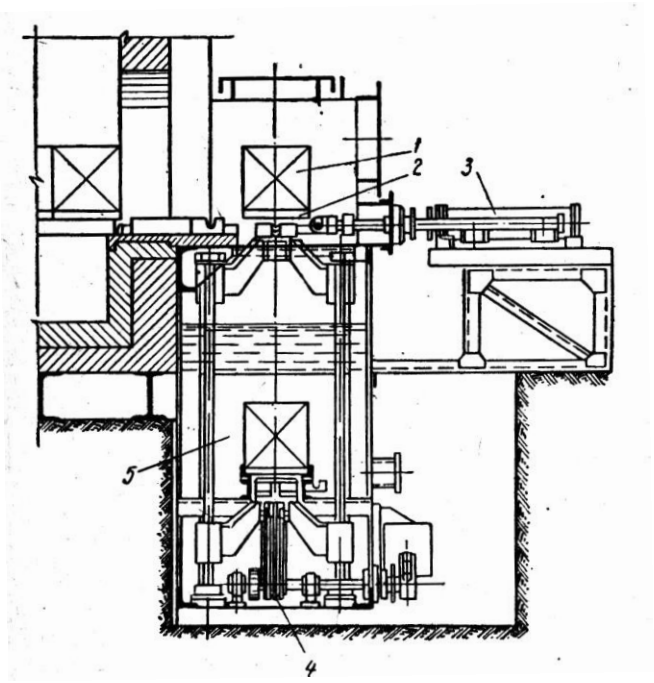


Рисунок 121. Механизированный закалочный бак. 1-деталь, 2 –поддон, 3-толкатель-вытаскиватель, 4 –элеваторный механизм, 5- охлаждающая среда

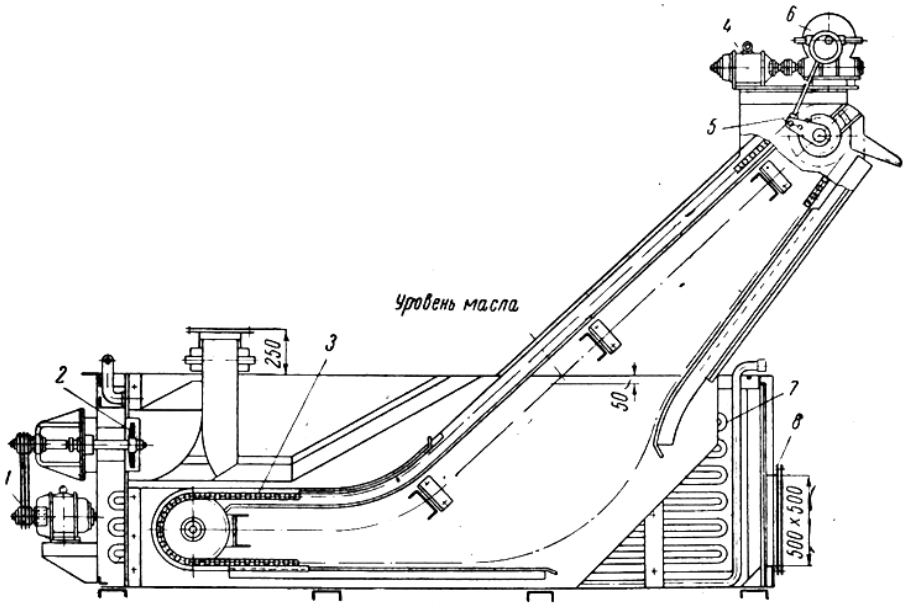


Рисунок 122. Механизированный конвейерный закалочный бак 1 – электродвигатель, 2- вентилятор, 3- конвейер, 4- двигатель конвейера, 5- храповый механизм, 6- редуктор, 7- охладитель, 8 – дренажное отверстие.

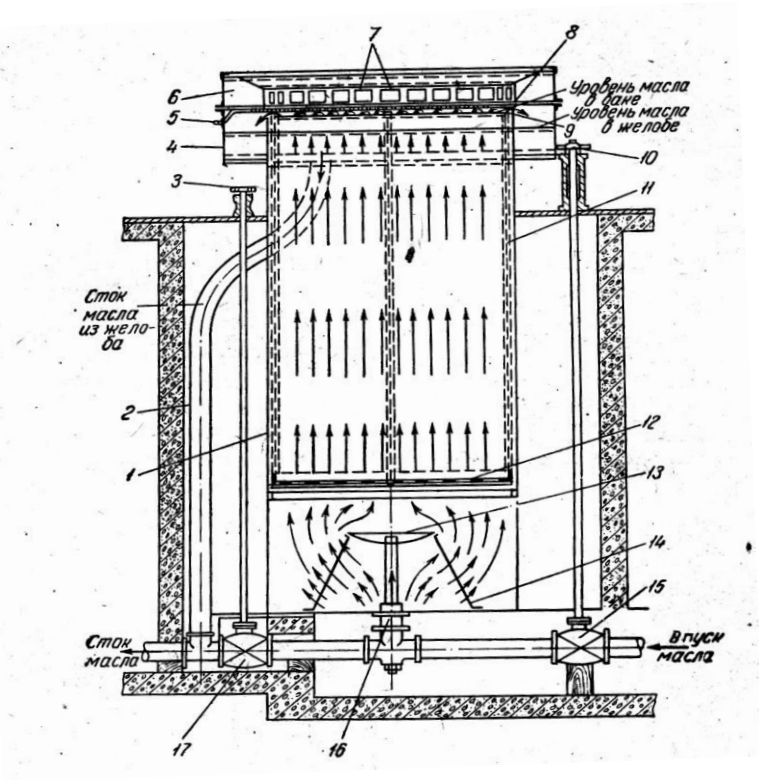


Рисунок 123. Бак с устройством для принудительной циркуляции масла 1бак, 2-сточная труба, 3- регулирующий вентиль, 4- карман, 5- трубка подачи инертного газа, 6- бортовые отсосы, 7- отверстия отсоса дымовых газов, 8,9 – крепления, 10 - вентиль, 11- решетчатая корзина, 12- поддон, 13- вентилятор, 14- щиток, 15, 16, 17 – регуляторы подачи и слива масла.

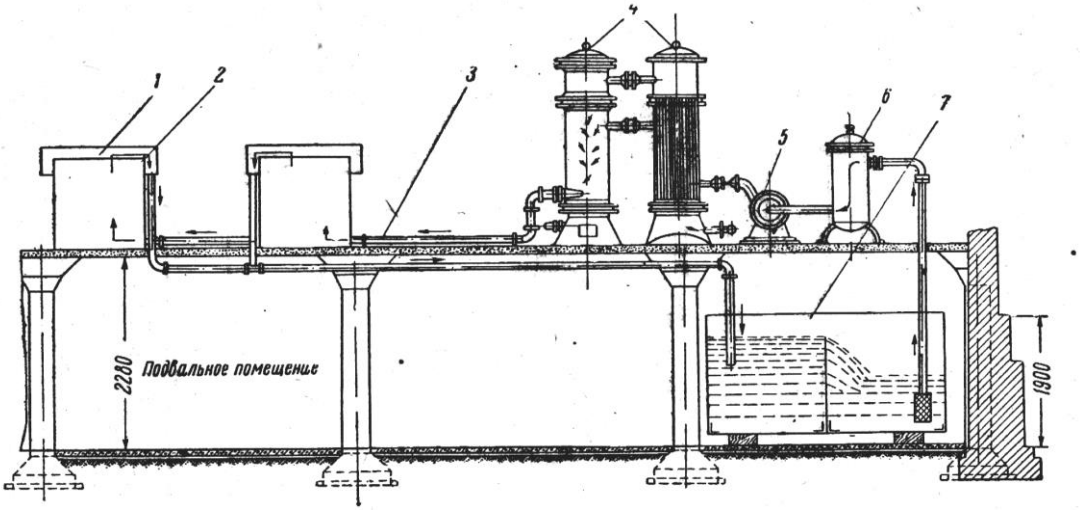


Рисунок 124. Система охлаждения и очистки масла. 1 - бак, 2 - карманы слива масла, 3 - трубопровод, 4 - холодильник, 5 - насос, 6 - фильтр, 7 - отстойник

19.13 Расчет закалочного бака

Расчет закалочных баков в единичном и мелкосерийном производстве производят в следующей последовательности

1. Задают габаритные размеры, вес и свойства материала детали, количество единовременно обрабатываемых деталей или величину часовой производительности, температуру нагретой детали и температуру деталей, извлекаемых из закалочного бака.
2. Определяют количество теплоты, передаваемое от нагретой детали охлаждающей жидкости:

$$Q = g_д * (c_д^н * t_д^н - c_д^к * t_д^к)$$

$g_д$ – вес детали, $c_д^н$, $c_д^к$ средняя начальная и конечная теплоемкость материала детали, $t_д^н$ $t_д^к$ - начальная и конечная температура детали (800 и 100 ^oC для стали).

3. В соответствии с уравнением теплового баланса закалочного бака определяют необходимое количество охладителя:

$$Q = g_c * (c_c^н * t_c^н - c_c^к * t_c^к)$$

g_c – вес охлаждающей среды, $c_c^н$, $c_c^к$ средняя начальная и конечная теплоемкость охлаждающей среды (обычно равны), $t_c^н$ $t_c^к$ - начальная и конечная температура охлаждающей среды (20 и 40°C для воды)

4. Определяют объем закалочного бака $V_{бака}$

$$V_{бака} = V_{охл.жидк} + V_{дет} + V_{доп}$$

$V_{охл.жидк}$ – объем охлаждающей жидкости, $V_{дет}$ - объем детали, $V_{доп}$ - дополнительный объем жидкости для обеспечения минимальных расстояний от края жидкости до среза бака (минимум 100 мм), от верха детали до зеркала жидкости (минимум 100 мм), от дна до детали (минимум 100 мм) , от стенок до детали (минимум 50 мм).

5. По рассчитанному объему определяют внутренние габаритные размеры закалочного бака.

Маркировка механизированных баков:

- первая буква Б- закалочный бак;
- вторая буква – основной конструктивный признак (аналогично маркировке термических печей);
- третья буква – характер используемой среды (аналогично маркировке термических печей);
- цифры через тире –длина, ширина и глубина закалочного бака в дециметрах;
- через дробь – производительность бака в кг/час.

20. Грузоподъемные и транспортирующие механизмы

20.1. Универсальные механизмы

Перемещение изделий с операции на операцию производится с использованием грузоподъемных, подъемно-транспортных и транспортирующих механизмов**.** Грузоподъемные механизмы подразделяются на:

- домкраты (винтовые, реечные и гидравлические);
- лебедки (ручные и механические, реверсивные и нереверсивные, однобарабанные, многобарабанные и шпилевые);
- подъемники (шахтные, мачтовые, ковшовые, плунжерные);
- краны (мачтово-стреловые, башенные, автомобильные, самоходные, мостовые, козловые, кабельные).

Для подъема и транспортировки изделий применяют:

- погрузчики (ковшовые, вилочные);
- штабелеры;
- самоходные и несамоходные гидравлические тележки.

Основными критериями выбора подъемно-транспортного оборудования являются:

- грузоподъемность;
- скорость перемещения;

- габаритные размеры (от которых зависят необходимые технологические проходы);
- применяемый энергоноситель;
- цена.

Для выполнения подъемно-транспортных операций в термических цехах чаще всего применяют кран-балки, консольные и мостовые краны, различные виды погрузчиков и гидравлических тележек



Рисунок 123. Подвесная кран-балка (электротельфер) и консольный кран



Рисунок 124. Несамоходные гидравлические тележки и штабелеры

По виду применения в технологическом процессе транспортные механизмы подразделяются на:

- общезаводские (как правило, автомобильный транспорт);

- общецеховые (обычно различные типы электрокар);
- групповые (тележки с ручным перемещением);
- индивидуальные.



Рисунок 125. Электрокары

По степени специализации транспортные механизмы подразделяются на неспециализированные, выпускаемые серийно и специализированные, которые изготавливают индивидуально или собирают по агрегатному принципу.

20.2 Специализированные транспортные устройства

Гравитационные устройства. В гравитационных устройствах для перемещения изделий используется сила тяжести. Их применяют для транспортировки изделий, имеющих форму тел вращения или тел, не боящихся механического воздействия. Гравитационные устройства изготавливают в виде наклонных рольгангов, монорельсов и лотков и скатов с углом наклона незначительно превышающим угол трения. Это обеспечивает надежное перемещение изделие с приемлемой скоростью (не более 1,5 - 2,0 м/сек). Основным недостатком гравитационных механизмов является необходимость расположения оборудования на разных уровнях и использования механизмов принудительного подъема изделий.

Толкательные механизмы используют для горизонтального перемещения поддонов с изделиями (реже изделий), через печи и другое термическое оборудование.

- Рычажные толкатели применяют для транспортировки относительно легких изделий при небольших перемещениях и малых скоростях толкания (рис. 126). Они имеют ограниченный ход башмака (до 500 мм). Прямой и обратный ход в этих механизмах, как правило, происходит без реверса электродвигателя.
- В рычажных толкателях с кулисным механизмом скорость прямого и обратного движения башмака неодинакова, при этом возможна регулировка хода башмака.
- Толкатели с цепным механизмом предназначены для перемещения легких изделий на большие расстояния. Они достаточно компактны и имеют относительно низкую стоимость.
- Пневматические или гидравлические толкающие устройства развивают значительные усилия и способны перемещать массивные изделия. Они обладают простотой регулирования рабочего хода и скорости перемещения, однако дороги в изготовлении и эксплуатации и малонадежны.
- Винтовые толкатели создают значительные усилия в при больших перемещениях башмака. Они более просты по сравнению с гидро и пневмомеханизмами, однако плохо работают на сжатие, имеют медленный реверс и малую скорость.
- Реечные толкатели обладают высокой скоростью перемещения и простотой конструкции, однако имеют малую жесткость и требуют высокомоментного редуктора для обеспечения большого крутящего момента.
- Фрикционные толкатели обладают высокими скоростями проталкивания (до 30 м/мин) при больших перемещениях башмака (до 5 м), при этом усилие проталкивания невелико.

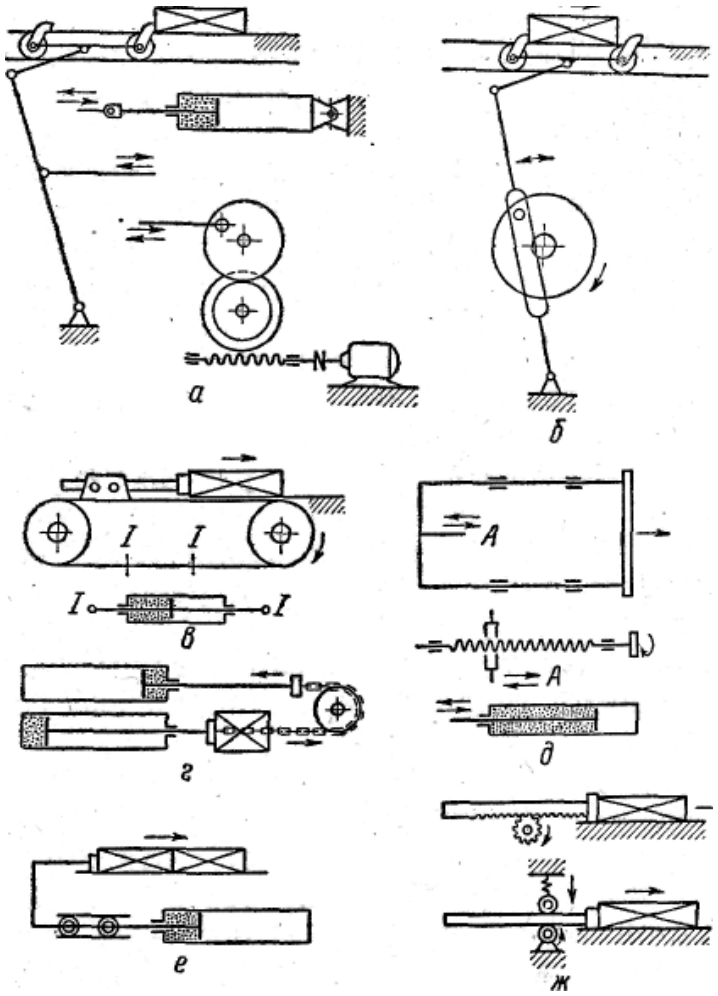


Рисунок 126. Схемы толкательных механизмов: а - рычажные; б - кулисные; в - цепные; г - для перемещения поддонов в два ручья; д - винтовые и гидравлические; е - гидравлические со смещением штока относительно плоскости толкания; ж - реечные и фрикционные.

Конвейерные механизмы относятся к наиболее удобному в использовании, при этом наиболее дорогому виду транспортирующих устройств. Они состоят из несущих элементов, тяговых элементов, опорных элементов и привода. В зависимости от типа несущих элементов конвейерные механизмы подразделяются на ленточные, цепные, пластинчатые, сетчатые. Тяговым элементом (в том случае, если он не выполняет несущую функцию) являются цепи, которые могут быть сварными, литыми, пластинчатыми, разборными и т.д. Опорными элементами в ленточных, пластинчатых, сетчатых и других конвейерах являются ролики или катки. Приводными устройствами являются электродвигатели с

редукторами. Основными достоинствами конвейерных механизмов являются простота переналадки с одного типа изделий на другой, легкость изменения плотности грузопотока. Очень часто конвейеры выполняют функцию складов. Приводными устройствами конвейеров являются электродвигатели с редукторами. К недостаткам конвейеров следует отнести значительный собственный вес, сложность изготовления и ремонта, а также значительные затраты на приобретение, монтаж и эксплуатацию.

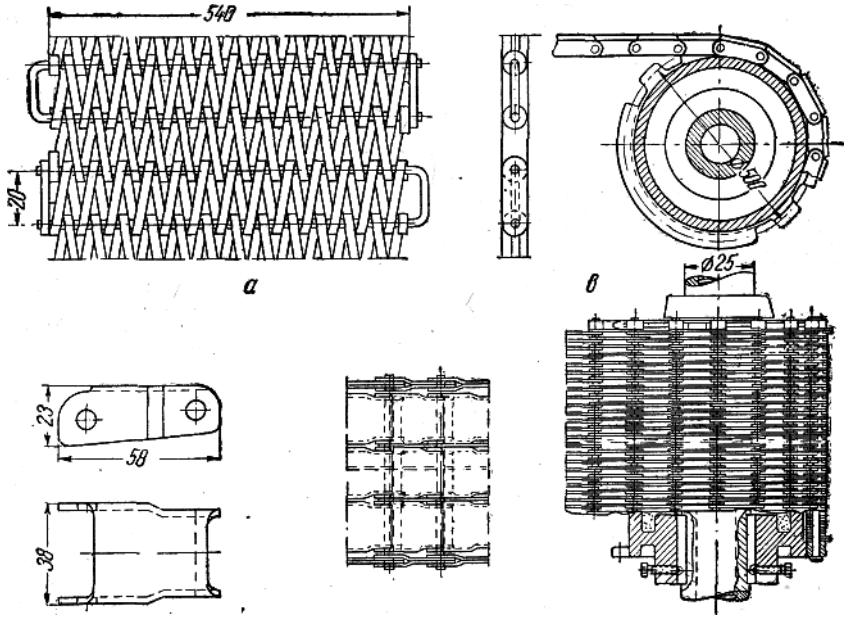


Рисунок 127. Конструкции некоторых несущих элементов конвейера:
а - сетчатый; б - из штампованных звеньев; в - из пластин

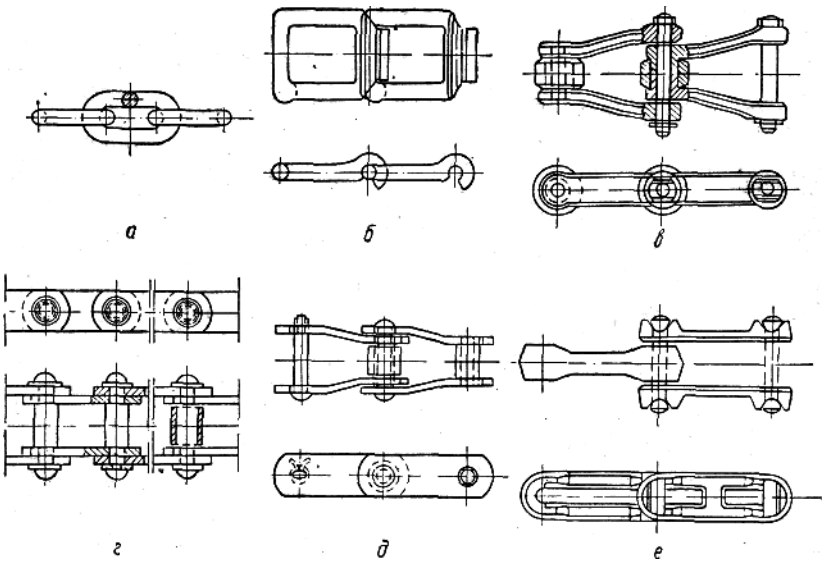


Рисунок 128. Конструкции тяговых элементов конвейера: а - сварная цепь; б - крючковая цепь; в - комбинированная цепь; г - пластинчатая цепь; д - втулочная роликовая цепь; е - разборная цепь.

Шнековые механизмы применяют для транспортировки мелких или сыпучих материалов. Они подразделяются на собственно шнеки (транспортировку осуществляют посредством вращения шнекового винта) и транспортирующие трубы (перемещение изделий осуществляют вращением трубы с наваренной на внутреннюю поверхность обечайкой в виде спирали Архимеда). Чаще всего применяют шнековые трубы, которые не обладают эффектом заклинивания. Достоинства шнековых механизмов - эффективное перемещение сыпучих материалов и изделий, в том числе вверх по углом до 30°, сопровождающееся их перемешиванием. Основной недостаток шнековых механизмов заключается в возможной деформации изделий в процессе транспортировки и невозможность перемещения крупногабаритных деталей и изделий сложной формы.

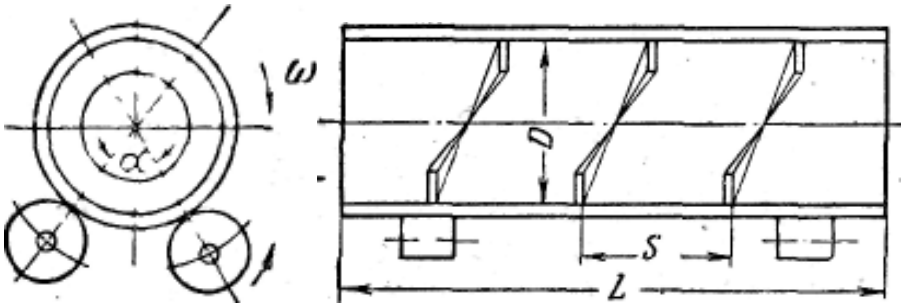
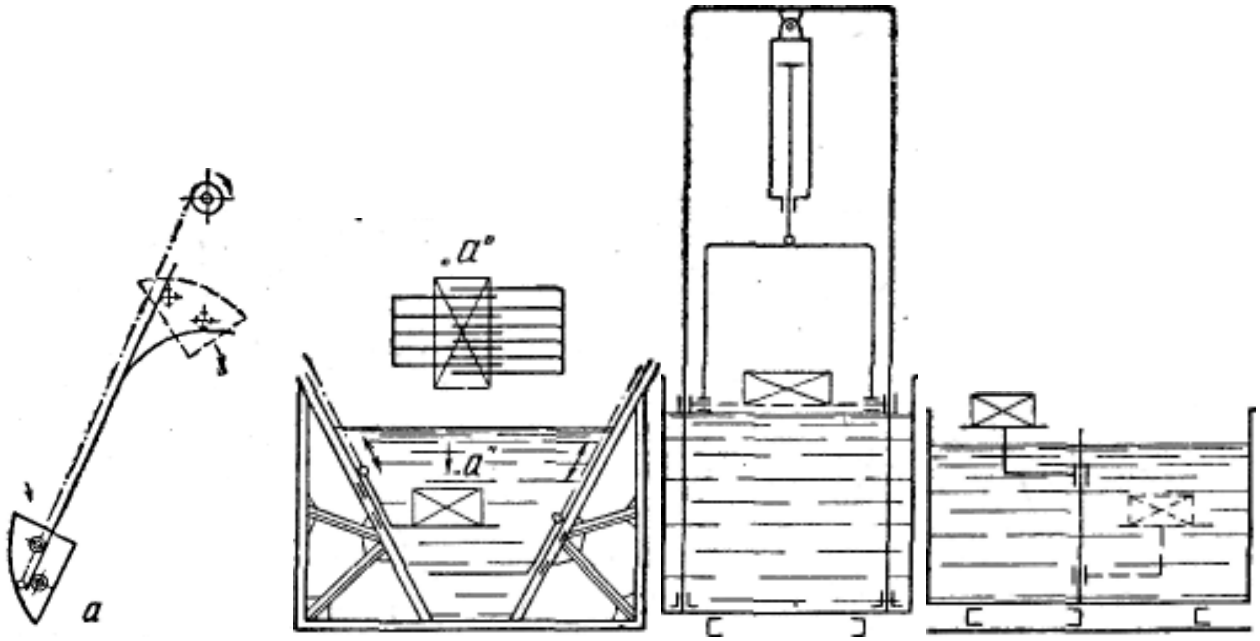


Рисунок 129. Шнековая труба

Элеваторные механизмы предназначаются перемещения изделий с одного уровня на другой в вертикальном направлении. Наибольшее распространение в термических цехах получили ковшового типа и платформенные подъемники. В качестве приводов для перемещения может быть применен гидро, пневмо или электропривод.



а б в г

Рисунок 130. Схемы элеваторных механизмов. а - с поднимающимся и опрокидывающимся ковшом; б - с подъемной решетчатой платформой; в - с гидравлической платформой; г- с подъемной и поворачивающейся платформой

Вибрационные механизмы (рис 131 а) предназначены для транспортировки мелких изделий или сыпучих материалов. Перемещение реализуется за счет:

- разности скоростей прямого и обратного перемещений;
- препятствий на пути движения в обратном направлении;
- угла наклона рабочего органа в направлении движения;
- включения электромагнитов в момент перемещения (в этом случае возможно перемещение под углом в вертикальном направлении).
-

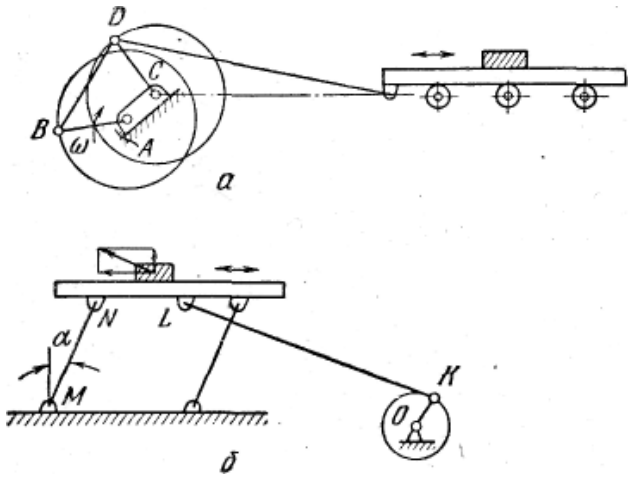


Рисунок 131. Схемы вибрационного (а) и шагающего (б) механизмов

Шагающие конвейеры (рис 131б) применяют для периодического прямолинейного перемещения штучных грузов. Линия шагающего конвейера состоит из неподвижных наружных швеллеров и внутренних подвижных швеллеров, связанных в единую раму. С помощью рычажно-эксцентрикового механизма рама может подниматься или опускаться. Благодаря такому устройству установленные на неподвижные швеллеры детали или поддоны с изделиями поднимаются подвижной рамой, перемещаются по горизонтали на один шаг, а затем опускаются на неподвижную раму.

Часто транспортные механизмы выполняют функцию промежуточных бункеров (изделия засыпаются навалом), магазинов (изделия укладываются в заданном порядке) и складов (изделия складывают на длительное хранение). Важную роль накопители играют для синхронизации операций в автоматических линиях термической обработки. Емкость и расположение промежуточных бункеров и магазинов определяются степенью рассогласованности в выдаче изделий.

20.3 Выбор подъемно-транспортных механизмов

В условиях массового и крупносерийного производства с постоянными грузопотоками изделий целесообразно применение деталей с помощью

конвейеров различного типа - ленточных, цепных, роликовых и др., которые позволяют транспортировать грузы по сложным траекториям. Для перемещения грузов массой до 250 кг применяют монорельсы. При небольших грузопотоках перемещение крупногабаритных изделии производят кран-балками. Мостовые краны используют для транспортирования тяжелых садок при обработке их в колпаковых печах, в печах с выдвижным подом, а также при обработке длинномерных изделий: рельсов, труб, и т.д., нагреваемых в подвешенном состоянии в вертикальных (шахтных) печах. Электрические погрузчики и электрокары широко используют транспортирования грузов в цехах и для межцехового перемещения. Напольные загрузочные машины предусматривают для выполнения загрузочно-выгрузочных и передаточных приемов. Автотранспорт используют главным образом для межцехового перемещения грузов. Железнодорожный транспорт применяют для перевозок тяжелых изделий и больших садок общей массой свыше 60 т в смену.

21. Автоматическое управление процессами тепловой обработки

21.1. Элементы систем автоматического управления

Системы автоматического управления (САУ) предназначены для управления производственными процессами и контроля их параметров без непосредственного участия человека. Под управлением понимают процесс организации такого целенаправленного воздействия на объект управления, в результате действия которого последний переходит в требуемое состояние. Более частным случаем понятия "управление" является понятие "регулирование" при котором выравниваются все отклонения на выходе системы от заданного значения этого состояния. Обеспечение требуемых значений параметров технологического процесса без участия человека, осуществляется системой автоматического регулирования. Термическое оборудование является объектом управления со значительными показателями инерционности, поэтому невозможно мгновенное

изменение выходной переменной вслед за управляющим воздействием. При изменении управляющего воздействия возникает ***переходный процесс,*** в течение которого температурный режим печи не будет соответствовать требуемому значению. Характер переходного процесса определяется динамическими свойствами объекта управления и закона изменения управляющего воздействия. Для решения этой задачи используются разнообразные управляющие устройства или регуляторы. ***Управляющим устройством*** называется устройство, обеспечивающее формирование управляющего воздействия на объект управления, соответствующего алгоритму его работы. Устройство, выполняющее эти функции без непосредственного участия человека, называется автоматическим управляющим устройством или регулятором. Совокупность объекта управления и управляющего устройства, взаимодействие которых приводит к выполнению поставленной цели, называется системой автоматического управления. САУ включают в себя следующие элементы:

- датчик (чувствительный элемент, измерительный элемент) - предназначен для измерения фактического значения регулируемой величины и преобразования в сигнал управления;
- задающее устройство (задатчик) которое задает требуемое значение регулируемой величины или закон ее изменения;
- орган сравнения, который сравнивает фактическое и заданное значение;
- регулятор, формирующий закон управления;
- усилитель, предназначенный для усиления сигнала мощности;
- исполнительный элемент –устройство, с помощью которого регулятор оказывает воздействие на процесс.

Существует большое разнообразие систем автоматического регулирования, которые можно классифицировать по принципам управления.

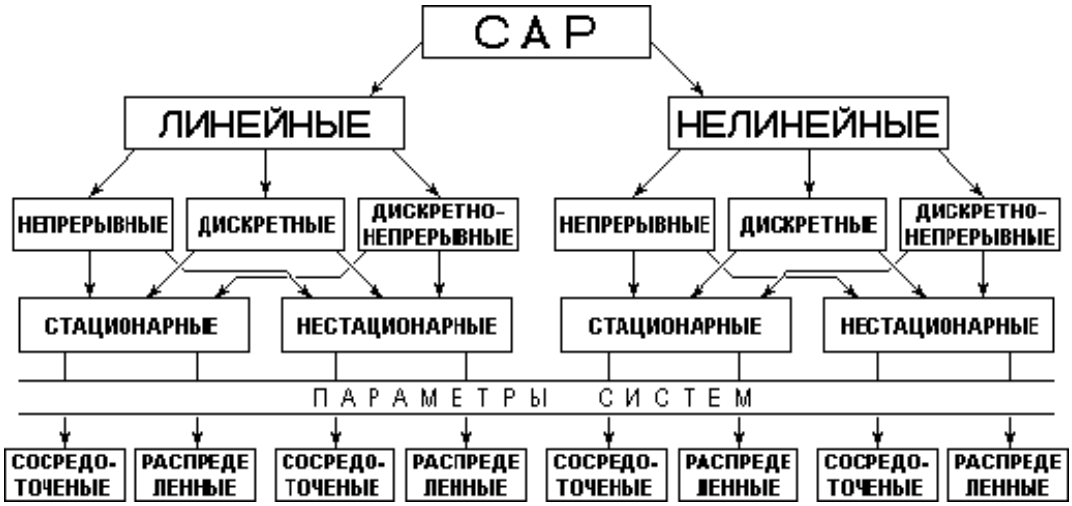


Рисунок 132. Классификация систем автоматического регуолиования

21. 2 Принципы автоматического управления

Принцип управления составляет основу функционирования любой системы автоматического регулирования. Под принципом управления понимают правило формирования управляющим устройством управляющего воздействия на основании данных о величине воздействий приложенных к системе и реакции системы на них. В технике автоматического управления нашли применение два основных принципа управления, а так же различные комбинации, сочетающие разомкнутые и замкнутые системы. Каждый из них реализуется определенным устройством управления и соответствующей структурой САР.

Принцип управления по отклонению (Уатта-Ползунова). Датчик измеряет выходной сигнал, элемент сравнения определяет сигнал рассогласования с заданной величиной и формирует регулирующее воздействие с целью устранения сигнала рассогласования. Основное преимущество таких систем высокая точность. Основной недостаток – низкое быстродействие, т.к система реагирует не на причину, а на следствие, поэтому для выработки управляющего воздействия необходим значительный сигнал рассогласования.

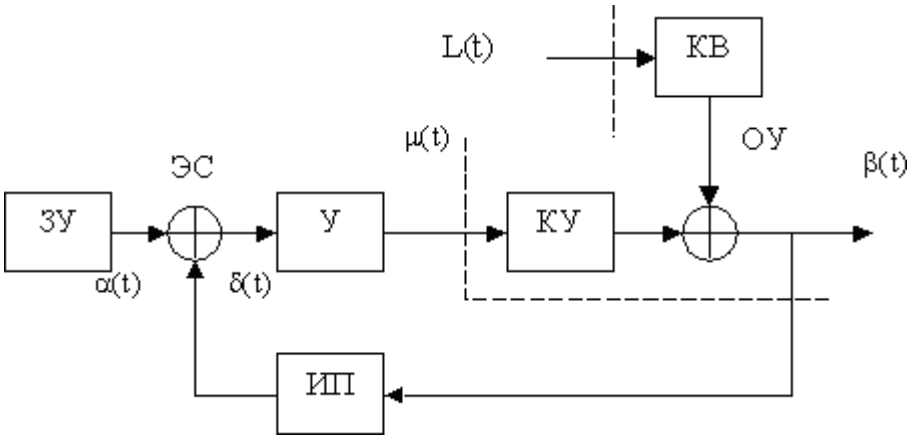


Рисунок 133. Структурная схема САУ, построенной на базе принципа управления по отклонению.

В САУ, использующей такой принцип управления, входят следующие основные элементы:

- задающее устройство (ЗУ), необходимое для реализации алгоритма работы объекта управления, выражающего в формировании управляющего воздействия;
- измерительный преобразователь (ИП), обеспечивающий измерение управляемой координаты;
- элемент сравнения (ЭС), выявляющий отклонение управляемой координаты от ее требуемого значения;
- промежуточный усилитель (У), обеспечивающий формирование требуемого закона управления ОУ;
- объект управления (ОУ);
- канал возмущения (КВ);
- канал управления (КУ).

Принцип работы САУ заключается в измерении управляемого параметра с помощью ИП и сравнении полученного сигнала с задающим. Элемент сравнения выявляет разность этих сигналов, представляющую ошибку управления. Этот сигнал используется для формирования управляющего воздействия на ОУ. Выходная координата является функцией, как задающего сигнала, так и своего собственного значения.

Принцип управления по возмущению (Понселе –Чиколева). Датчик измеряет возмущающее воздействие и формирует корректирующий сигнал на объект управления. Основное достоинство систем такого типа -высокое быстродействие, Основной недостаток – низкая точность, так как возникнуть неконтролируемые возмущения, не предусмотренные каналом корректирующего воздействия.

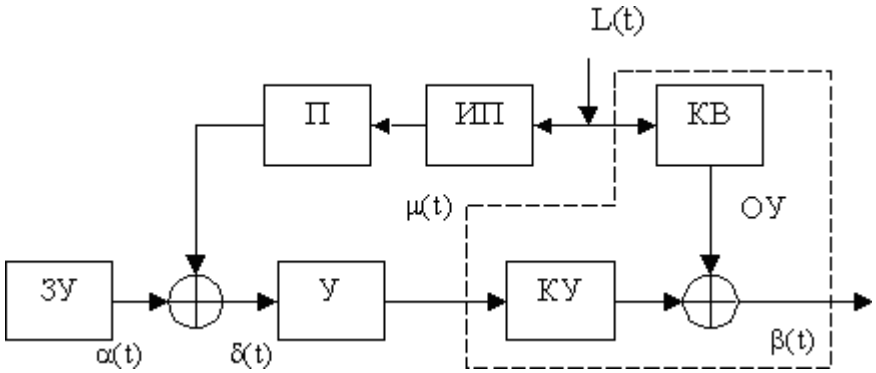


Рисунок 134. Структурная схема САУ построенной на базе принципа управления по возмущению

В САУ, использующих принцип отклонения по возмущению, входят следующие элементы:

- задающее устройство (ЗУ), необходимое для реализации алгоритма работы объекта управления, выражающего в формировании управляющего воздействия;
- измерительный преобразователь (ИП), обеспечивающий измерение выбранного возмущения на объект управления;
- функциональный преобразователь (П), формирующий необходимую по условиям работы САУ статическую характеристику тракта измерения.
- промежуточный усилитель (У), обеспечивающий формирование требуемого закона управления ОУ;
- объект управления (ОУ);
- КВ – канал возмущения;
- КУ – канал управления.

По виду САУ подразделяются на:

- разомкнутые. Выходная величина не измеряется и не используется для коррекции управляющего воздействия. Частный вид – компенсационные системы, когда измеряется величина возмущающего воздействия (массы садки) и вырабатывается компенсирующий сигнал на исполнительные механизмы;
- замкнутые. Выходная величина используется для коррекции управляющего воздействия через цепь обратной связи. Частный вид – комбинированные системы (замкнутые + компенсационные).

Преимущества замкнутых систем:

- полная компенсация ошибок управления, вызываемых основными возмущающими факторами;
- уменьшение ошибок управления, вызываемых неизмеряемыми возмущающими факторами;
- меньшая чувствительность к изменению параметров по сравнению с разомкнутыми САУ;
- менее жесткие требования на величину коэффициента передачи замкнутой САУ, что снижает проблему обеспечения устойчивости системы.

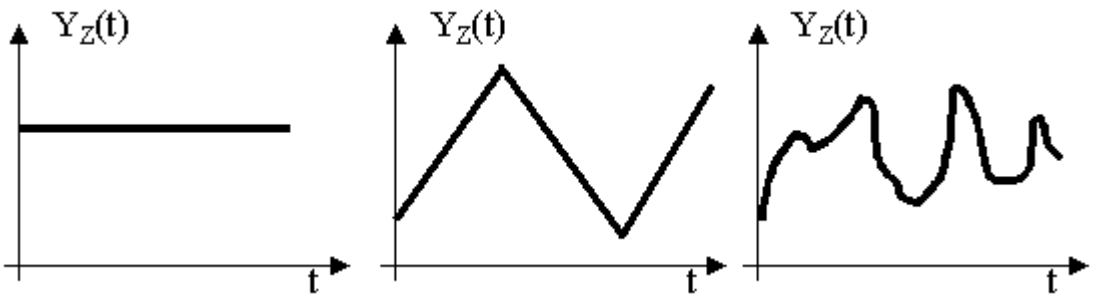
Недостатки замкнутых систем:

- конструктивная сложность САУ, связанная с наличием большого числа каналов управления;
- сложность настройки САУ, обусловленная теми же причинами.

По характеру задающего воздействия САУ подразделяют на:

- системы стабилизации, которые требует постоянства вектора выходного состояния и равенство его заданному значению;
- программного управления, для которых характерно изменение вектора выходного состояния по известному закону или программе. В этом случае заданное значение вектора выходного состояния является известной функцией времени;

- следящие, у которых работа характеризуется тем, что требуемый закон изменения вектора выходного состояния объекта заранее неизвестен (рис.135).



Стабилизации Программный Следящий

Рисунок 135. Алгоритмы функционирования ОУ.

В зависимости от количества регулируемых величин САУ подразделяют на:

- одномерные;
- многомерные (со связанными и несвязанными параметрами).

По характеру изменения управляющего воздействия САУ подразделяют на:

- непрерывные;
- дискретные (хотя бы одно звено дискретно);
- импульсные.

По виду управляющего воздействия САУ подразделяют на:

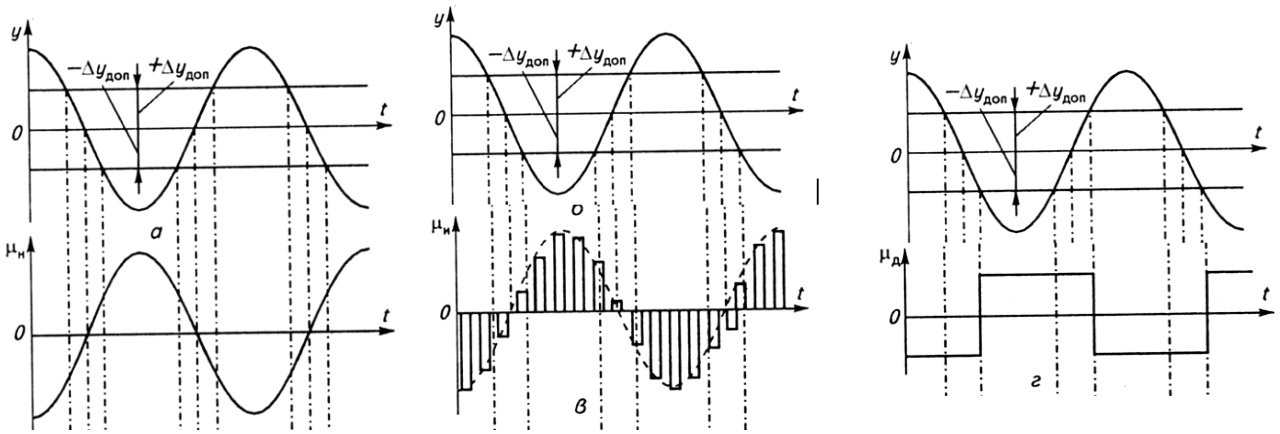
- линейные;
- нелинейные.

21.3. Датчики автоматических систем

По характеру изменения выходного сигнала все датчики подразделяются на:

- аналоговые (непрерывные) датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал, пропорционально изменению входной величины. Они более точны, но и более чувствительны к помехам.

- релейные (дискретные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: «включено/ выключено». Выходная величина изменяется скачкообразно.
- импульсные, генерирующие дискретные импульсы определенной величины или определенную последовательность импульсов.



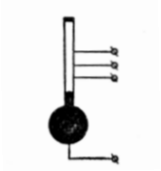
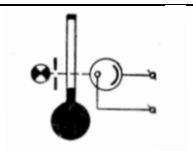
а б в

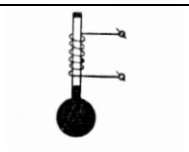
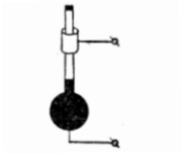
Рисунок 136. Аналоговые (а), импульсные (б) и релейные датчики (в).

Датчики, основанные на тепловом расширении жидкости (термометры)

Наиболее распространенными и простыми приборами для измерения температуры являются жидкостные термометры расширения. Принцип их действия основан на использовании изменения объема жидких тел. Различные коэффициенты объемного расширения жидкости в капиллярной трубке позволяют измерять температуру от -100 до 500 °С. Устройство некоторых типов датчиков приведено ниже.

Основные виды датчиков

Схема датчика	Краткая характеристика
	Датчик температуры с скачкообразным измнением электросопротивления при замыкании ртутью впаянных в стекло контактов.
	Датчик температуры с изменением освещенности фотоэлемента при изменении уровня непрозрачной жидкости

	Датчик температуры с измененииеи индуктивного сопротивления при изменении уровня ртути.
	Датчик температуры с изменением электрической емкости между электродом и столбом ртути

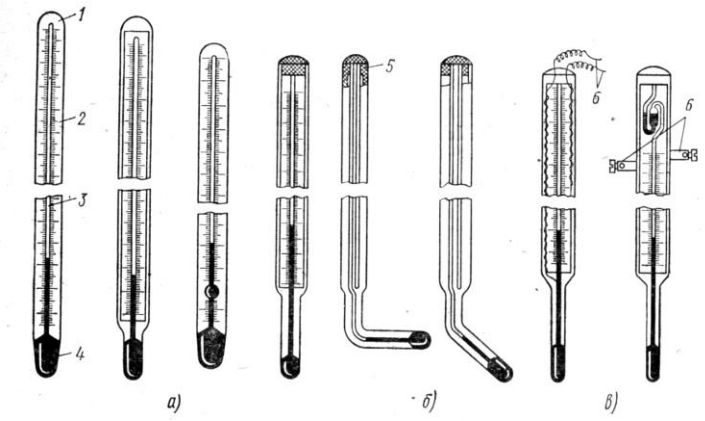


Рисунок 137. Прямые угловые и контактные ртутные термометры.

Достоинства датчиков, основанных на тепловом расширении жидкости:

- простота;
- надежность:
- отсутствие внешних источников питания.

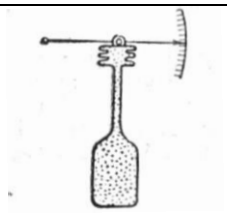
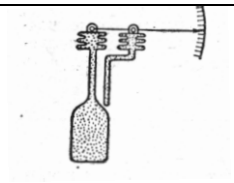
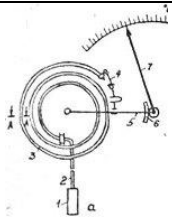
Недостатки:

- низкая точность (погрешность измерения 1 - 2,5%);
- малый температурный диапазон эксплуатации;
- высокая тепловая инерционность (до нескольких минут);
- невозможность эксплуатации в условиях динамических нагрузок и вибрации;
- ртутные термометры токсичны.

Датчики, основанные на тепловом расширении газов (манометрические термометры)

Манометрические термометры подразделяются на датчики сильфонного, мембранного или пружинного типа. Они бывают газовые (заполнены воздухом, азотом или гелием), или паровые (спиртами или фреонами). Паровые датчики более точны, при этом имеют более узкий диапазон рабочих температур.

Основные виды датчиков

Схема датчика	Краткая характеристика
	Датчик или реле. Система заполняется газом. При изменении температуры происходит расширение сильфона и перемещение стрелки или контактнгой группы
	Датчик или реле. Система заполняется газом и имеет компенсатор для уменьщения влияния атмосферного давления. При изменении температуры происходит перемещение стрелки или контактнгой группы
	Датчик или реле. Система заполняется газом. При изменении температуры происходит раскручивание (ракручивание) спиральной трутки, перемещение стрелки и (или) замыкание (размыкание) контактнгой группы

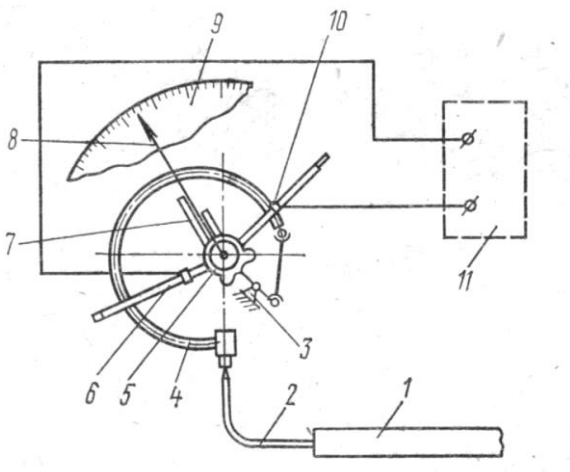


Рисунок 138. Манометрический термометр пружинного типа – термобаллон, 2 каппилярая трубка, 3- сектор, 4- манометрическая пружина, 5-трибка, 6-10 установочные контакты, 7- поводок, 8- стрелка, 9- шкала, 11- клемник

Достоинства манометрических терсометров:

- простота;
- надежность:
- отсутствие внешних источников питания;
- виброустойчивость

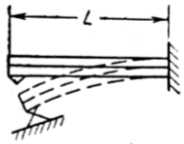
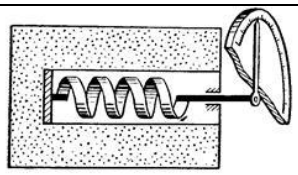
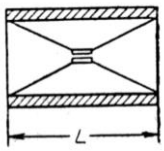
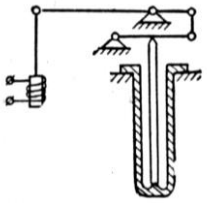
Недостатки манометрических термометров:

- низкая точность (погрешность измерения 1,5 - 2,5 %);
- малый рабочий диапазон (-60…….+400°C);
- чувствительны к перепадам давления;
- чувствительны к ударам и механическому воздействию (меняют рабочий объем или теряют герметичность);
- высокая тепловая инерционность (выше чем у жидкостных).

Датчики, основанные на тепловом расширении твердых тел

Действие дилатометрические термометров данного типа основано изменении стержня при его нагреве. Принцип действия биметаллических термометров основан на упругой деформации, возникающей под воздействием температуры двух прочно соединенных металлических пластин, имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения. При изменении температуры биметалл изгибается в сторону материала с меньшим коэффициентом линейного расширения. Изгиб пластины с помощью кинематического узла преобразуется во вращательное движение стрелки, показывающей измеряемое значение температуры по шкале термометра.

Основные виды датчиков

Схема датчика	Краткая характеристика
	Биметаллическая пластина на концах конце которой закреплены контактные группы. При нагреве, вследствие разности ТКЛР материалов, пластина изгибается и подвижной контакт прижимается к неподвижному, замыкая электроцепь. Пределы измерений от -30 до +100 ^{o}C
	Биметаллическая спираль на концах конце которой закреплены контактные группы. При нагреве, вследствие разности ТКЛР материалов, спираль сворачивается или разворачивается и подвижной контакт прижимается к неподвижному, замыкая электроцепь. Пределы измерений от -30 до +200 ^{o}C
	Латунная трубка внутри которой помешают инваровые пластины с контактами. При нагреве меняется угол изгиба пластин. Пределы измерений от +50 до +250 ^{o}C
	Дилатометрический стержневой датчик с рычажной системой. Пределы измерений от -30 до +1000 ^{o}C

Достоинства дилатометрических датчиков:

- простота;
- надежность;
- не требуют источников питания;
- способны размыкать силовую цепь питания.

Недостатки дилатометрических датчиков:

- низкая точность (погрешность измерения до 2%);
- недостаточный температурный диапазон измерения (-100….+1000 ^{o}C-для дилатометров, до +100 ^{o}C – для биметаллических контакторов).

- плохо работают в условиях вибрации;
- высокая тепловая инерционность (при этом инерционность меньше чем жидкостных и газовых термометров).

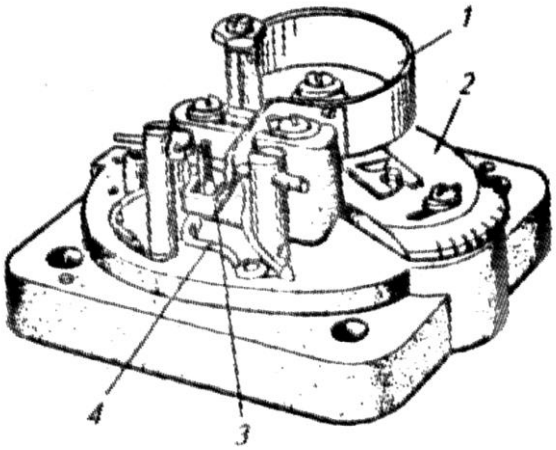


Рисунок 139. Конструкция биметаллического регулятира. 1- биметаллическая спираль , 2- шкала настройки, 3 и 4 контакты.

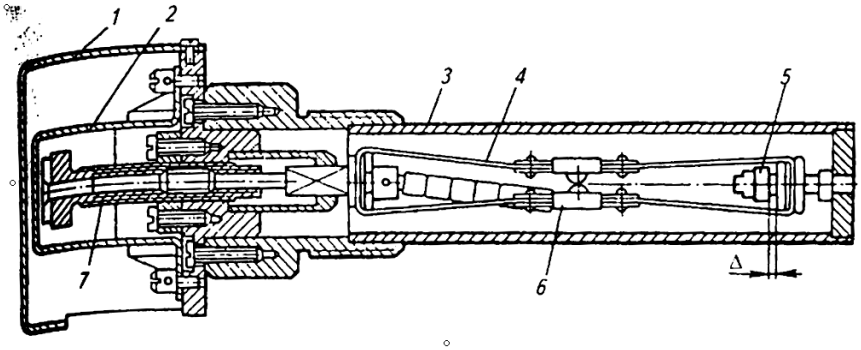


Рисунок 140 . Дилатометрически датчик температуры. 1- защитный стержень, 2- колпачек регулировочноного винта, 3- латунная трубка, 4- пружины, 5- стержень, 6- контакт, 7- регулировочный винт.

Датчики основанные на изменении сопротивления проводников (термосопротисления) и полупроводников(термисторы)

Термометром электрического сопротивления называется проводник или полупроводник с большим температурным коэффициентом сопротивления, находящийся в теплообмене с окружающей средой. Проводниковые термосопротивления изготовляют из чистых металлов. Большинство химически чистых металлов обладает положительным температурным коэффициентом

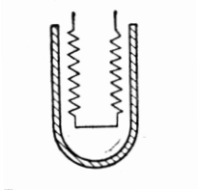
сопротивления, изменяющимся на 0,35 - 0,68 % при нагреве на 1 градус в интервале температур от 0 до 100°С. Для изготовления термометров сопротивлений наиболее широко применяют платину, медь и никель. Термосопротивления изготавливаются из тонкой металлической проволоки, намотанной на диэлектрик (слюда, фарфор). Термометры сопротивления обладают высокой чувствительностью (до 0,4% на 1 °С). По показателям инерционности термосопротивления подзазделяются на

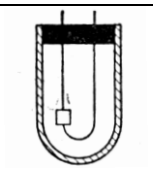
- малоинеционные (до 9 с). Обычно изготавливаются без защитного кожуха;
- среднеинерционные (10 – 80 с);
- высокоинерционные (до 4 мин)

Наибольшее распространение получили термометры сопротивления, изготовленные из медной проволоки диаметром 0,1…0,2 мм (маркировка ТСМ,) с рабочим диапазоном тмператур от -50 до +180 °С. Менее распространены термометры сопротивления, изготовленные из платиновой проволоки диаметром 0,05…0,07 мм (маркировка ТСП). Температурный диапазон эксплуатации термосопротивленй ТСП составляет от -200 до +650 °С.

Полупроводниковые термосопротивления (термисторы) изготовляют из смеси оксидов, боридов и сульфидов тугоплавких металлов (Co, Mn). В процессе изготовления термисторы подвергают обжигу при высокой температуре. При обжиге окислы спекаются в прочную массу, образуя химическое соединение. Термисторы более чувствительны (измнение сопротивления на 3..5% при изменеии температуры на 1 °С) и более компактны. При этом они обладают меньшей стабильностью свойств и нелинейной зависимостью сопротивления от температуры.

Основные виды датчиков

Схема датчика	Краткая характеристика
	Датчик. При изменении температуры металлической проволоки происходит увеличение ее электросопротивления

	Датчик. При изменении температуры полупроводника происходит снижение его электросопротивления

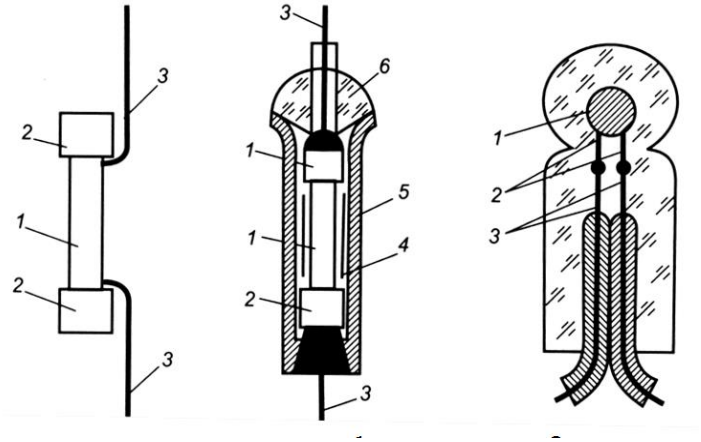


Рисунок 142. Конструкция термисторов. 1- стержень, 2- контактный колпачек, 3- токоотвод, 5- корпус, 6- стеклянный изолятор.

Достоинства термометов сопротивления:

- высокая чувствительность и точность;
- способность работать при низких температурах (-200…+600 ^{o}C).

Недостатки:

- низкая стабильность свойств и ограничнный ресурс работы;
- большие габаритные размеры;
- необходимость дополнительных источников питания и регистрирующей аппаратуры.

Датчики, основанные на явлении Термо Э.Д.С.(термопары)

Принцип действия датчиков основан на эффекте открытом Зеебеком в 1826 г. В замкнутой электрической цепи, образованной двумя разнородными проводниками, возникает термо ЭДС, пропорциональная разности температур спаев. Термо ЭДС не изменится от введения в цепь третьего проводника, если

температура на его концах одинакова, т.е в цепь можно подключать измерительный прибор. Особенности применения термопар.

- Способ соединения рабочего конца термопары (спайка, сварка, скрутка) не имеет значения, если обеспечивается надежный контакт.
- Термопара показывает не температуру среды, а перепад температур между рабочим концом и свободными концами. Тетпопары градуируются, когда свободные концы находятся при 0 ^{o}C, т.е. необходимо учитывать погрешность измерения с учетом реальной на температуры свободных концов.

Основные требования к термопарам.

1. Высокая термо ЭДС.
2. Пропорциональность зависимости термо ЭДС от температуры.
3. Стабильность свойств.
4. Высокая жаростойкость.
5. Малый температурный коэффициент сопротивления.
6. Возможность изготовления большими партиями с неизменными физическими свойствами.

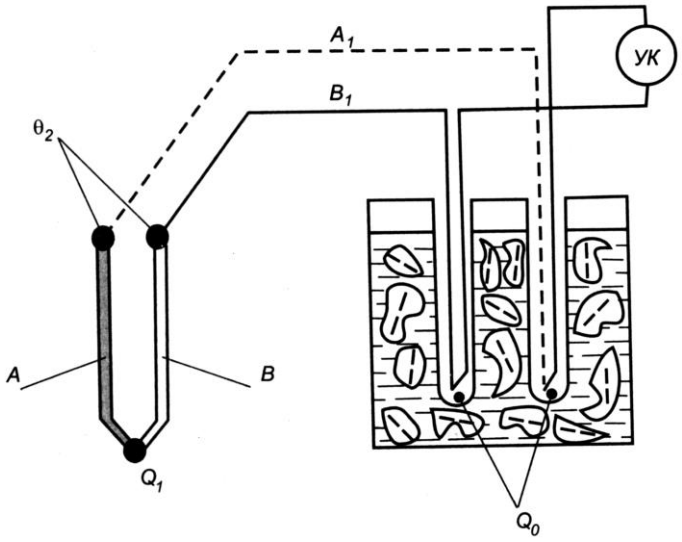


Рисунок 143. Схема включения термомары с компенсацией температуры свободных концов при помощи емкости с холодной водой со льдом.

Основные материалы, применяемые для изготовления термопар

Таблица 44. Алюмель. Химический состав, % :

C	P	Co	Mn	Si	Cr	Al	Fe	Ni
<0.10	< 0.20	0.6–1.2	1.8–2.7	0.8–1.5	–	1.6–2.4	<< 0.30	баланс

Удельное электрическое сопротивление 0,32 мкОм·м; температурный коэффициент линейного расширения $13{,}7 \cdot 10^{-6}$ C^{-1}; плотность 8480 кг/м^3; температура плавления 1430 - 1450 °C.

Таблица 45. Хромель. Химический состав, % :

C	P	Co	Mn	Si	Cr	Al	Fe	Ni
< 0.20	< 0.20	0.6–1.2	< 0.30	< 0.40	9.0–10.0	< 0.15	< 0.30	баланс

Плотность сплава 8710 кг/м^3; температура плавления 1400 - 1500 °C; температурный коэффициент линейного расширения $12{,}8 \cdot 10^{-6}$ C^{-1}; удельное электрическое сопротивление 0,66 мкОм·м.

Таблица 46. Копель. Химический состав, % :

Ni	Mn	Cu
43	0,5	основа

Плотность сплава 8900 кг/м^3; температура плавления 1220 - 1290 °C; температурный коэффициент линейного расширения $14 \cdot 10^{-6}$ C^{-1};. удельное электрическое сопротивление 0,5 мкОм·м. Из всех медноникелевых сплавов Копель обладает максимальной термоэлектродвижущей силой в паре с хромелем (около 6,95 мв при 100°C, 49,0 мв при 600.°C). Применяется главным образом в пирометрии в качестве отрицательного термоэлектрода термопар при измерении температур до 600.°C

Таблица 47. Константан. Химический состав, % :

Co + Ni	Al	Zn	Cu	Si	Cr	Ti	Fe	Mn
39.0-41.0	-	-	баланс	0.10	-	-	0.50	1.0 – 2.0

Сплав имеет высокое удельное электрическое сопротивление около 0,5 мкОм·м, минимальное значение термического коэффициента электрического

сопротивления, высокую термоэлектродвижущую силу в паре с медью, железом, хромом. Температурный коэффициент линейного расширения $14{,}4 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Плотность 8800 - 8900 кг/м3, температура плавления около 1260 °C. Хорошо поддаётся обработке. Применяется для изготовления термопар, реостатов и электронагревательных элементов с рабочей температурой до 400 - 500 °C,

Таблица 48. Основные характеристики термопар, применяемых в диапазоне температур до 1300 °C

Наименование	Обозначение	Рабочая температура, °C		Термо ЭДС, мВ при 100 °C
		Кратковременный нагрев	Длительная эксплуатация	
Хромель-Алюмель	ХА	1300	1000	4,1
Хромель-Копель	ХК	800	600	6,95
Железо-Константан	Ж	800	600	5,15
Медь-Константан	М	500	350	4,15

Таблица.49. Основные характеристики высокотемпературных термопар

Наименование	Обозначение	Рабочая температура, °C		Термо ЭДС, мВ
		Кратковременный нагрев	Длительная эксплуатация	
Платинородий (30%)-платинородий (6%)	ПР 30/6	1800	1500	10 мВ (1500 °C)
Дисилицид молибдена-дисидицид вольфрама	ТМСВ - 340М	1800	1650	10 мВ (1000 °C)
Вольфрамрений	ТВР 5/20	2500	1800	16,5 мВ

(20%)- волфрамрений (5%)				(1000 °С)
Графит- борид циркония	ТГБЦ - 350М	2200	2000	90 мВ (2000 °С)
Графит – карбид титана	ТГКТ – 360М	2500	2300)	78 мВ (2500 °С)

Таблица 50. Показатели тепловой инерции некоторых типов термопар

Тип преобразователя	Предел измерений, °С	Показатель тепловой инерции, с
ТХА-775	0 … +600	2
ТХА-0515	-50…+600	20
ТХА-0806	0…+1000	210
ТХА-1479	0…+750	60
ТХК-301	0…+200	5
ТХК-0063	0…+550	40
ТХК-0083	0…+300	20
ТХК-1479	0…+600	60
ТХК-0806	0…+600	210

Для защиты от атмосферы и механического воздействия промышленные термопары помещаются в чехол и изолируются от стенок керамическими бусами, засыпками или при работе в агрессивных средах заливаются жидким стеклом. Однако при этом могут значительно увеличиваться показатели тепловой инерционности термопары (таблица 50). Показатель тепловой инерции - это время задержки, с которым термопара фиксирует изменение температуры. Данный показатель является очень важным при регулировании температуры быстропротекающих процессов. Для уменьшения тепловой инерции конец термопары может быть заделан в наконечник чехла. Материал чехла зависит от температуры эксплуатации термопары. Для термопар, эксплуатируемых при температуре до до 400 °С применяют углеродистые стали, до 900 °С - используют

жаростойкие стали. Чехлы термопар, эксплуатируемых при температуре свыше 900 °С обычно изготавливают из оксидной керамики.

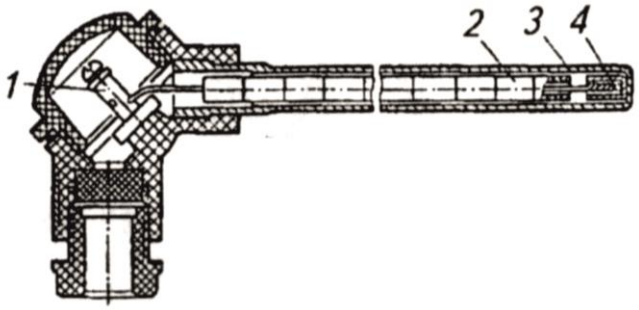


Рисунок 144. Конструкция термопары 1- клемма 2- изолятор, 3-защитный чехол, 4- горячий спай

Измерение излучения нагретых тел (пирометры)

Принцип работы пирометров основан измерения яркости излучения объекта, которая прямо пропорциональна температуре. Основным узлом пирометра, является датчик, который преобразует тепловую энергию в электрический сигнал (ток или напряжение). Тепловой луч фокусируется оптической системой, получившийся на выходе датчика сигнал обрабатывается, и используется автоматическим регулятором для поддержания заданной температуры объекта измерения. Пирометры целесообразно применять, когда невозможно соприкосновение датчика с объектом измерения вследствие высокой температуры;труднодоступности места; движения объекта; агрессивности среды. В диапазоне температур от 500 до 1500 °С возможна фиксация температуры объекта визуальным способом (таблица 51) В области более низких температур может быть использована шкала оценки температуры отпуска стали по цветам побежалости (таблица 52).

Таблица 51. Визуальная шкала температур

Шкала температур

Температура, °С	Цвет
1600	Бело-голубой
1400	Ярко -белый
1200	Желто-белый
1000	Лимонно-желтый
940	Ярко-кровавый
840	Светло-красный
740	Вишенво-красный
580	Темно-вишневый
530	Темно-красный, видимый на свету
405	Красный,едва видимый в темноте

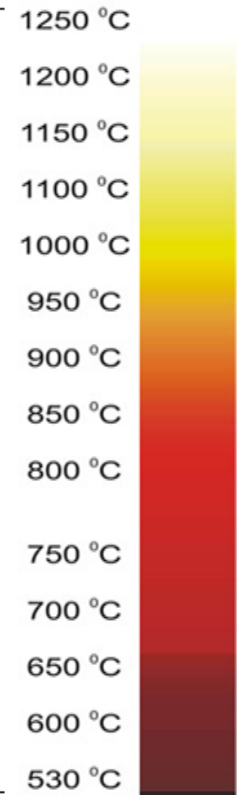


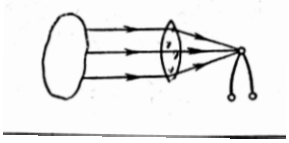
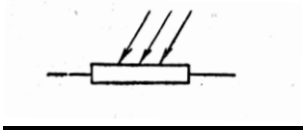
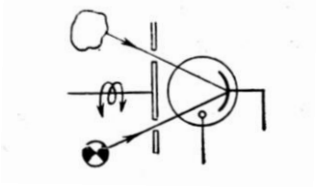
Таблица 52. Визуальная шкала температур цветов побежалости

Цвет	Наименование цвета	t°C
	Серый	325
	Светлосиний	310
	Яркосиний	295
	Фиолетовый	285
	Пурпурно-красный	275
	Красно-коричневый	265
	Коричнево-желтый	255
	Соломенно-желтый	240
	Светложелтый	225
	Светлосоломенный	200

По принципу работы пирометры подразделяются на прирометры полного излучения (радиационные), оптическая система которых пропускает весь диапазон волн, и частичного излучения (оптические), оптика которых пропускает определенный диапазон длин волн. Радиационные обладают диапазоном измерения от +100 до +2500 °С, однако не точны (погрешность 8 - 10 %). Обычно в этих приборах излучение нагревает несколько термопар, генерирующих термоЭДС, прямо пропроциональную величине теплового излучения. Термопары

располагают в в виде цветка с рабочими концами в центре, что позволяет снизить требования к точной фокусировке светового пучка. Спектральные (оптические) пирометры измеряют температуру, вычисляя отношение сигналов от двух приемников, которые работают на разных длинах волн. Оптические пирометры позволяют измерять температуру в диапазоне от +800 до +6000 ^{o}C. Погрешность их измерения составляет 4 - 6 %. Уменьшая диапазон измерения (применением различных оптических стекел) можно повысить точность прибора. Существенным недостатком пирометров является низкая точность вследствие зависимости результатов измерения от излучательной способности объекта. Наличие покрытий, пленок, естественных образований на поверхности в виде окалины, фактура поверхности (гладкая, шероховатая) и другие факторы приводит к существенному различию в показаниях измерений температуры объекта. Еще один недостаток пирометрии заключается в том, что точность радиационных пирометров напрямую зависит от расстояния до объекта измерения.

Основные виды датчиков

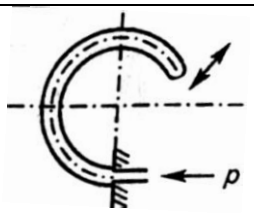
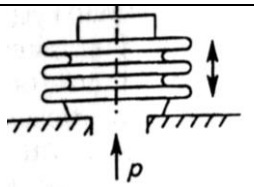
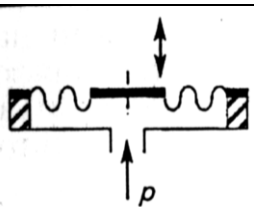
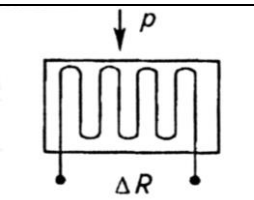
Схема датчика	**Краткая характеристика**
	Рефракторный температурный датчик полного излучения. Пределы измерения 400 -2500 ^{o}C. Выходная величина – термо ЭДС
	Датчик фотосопротивления. Изменяет сопротивление под действием излучения нагретого тела.
	Фотоэлектрический датчик температуры. Пределы измерения 600- 1800 ^{o}C. Выходная величина –фототок.

Датчики давления

Датчик давления используют в топливных и компрессионных печах для фиксации давления в рабочем пространстве и напорных трубопроводах. В

датчиках давление измеряемой среды преобразуется в унифицированный пневматический, электрический сигналы или цифровой код. Существует множество различных датчиков, которые разделить на: упругие датчики, электрические преобразователи, датчики дифференциального давления. В печестроении наибольшее распространение упругие и электрические тензометрические датчики.

Основные виды датчиков

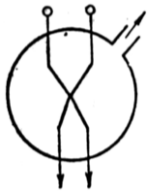
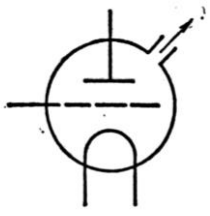
Схема датчика	**Краткая характеристика**
	Перемещение свободного конца трубчатой пружины
	Перемещение дна гофрированной коробки (сильфона)
	Перемещение жесткого центра упругой мембраны
	Изменение сопротивления деформируемого тензорезистора

Датчики разряжения (вакуумметры)

Манометры для измерения давления ниже атмосферного называют вакуумметрами. В вакуумной аппаратуре, используемой в термическом оборудовании, наибольшее применение нашли деформационные, теплоэлектрические и ионизационные вакуумметры. В деформационных вакуумметрах чувствительным элементом является тонкостенная мембрана или

сильфон. При изменении перепада давлений внешнего (атмосферного) и внутреннего (соответствующего давлению в измеряемой системе) изменяется радиус кривизны трубки, прогиб мембраны или сильфона. Деформационные вакуумметры наибольшей чувствительностью обладают в области сравнительно высоких давлений и позволяют измерять вакуум в интервале до 133,3-10^4 Па (760 — 104 мм рт. ст.). Принцип работы теплоэлектрических вакуумметров основан на зависимости теплопроводности разреженного газа от его плотности. В термопарных вакуумметрах с изменением давления изменяется температура нити накала, подогреваемой током постоянной величины. Температура нити измеряется термопарой и по величине термоЭДС термопары судят о разряжении в лампе, соединенной с вакуумным объемом. Таким методом обычно измеряют вакуум в пределах от 133,3 10^{-3} до 133,3 10^{-7} Па (от 103 до 107 мм рт. ст.). В ионизационных датчиках в лампе имеются катод, сетка и коллектор ионов. Нагреваемый стабилизированным током катод эмитирует электроны, которые получают направленное движение к сетке. При движении вокруг электроны встречают молекулы газа и ионизируют их. Измеряя силу ионного тока, можно судить о давлении в лампе и в системе, к которой присоединена лампа.

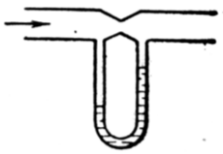
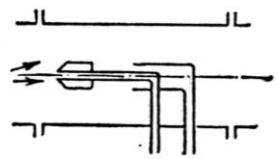
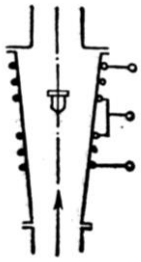
Основные виды датчиков

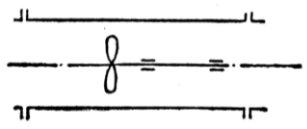
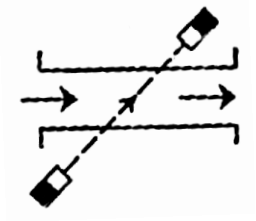
Схема датчика	**Краткая характеристика**
	Датчик давления с термопарой. Выходная величина – термо ЭДС
	Ионизационный вакуумметр.Выходная величина –анодный ток

Датчики расхода

Датчики расхода (расходомеры), измеряют объемный расход или массовый расход вещества, то есть количество вещества (объем, масса), проходящее через данное сечение потока, например, в сечении трубопровода в единицу времени. Датчики расхода применяют для регистрации потоков топлива и газа в топливных печах, расхода контролируемых атмосфер при химико-термической обработке и защитных сред при светлой закалке.

Основные виды датчиков

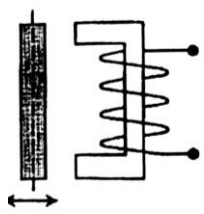
Схема датчика	**Краткая характеристика**
	Измерение перепада давления до и после диафрагмы (реометры) Пользуясь определенным соотношением между скоростью потока и полученной разностью давлений, определяют расход газа, проходящего через прибор в единицу времени. Датчик непригоден для пульсирующих потоков
	Трубка скоростного напора. Определение скорости основано на измерении скоростного напора, равного разности полного и статического напоров в потоке. Датчик непригоден для пульсирующих потоков
	Измерение положения поплавка в вертикальном конусообразном отверстии (ротаметры). Поток движется по трубе в направлении снизу вверх, заставляя поплавок подниматься до уровня, на котором все Выталкивающая сила, которая зависит от плотности среды и объёма поплавка, сила тяжести и сила потока, равны. Датчик непригоден для пульсирующих потоков и не допускает вибраций.

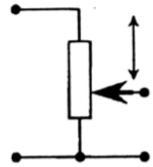
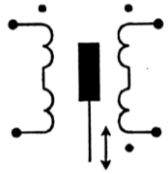
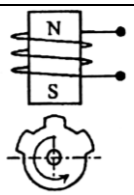
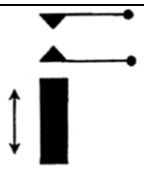
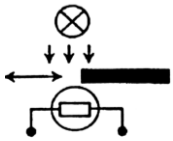
	Измерение скорости вращения подвижного элемента (анемометры, тахометрические расходомеры). Движение газа приводит во вращение чашечное колесо или крыльчатку. Выходная величина- скорость вращения ротора.
	Измерение прохождения ультразвуковых волн в потоке жидкости Два ультразвуковых сенсора, расположены по диагонали напротив друг друга. Акустический сигнал, поочередно генерируемый обоими сенсорами, ускоряется, когда направлен по потоку, и замедляется, когда направлен против потока. Разница во времени, возникающая вследствие прохождения сигнала по измерительному каналу в обоих направлениях, прямо пропорциональна средней скорости потока, на основании которой можно затем рассчитать объёмный расход.

Датчики перемещения

Датчики перемещения находят широкое применение в термических устройствах, реализующих перемещение деталей в процессе их нагрева, а так же различных устройствах загрузки - выгрузки термических печей. Основные физические принципы, используемые в этих датчиках указаны ниже.

Основные виды датчиков

Схема датчика	**Краткая характеристика**
	Измерение тока в электромагнитной катушке

	Изменение сопротивления потенциометра
	Изменение напряжения на выходной обмотке трансформатора
	Изменение индуцированной ЭДС, при вращении электромагнита
	Контактные системы
	Изменение светового потока

21.4. Исполнительные механизмы

Исполнительные механизмы это конечные элементы системы управления, приводящих в движение рабочие органы термического оборудования - устройства для перемещения деталей, открытия дверей загрузочных и разгрузочных проемов, регулирования положения шиберных заслонок дымоходов и т. д. Исполнительный механизм включает в себя источник движения (мотор или двигатель) передачу, связывающую двигатель исполнительным элементом и устройство управления приводом, имеющее в своем составе коммутационную, регулирующую и усиливающую аппаратуру. По виду движения исполнительные механизмы подразделяются на: прямоходовые; однооборотные; многооборотные. По скорости движения исполнительные механизмы подразделяются на механизмы,

двигающиеся с постоянной скоростью и механизмы, двигающиеся с переменной скоростью. По виду энергии приводы подразделяются электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные. Электрические исполнительные механизмы в качестве источника механических движений чаще всего используют электродвигатели постоянного тока. Реже используют двигатели переменного тока, шаговые двигатели или электромагниты. Соленоиды и электромагниты являются самыми простыми исполнительными механизмами. Они состоят из катушки, подвижного сердечника и стопы. Ток, протекающий через обмотку катушки, вызывает втягивание сердечника и отклонение рычага, связанного с исполнительным механизмом (рис.145). С момента, когда сигнал прекращается, пружина оттягивает рычаг в положение нейтрали (одностороннее управление) или в противоположную сторону (двустороннее управление). Соленоиды и электромагниты очень просты и надежны, однако достаточно тяжелы, потребляют большой ток и имеют ограниченный рабочий ход. Электрические двигатели имеют большие возможности для работы исполнительных механизмов и могут взаимодействовать со всеми системами дистанционного управления. Для привода исполнительных механизмов чаще всего используют асинхронные трехфазные двигатели. Двигатели постоянного тока позволяют регулировать скорость перемещения в широких пределах, но требуют дополнительной аппаратуры и обладают высокой стоимостью. Для точного позиционирования рабочего органа применяют шаговые электродвигатели, позволяющие осуществлять дискретные угловые перемещения (рис. 146).

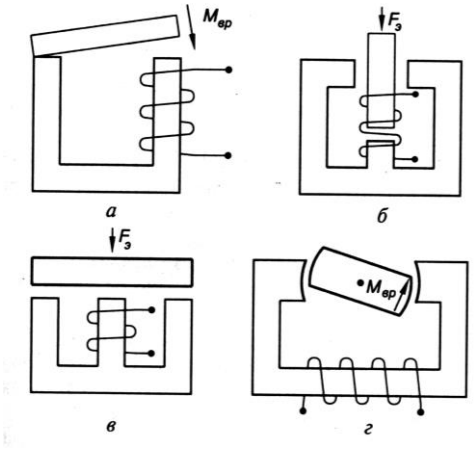


Рисунок145. Варианты конструктивных схем электромагнитов

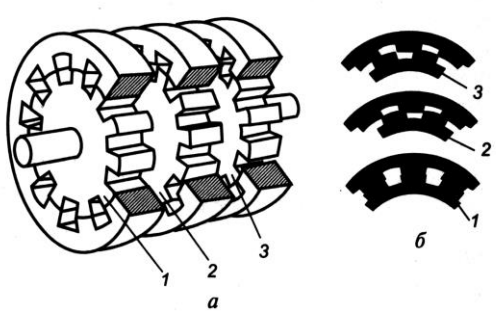


Рисунок 146. Схема работы шагового двигателя. а – общая схема, положения секций статора и ротора

Достоинствами электрических исполнительных механизмов являются: простота получения механической энергии непосредственно из электроэнергии; удобство подведения энергии использование одного вида энергии для управления приводом и рабочим органом. К основным недостаткам можно отнести высокую инерционность привода, большие габаритные размеры при малой мощности и сложность регулирования скорости перемещения.

Гидравлический привод имеет в своем составе один или несколько гидродвигателей, источники энергии жидкости (насосы), распределительную и контрольно-регулирующую аппаратуру, соединительные трубопроводы. В гидроприводах в качестве рабочей жидкости обычно применяются минеральные масла с низкой кинематической вязкостью. В состав устройства для подготовки масла входят гидробак, фильтры для очистки масла от загрязнения; охладители

масла, аккумуляторы для снижения производительности насоса при чередующихся циклах большого и малого расхода масла. В гидросистемах масло подается по стальным трубам или гибким шлангам. Распределительная аппаратура (устройства) предназначена для направления масла к соответствующим узлам привода и отвода его в резервуар. В состав распределительной аппаратуры входят обратные и предохранительные клапаны, напорные и реверсивные гидрораспределители и т. д. Регулирующая аппаратура служит для регулирования давления, числа и скорости потоков масла, времени выдержки и срабатывания отдельных механизмов. В качестве гидродвигателей наиболее часто используют поршневые, плунжерные, диафрагменные, роторные пластинчатые (лопастные) и аксиально-поршневые гидродвигатели.

Гидропривод обладает рядом достоинств: малой массой и габаритами гидроагрегатов, возможностью передавать большие усилия и моменты, высоким быстродействием, широким диапазоном и простотой регулирования скорости перемещения. Основными недостатками гидропривода являются: низкий КПД; чувствительность к перепадам температур; высокая пожароопасность при утечке масла, сложность в изготовлении и высокая стоимость оборудования, а тек же необходимость периодического квалифицированного обслуживания при эксплуатации.

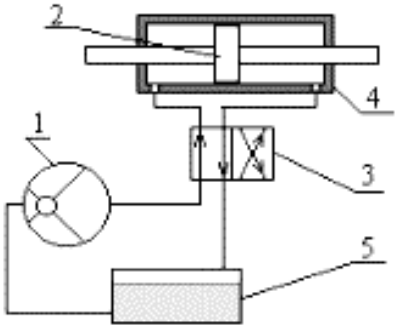


Рисунок 147. Схема гидропривода с гидроцилиндром. 1- насос, 2 шток гидроцилиндра, 3- дроссель-регулятор, 4- корпус гидроцилиндра, 5 -бак с маслом

Пневматический привод (пневмопривод) представляет собой совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение частей машин и

механизмов посредством энергии сжатого воздуха. По своей структуре пневмопривод, подобен гидроприводу. Обязательными элементами пневмопривода являются компрессор, пневмодвигатель или пневмоцилиндр, система трубопроводов (шлангов) для подачи сжатого воздуха и контрольно-регулирующая аппаратура. В зависимости от характера движения выходного звена пневмодвигателя (вала пневмомотора или штока пневмоцилиндра), и соответственно, характера движения рабочего органа пневмопривод может быть вращательным или поступательным. Пневмоприводы с поступательным движением получили наибольшее распространение в технике. Основными достоинствами пневмопривода являются относительная простота конструкции двигателей (при которой возможны утечки сжатого воздуха), высокое быстродействие и малая инерционность, компактность, малая чувствительность к перепадам температур, легкость автоматизации и защиты от перегрузок, экологичность, надежность и взрывобезопасность, отсутствие гидравлических ударов. К недостаткам пневмопривода можно отнести низкий КПД, низкую жесткость привода из-за сжимаемости воздуха, необходимость наличия высокопроизводительного компрессора.

В комбинированном приводе движение рабочего органа за счет нескольких приводов (видов энергоносителя). Выбор типа привода определяется соотношением затрат на изготовление оборудования и его обслуживание и ресурсом работы привода. Кроме этого могут быть ограничения, по быстродействию привода, его весу и габаритным размерам, требованиям безопасности.

21.5. Методы регулирования температуры в термических печах

Можно выделить следующие особенности печи как объекта управления.

1. Печь это сложный комплекс элементов (нагреватели, футеровка, измерительные и элементы и т.д.) каждый из которых обладает тепловой инерцией, что усложняет расчеты теплового баланса и переходных процессов.

2. Температурное поле печи неравномерно по объему и меняется во времени, поэтому место расположения измерительных элементов чрезвычайно важно.
3. Печь является объектом с самовыравниванием температуры, график нагрева носит экспоненциальный характер.
4. Период разогрева мощность печи равна номинальной мощности, в период выдержки средняя мощность печи падает и в конце выдержки равна тепловым потерям печи (состояние теплового баланса).

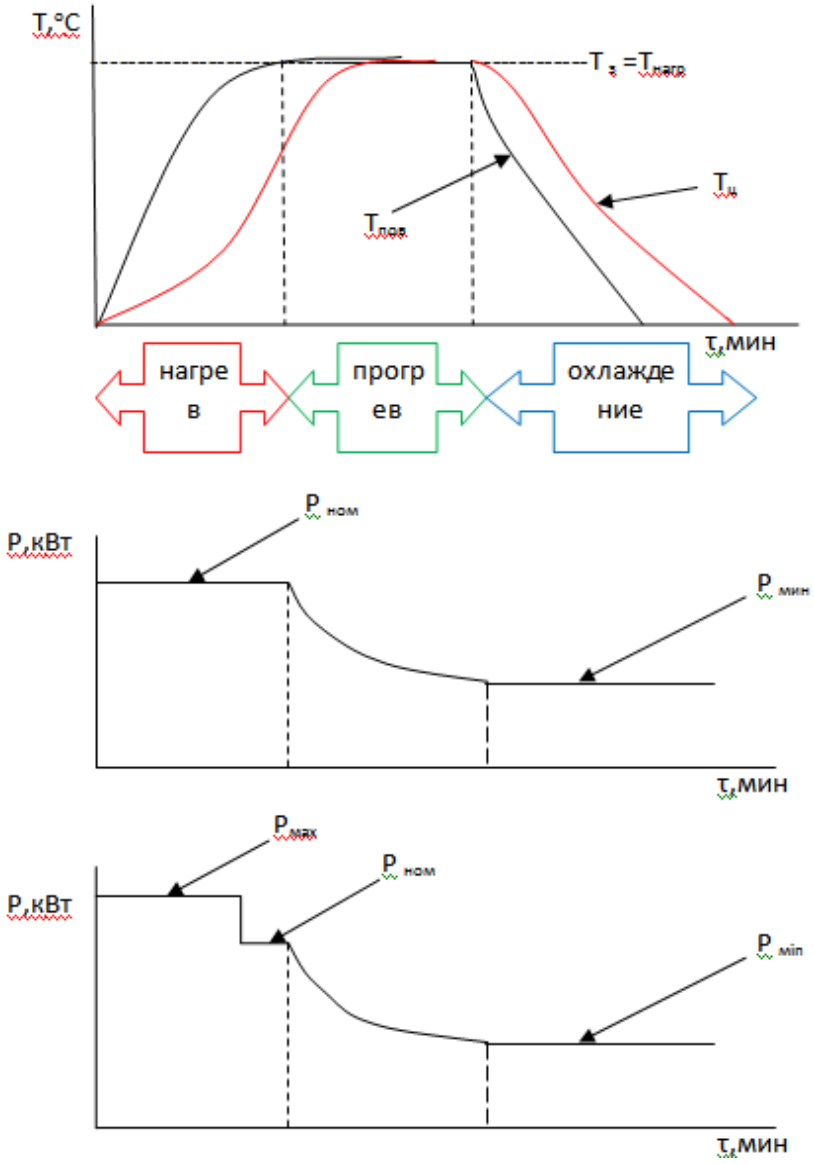


Рисунок 148. Мощность печи на различных этапах нагрева.

Практически автоматические регуляторы работают только во время выдержки. В период нагрева нагревательные элементы не выключаются, них постоянно подается напряжение. Если печь имеет избыток мощности, то может быть реализован скоростной нагрев за счет максимальной мощности, которая затем снижают до номинальной при нагреве печи до заданной температуры. В противном случае возможен перегрев садки. Основной критерий при выборе закона регулирования определяется требованиями по точности нагрева. При реализации термомеханической обработки стали допустимая точность регулирования обычно составляет ± 25 – 50 ^{o}C, при выполнении закалки с отпуском она находится в диапазоне ± 10 ^{o}C, при выращивании монокристаллов ± 0,5 ^{o}C. Процесс регулирования температуры может быть:

- дискретным (позиционным);
- непрерывным.

Позиционные (дискретные) способы регулирования температуры

При позиционном управлении используется недорогая коммутационная аппаратура, обеспечивающая периодическое включение и выключение печи при постоянном уровне номинальной мощности. Обычно применяется двухпозиционный способ регулирования (включено – выключено или большая мощность - малая мощность), реже применяют многопозиционный метод (большая мощность, средняя мощность, малая мощность). При достижении температуры T+ΔT печь выключается, а при охлаждении мечи до температуры T-ΔT – печь включается. Величина 2 ΔT является зоной нечувствительности метода. Чем меньше ΔT- тем точнее работает печь, при этом она чаще включается и выключается, что уменьшает ресурс работы коммутационной аппаратуры и может привести к автоколебаниям. Средняя потребляемая мощность при нагреве деталей снижается вследствие уменьшения периода подачи мощности на нагревательные элементы и увеличения продолжительности периода выключения. Для обеспечения быстрого выхода печи на рабочий режим номинальная

мощность на нагреватели всегда подводится с избытком (с превышением мощности, необходимой для поддержания теплового баланса, на 30 – 50 %).

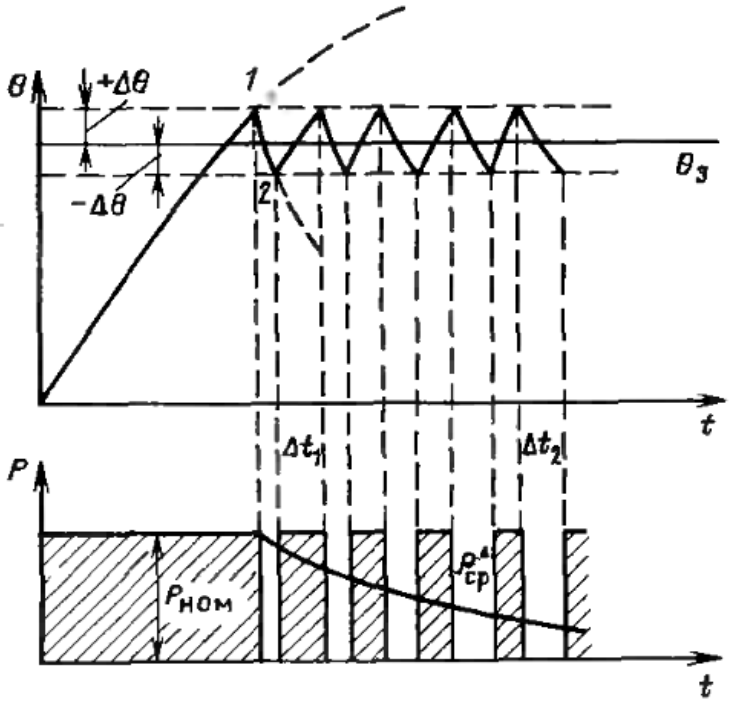


Рисунок 149. Идеальная схема работы двухпозиционного регулятора температуры.

Однако на самом деле картина температурного поля печи отличается от идеальной из-за тепловой инерционности различных элементов печи: датчиков температуры, нагревательных элементов, регулирующих устройств и футеровки печи. Чем больше время тепловой инерции датчика температуры, тем выше колебания температурного поля печи. Важное влияние оказывает величина избытка мощности и положение термодатчика внутри рабочего просранства печи. Увеличение мощности, подводимой к печи, ускоряет процесс выхода на режим термического оборудования, но приводит к значительным температурным колебаниям. Расположение термопар вблизи нагревателей уменьшает термическое запаздывание измерительной системы, однако температура вблизи нагревательных элементов всегда выше, чем у поверхности нагреваемых изделий, что необходимо учитывать при выставлении температуры на задающем

устройстве. Для большинства видов термической обработки, позиционные методы являются приемлемыми, в том случае, если только время позиционирования превышает (или соизмеримо) время нагрева под термическую обработку.

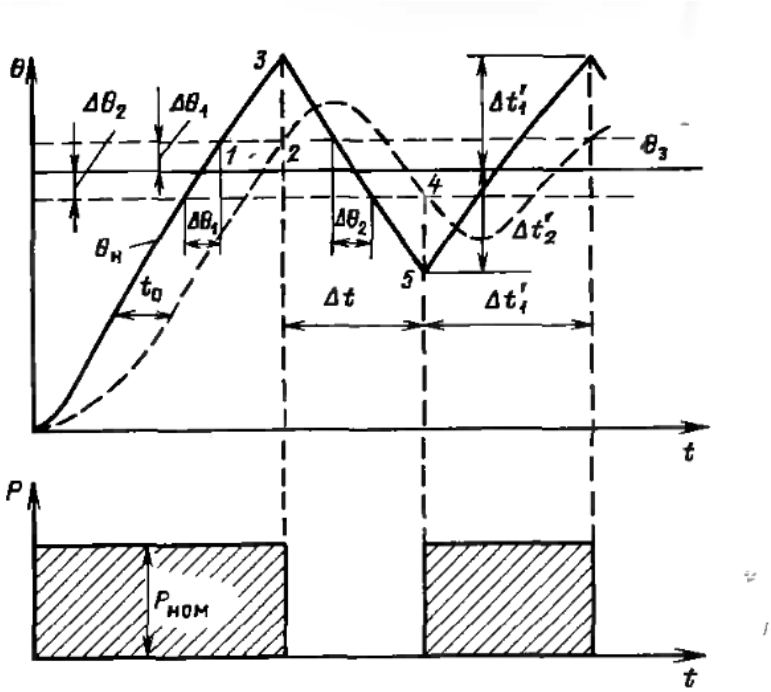


Рисунок 150. Схема работы двухпозиционного регулятора температуры при динамическом запаздывании

Способы повышения точности управления тепловым режимом термических печей

1. *Повышение чувствительности регулирующего прибора*. Обычно точность регулирующих приборов составляет 0,25%, (класс 2,5). Для приборов с диапазоном регулирования от 0 до 1000 ^{o}C при измерении температуры при 1000 ^{o}C допустимая погрешность составляет ± 2,5 ^{o}C. Стандартная погрешность хромель-алюмелевых термопар при 1000 ^{o}C составляет ± 3,8 ^{o}C. Таким образом, суммарная допустимая погрешность средств измерения и регуляторов равна ± 6,3 ^{o}C. Для повышения точности регулирования можно использовать следующие способы.

- Применение прецизионных приборов класса точности 0.25. В этом случае допустимая погрешности измерения составляет 0,025 %.

- Применение приборов с узким диапазоном регулирования. Например, для измерения температуры 1000 °С можно использовать автоматический регулятор с диапазоном измерения 900…1100 °С. При классе точности 2,5 погрешность такого прибора будет составлять 0, 5 °С.
- Применение индивидуально поверенных термопары и регуляторов температуры. Суммарная погрешность такой измерительной системы не будет превышать ± 0,5…1 °С.

2. *Снижение времени регулирования в системе регулятор – печь*. Обычно все элементы термического оборудования работают с задержкой. Время срабатывания регулирующего прибора составляет 0,1 - 0,5 с. Среднее время срабатывания коммутационной системы равно 1- 2 с. Время срабатывания исполнительных механизмов составляет от 0,1 с для электропечей до 4 с для топливных печей. Во всей системе регулирования максимальными показателями тепловой инерции обладают измерительные элементы - до 210 с (таблица 50). Таким образом, при скорости нагрева 2 °С/с и тепловой инерции термопары 20 секунд максимальная погрешность измерения может достигать 40 °С. Наиболее эффективные способы повышения точности регулирования в системе регулятор – печь связаны с применением малоинерционных датчиков или уменьшением скорости нагрева.

3. *Изменение мощности, подводимой к печи*. При высокой мощности печи и соответственно более высокой скорости нагрева возникает значительный перепад температур в рабочем пространстве печи. Напротив, при малой мощности печи температурное поле печи является более равномерным, однако значительно увеличивается время нагрева. Для получения высокой скорости и обеспечения равномерности и стабильности температурного поля на начальной стадии нагрева на нагревательные элементы подается максимальная мощность, затем, при приближении температуры к заданному значению мощность печи уменьшают. Снижение мощности печей может осуществляться различными методами:

- переключением схемы питания нагревателей с параллельного на последовательное (простая, но дискретная регулировка);

- уменьшением питающего напряжения (сохраняется равномерное температурное поле, при этом необходима дорогостоящая коммутационная аппаратура, например регулируемый силовой трансформатор);
- выключением части нагревателей (простой способ, при этом значительно изменяется температурное поле печи);
- в топливных печах – уменьшением расхода топлива и воздуха. В топливных печах отключение горелок не осуществляют, т.к. повторное включение может привести к взрывообразному воспламенению топливно-воздушной смеси.

4. *Рациональное расположение измерительного элемента.* При расположении температурного датчика вблизи нагревательных элементов частота переключений выше, при этом меньше амплитуда колебаний температурного поля вследствие меньшего перегрева нагревателей. Однако при таком расположении термопары фиксируется температура вблизи нагревательных элементов, а не середине рабочего пространства печи, где обычно расположены детали. При расположении датчика температуры вблизи обрабатываемых деталей тепловые колебания в печи значительно выше, особенно при реализации низкотемпературной термической обработки, происходящей в условиях естественного конвективного теплообмена. Воздушная прослойка между деталью и нагревателями имеет низкие показатели теплопроводности и увеличивает время термического запаздывания. Для повышения точности регулирования температуры можно использовать две термопары, одна из которых (регулирующая) располагается вблизи нагревательных элементов и управляет их включением, другая (контрольная), находится вблизи детали и предназначена для корректировки температуры регулирующего прибора. Для снижения температурных колебаний при позиционном регулировании вблизи нагревательных элементов могут располагаться тепловые экраны, аккумулирующие тепло и нивелирующие тепловой поток в рабочее пространство печи.

Регуляторы непрерывного действия

Регулятор пропорционального действия (П-регулятор). Регуляторы подобного типа имеют жесткую обратную связь через коэффициент усиления между отклонением температуры и мощностью, подводимой к печи. Закон регулирования регуляторов пропорционального действия может быть описан следующим уравнением: $\Delta P = K_п * \Delta T$ (изменение мощности прямо пропорционально отклонению температуры). Где $K_п$ – коэффициент усиления (избытка мощности) равный $Кп = \Delta P / \Delta T$. Отклонение температуры (в %) вызывающее изменение мощности от P_{min} до P_{max} называют диапазоном пропорциональности $Д_п$. Чем выше $K_п$, тем больше скорость нагрева и меньше время регулирования (время достижения и стабилизации заданной температуры). Однако увеличение коэффициента усиления $K_п$ приводит к уменьшению диапазона пропорциональности $Д_п$. Основной недостаток регуляторов пропорционального действия в наличии абсолютной статической ошибки системы $\Delta T_{ст}$. Статизм системы (относительная ошибка) равен $\delta = \Delta Tст / T_{зад}$. Чем меньше коэффициент усиления $K_п$, тем больше относительная ошибка в регулировании температуры δ. Напротив, при высоких значениях $K_п$ процесс нагрева будет протекать очень быстро, однако вследствие тепловой инерции различных элементов печи в ней могут возникнуть незатухающие колебания температурного поля. Регуляторы пропорционального действия хорошо работают при незначительном изменении массы садки и стабильном уровне потребляемой мощности.

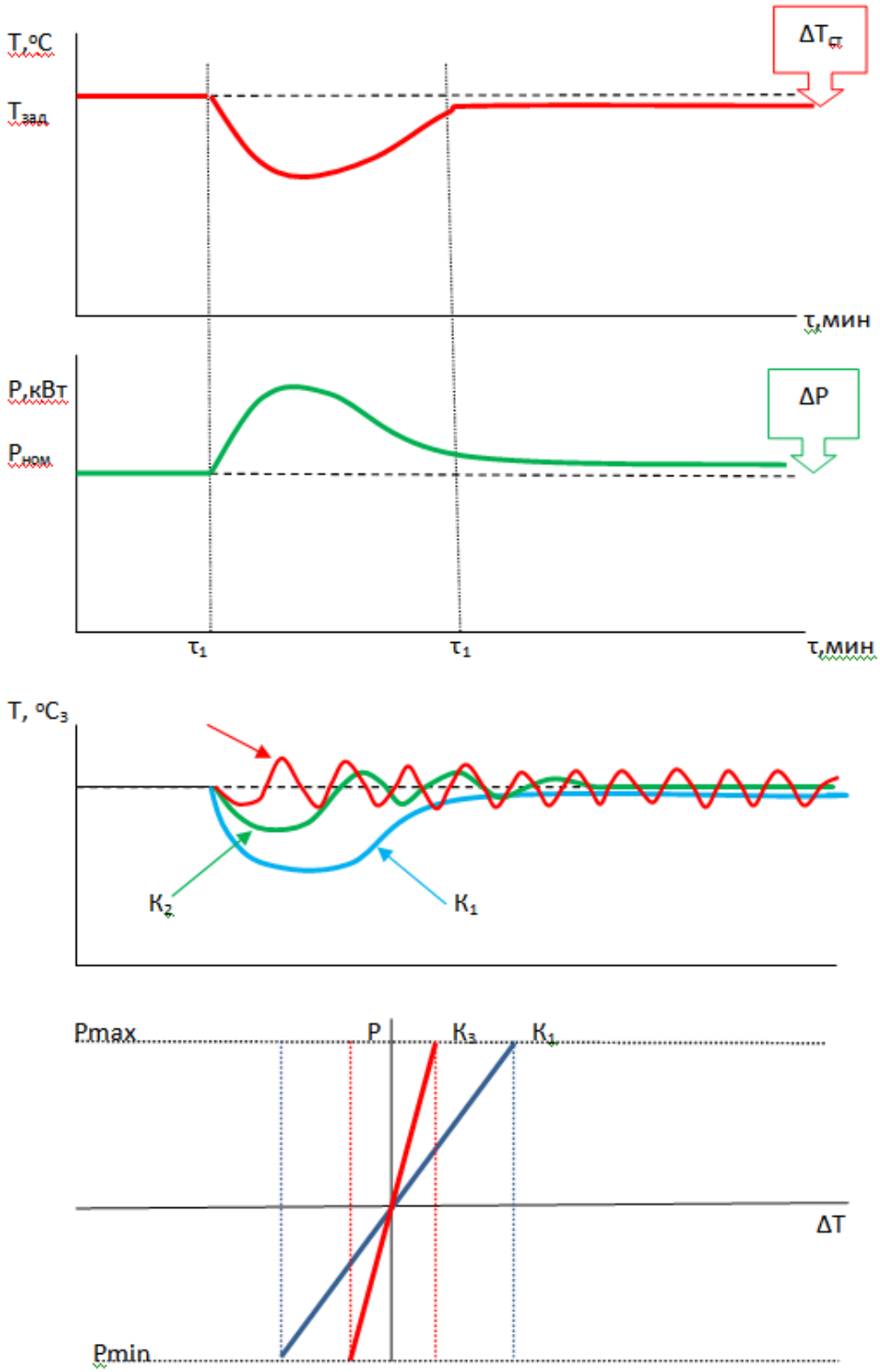


Рисунок 151. Изменение температуры и мощности печи при пропорциональном регулировании

Регулятор интегрального действия (И-регулятор). При интегральном регулировании изменение подводимой к печи мощности осуществляется со скоростью, пропорциональной отклонению температуры от ее заданного значения. Закон регулирования может быть описан следующим уравнением: dP

/dτ=$К_и$*ΔТ (скорость изменения мощности прямо пропорционально отклонению температуры). Коэффициент $К_и$ численно равный скорости изменения мощности при изменении температуры на 1 ^oC называется *коэффициентом усиления по скорости*. При достижении печью заданной температуры скорость роста мощности равна нулю. При дальнейшем росте температуры подводимая мощность к печи начинает снижаться. Максимальная скорость падения мощности наблюдается при достижении максимальной температуры в печи. Основное достоинство интегральных регуляторов – в них не возникает статическая ошибка, т.к. при любом отклонении температуры регулятор будет менять ее мощность. Основным недостатком регуляторов интегрального действия является длительность затухания колебаний, при этом значительно увеличивается амплитуда первого колебания. Интегральные регуляторы применяются как системы стабилизации в термическом оборудовании с малыми динамическими отклонениями. В печах для термической обработки материалов интегральный закон регулирования в чистом виде практически не применяется.

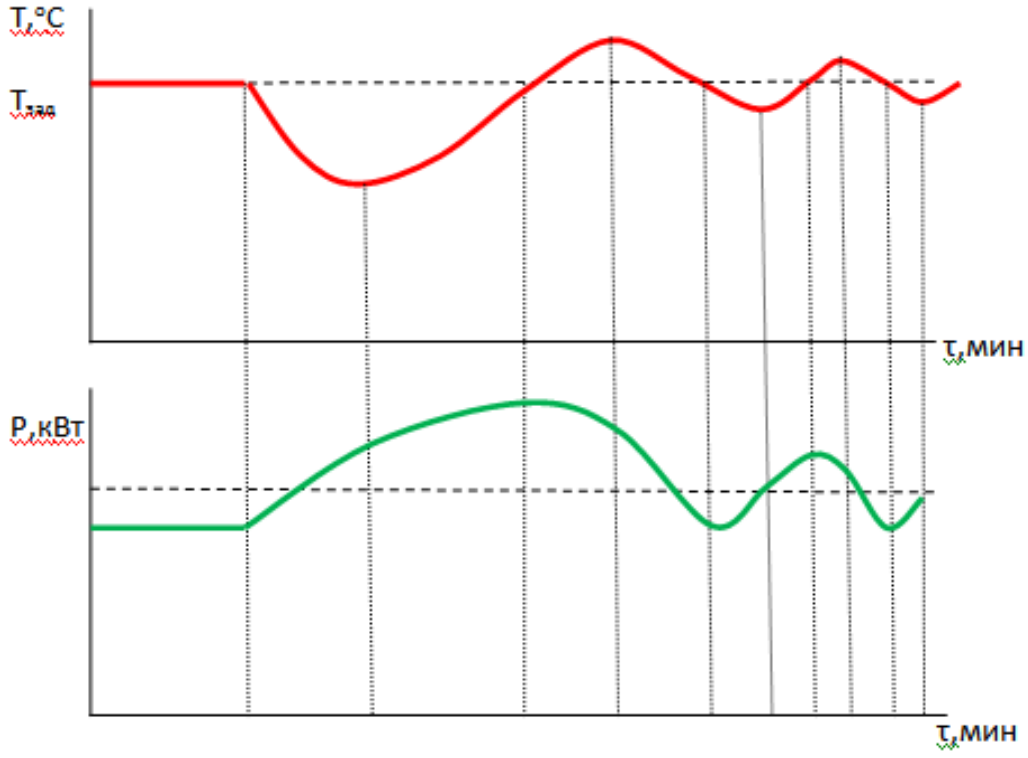


Рисунок 152. Изменение температуры и мощности печи при интегральном регулировании

Регулятор пропорционально-интегрального действия (ПИ-регулятор, изодромный регулятор). Регулятор пропорционально-интегрального действия подобен системе двух регуляторов. При больших сигналах рассогласования регулятор работает как пропорциональный, при малых – как интегральный. Регуляторы такого типа имеют три параметра настройки – коэффициент усиления при пропорциональном регулировании $К_п$, коэффициент усиления при интегральном регулировании $К_и$, и $\Delta\tau$– сигнал или время изодрома (величина сигнала рассогласования или время включения интегрального регулятора). Регуляторы более пропорционально-интегрального действия точны, но более дороги, требуют тщательной настройки и соответствующей коммутационной аппаратуры для реализации заданных законов регулирования.

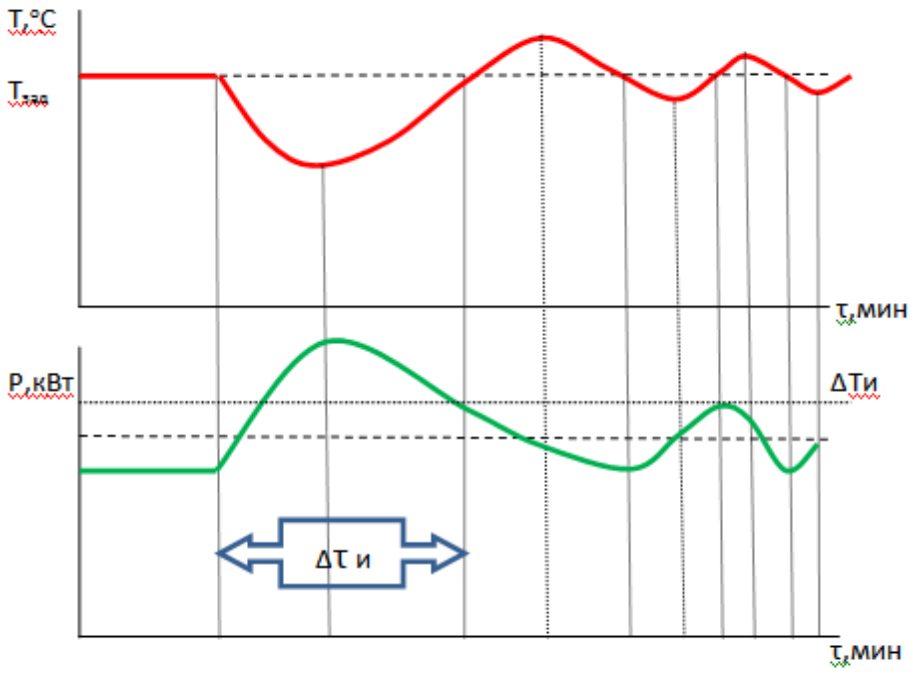


Рисунок 153. Изменение температуры и мощности печи при пропорционально-интегральном регулировании

Регулятор пропорционально-интегрального-дифференциального действия (ПИД-регулятор) подобен системе, состоящей их трех регуляторов. Изменение подводимой к печи мощности пропорционально отклонению, интегралу и скорости изменения температуры. На первом этапе, когда температура меняется быстро, регулятор работает как дифференциальный, с законом регулирования: $\Delta P = dT/ d\tau$ (изменение мощности прямо пропорционально скорости изменения температуры). Это позволяет увеличить мощность на нагревательных элементах не дожидаясь существенного падения температуры в рабочем пространстве печи. На втором этапе работает по пропорциональному закону регулирования. При малых рассогласованиях на третьем этапе регулятор работает как интегральный. Введение дифференциального звена позволяет уменьшить первое динамическое отклонение, оценив степень возмущающего воздействия. Это самый точный, но самый дорогой и наиболее сложный в настройке регулятор.

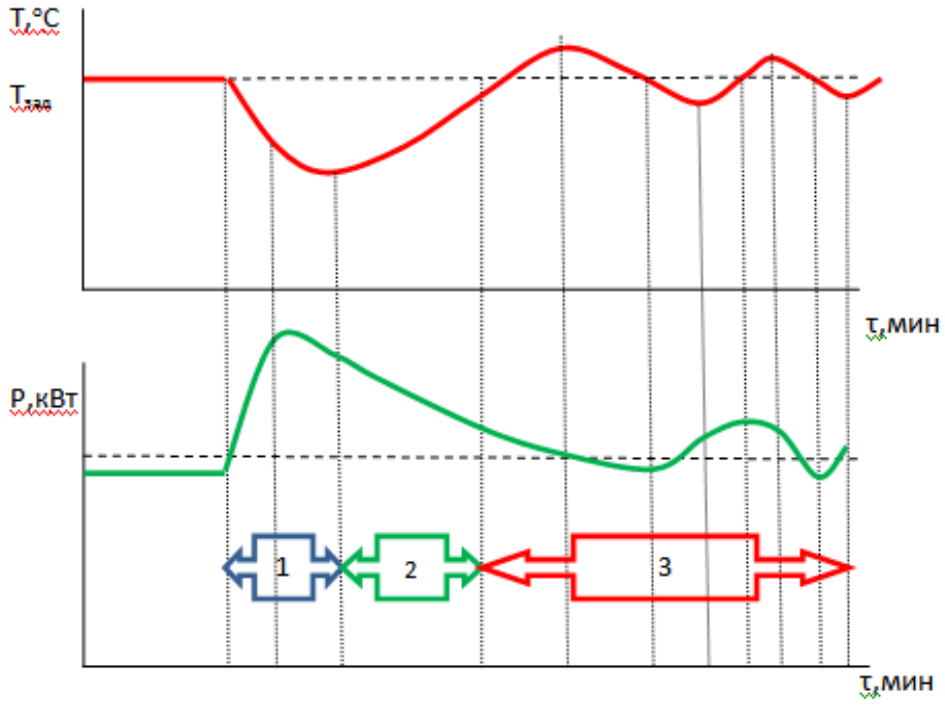


Рисунок 154. Изменение температуры и мощности печи при пропорционально-интегрально-дифференциальном регулировании

21.6 Автоматические регуляторы температуры

Условно автоматические регуляторы температуры можно подразделить на несколько групп.

1. Стабилизаторы температуры. Это самые простые регуляторы, которые поддерживают температуру возле заданного значения, при этом не регистрируют текущее значение температуры. Стабилизаторы температуры просты и дешевы, часто применяются для регулирования температуры бытовых устройств, однако требуют периодической калибровки измерительными приборами. Наиболее распространены дилатометрические, биметаллические и манометрические терморегуляторы.



Рисунок 155. Дилатометрический и манометрический терморегулятор

2. Приборные регуляторы температуры. Они состоят из измерительного и регулирующего устройства позиционного или непрерывного действия. (П, ПИ или ПИД действия). По исполнению бывают одно и многоканальные, отличающиеся соответствующим количеством задатчиков (обычно до четырех каналов управления). В многоканальных приборах в процессе работы коммутатор поочередно включает соответствующие датчики и задатчики (каналы), что позволяет одновременно управлять нескольким единицами термического оборудования или несколькими зонами одной печи. Многоканальные приборы более дешевы, но не применимы для регулировки температуры при быстропротекающих процессах.

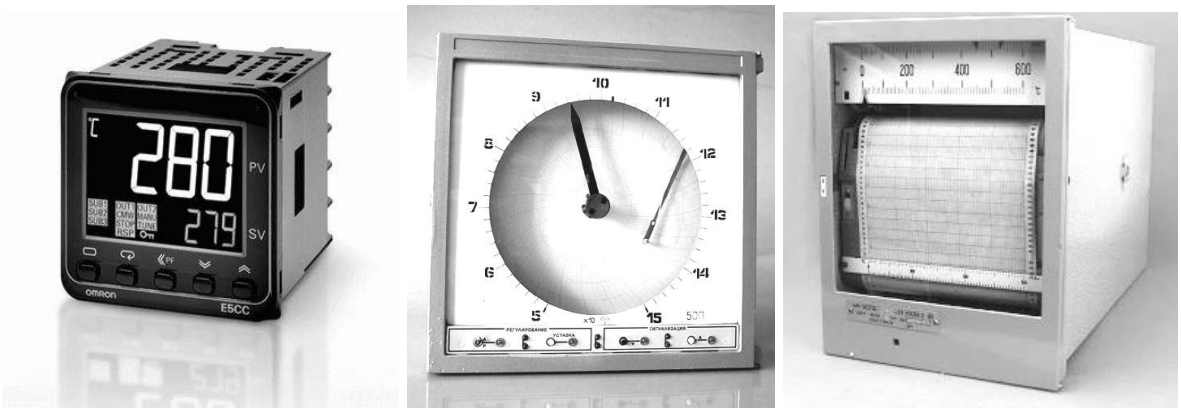


Рисунок 156. Приборные регуляторы температуры

3. Программные регуляторы температуры. Это приборные регуляторы, которые снабжены программным блоком, позволяющим регулировать температуру по сложным законам или программам с изменением с течением времени сигнала задатчика.

4. Прецизионные регуляторы температуры. Как правило, повышение точности регулирования происходит за счет изменения диапазона регулирования или работы в двух режимах: широкополосном (с широким диапазоном измерения) и узкополосном (с узким диапазоном измерения). При этом точность регулировки температуры может меняться в пять и более раз.

5. Компьютерные регуляторы температуры. Они позволяют управлять большим количеством каналов, осуществлять контроль аварийных и предаварийных ситуаций, проводить управление по сложным законам регулирования (с оптимизацией хода операции по заданному критерию), осуществлять синхронизацию операций и взаимосвязь различных параметров операции с обеспечением равномерной загрузки питающих сетей, осуществлять обработку и хранение и передачу информации. Это наиболее сложные, дорогие и при этом наименее менее надежные системы.

Работа автоматических регуляторов температуры может быть проиллюстрирована на примере проходной трехзонной электрической печи сопротивления. При работе печи в горячих концах термопар 6 возникает термоЭДС, которая через блок стабилизации холодных концов (термостат) 7

поступает на регулятор температуры 10 и сравнивается 11 сигналом задатчика 9. В структуру задатчика включен источник постоянного напряжения 8, позволяющий точно устанавливать требуемое напряжение, соответствующее заданной температуре рабочего канала. Разность между сигналом задатчика и действительным значением термо-ЭДС термопары в виде постоянного напряжения рассогласования (сигнала) поступает на усилитель постоянного тока 14, и еще раз усиливается функциональным усилителем мощности 15. В зависимости от величины сигнала изменяется приоткрытие кремниевых управляемых симметричных вентилей (симисторов) 2, включенных во вторичную обмотку силового трансформатора 7. В результате уменьшается или увеличивается мощность, подаваемая в центральную секцию 4 нагревателя 3.Для защиты нагревателя от перегрева в схему управления введен блок 18 ограничения температуры, срабатывающий от суммарного сигнала двух термопар, установленных в краевых секциях 5 нагревателя 3. При превышении предельной температуры коммутирующее устройство 17 отключает подачу сигнала управления симисторами и включает лампу 19, сигнализирующую о аварийной ситуации.

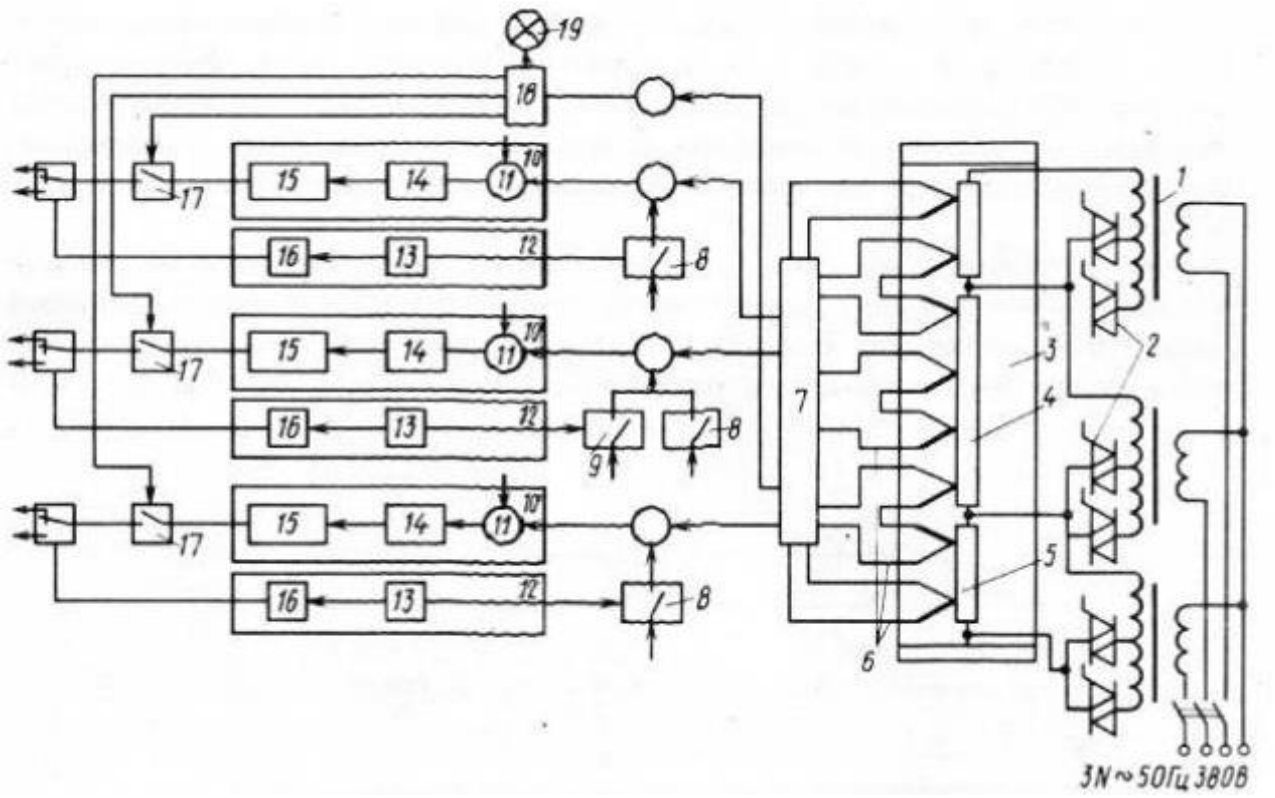


Рисунок 156. Функциональная схема автоматической системы регулирования температуры трехзонной термической печи :1 – силовой трансформатор, 2 – симисторы, 3, 4,5 –нагреватели секций 6,– термопары и 7 блок стабилизации холодных концов термопар, 8, 9 – потенциометры-задатчики,10 – регулятор температуры, 13 – реле времени, 14 – усилитель постоянного тока, 15 – функциональный усилитель мощности, 16 – цепь задержек, 19 – сигнальная лампа.

Основные тенденции развития систем автоматизации

1. Создание недорогих вычислительных устройств для реализации простейших законов управления.
2. Создание многофункциональных совместимых и быстромодернизируемых систем для решения комплексных задач.
3. Создание сложных многоуровневых систем управления всем технологическим процессом производства продукции.

22. Нормирование термических операций

Нормирование производства изделий является важным этапом подготовки производства. Оно является основой для планирования работы подразделений, определения типа производственных заданий и площади производственных участков, необходимого количества рабочих и оборудования, а так же поиска резервов повышения производительности труда, снижения себестоимости и повышения качества продукции. Нормативные материалы в зависимости от назначения разделяют на нормативы режимов работы оборудования, нормативы численности и нормативы времени. Нормативы режимов работы оборудования необходимы для расчета затрат основного времени, нормативы численности регламентируют численность исполнителей работы и нормативы времени-затраты времени на выполнение отдельных элементов работы. Для нормирования труда используют следующие методы.

- Аналитически-исследовательский метод. Затраты времени определяются с помощью анализа данных, полученных непосредственно на рабочем месте.
- Аналитически-расчетный метод. Нормирование труда осуществляется по нормативным материалам и по формулам.
- Суммарный метод. Нормы труда по суммарному методу устанавливаются в целом на всю работу или операцию на базе опыта нормировщика, имеющихся статистических данных или путем сравнения анализируемой работы с аналогичной, ранее пронормированной.

При термической обработке обычно используют укрупненные нормативы времени. Нормируемая работа расчленяется на сложные укрупненные части, объединяющие ряд элементов операции и устанавливается норма труда на комплекс приемов, например, на загрузку деталей на приспособление и выгрузку их. Укрупненное нормирование является одной из форм аналитически расчетного метода определения обоснованных норм затрат труда. Основная задача – упрощение нормирования и сокращение времени на разработку норм. Данные по

укрупненным нормативам обычно приводят в специализированных сборниках. Укрупненные нормативы подразделяют на:

- нормативы типовых технологических режимов;
- нормативы вспомогательного времени операций;
- нормативы штучного времени технологических переходов;
- типовые нормы по обработке деталей, связанных общим типовым технологическим процессом.

Обычно расчет нормы штучного времени при обслуживании одного термического агрегата с садкой в количестве N деталей проводят по следующей формуле:

$$T_{шт} = \frac{T_{оп}}{N}(1+\frac{a_{орг}+a_{тех}+a_{отл}}{100})$$

где оперативное время на одну садку определяют по формуле:

$$T_{оп} = T_{о} + T_{в}$$

$T_о$- основное время технологического процесса термической обработки определяют по формулам, описанным в разделе № 5. Вспомогательное время $T_в$, время на организационное $a_{орг}$, техническое $a_{тех}$ обслуживание и время на отдых и личные надобности $a_{отл}$ выбирают по справочникам [39, 40]. Данные в справочниках обычно приводят для массового производства. Для мелкосерийного производства нормативы времени увеличивают на 30 %.

Таблица 54. Время укладки и выгрузки деталей в приспособление

Количество деталей в приспособлении N, до	Масса детали Q, кг, до													
	0,05	0,08	0,12	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	2,0	3,0	5,0	8,0	12,0	20,0
	Время на одно приспособление, мин													
8	–	–	–	–	0,485	0,56	0,65	0,74	0,83	0,97	1,13	1,30	1,46	1,71
10	–	–	0,43	0,49	0,560	0,65	0,76	0,83	0,99	1,12	1,30	1,49	1,69	1,98
12	–	0,41	0,49	0,56	0,630	0,74	0,85	0,95	1,12	1,26	1,48	1,69	1,91	2,23
16	0,45	0,50	0,58	0,67	0,760	0,88	1,03	1,15	1,35	1,51	1,76	2,03	2,30	2,69
20	0,50	0,59	0,67	0,77	0,810	1,03	1,19	1,33	1,55	1,75	2,03	2,36	2,66	3,10
25	0,59	0,68	0,77	0,90	1,010	1,19	1,37	1,56	1,80	2,03	2,36	2,71	3,08	3,59
32	0,70	0,81	0,90	1,06	1,190	1,39	1,60	1,80	2,11	2,38	2,77	3,19	3,60	–
40	0,81	0,92	1,04	1,22	1,390	1,60	1,85	2,09	2,43	2,75	3,20	3,69	4,18	–
50	0,94	1,08	1,21	1,40	1,570	1,85	2,16	2,41	2,81	3,19	3,71	4,27	–	–
60	1,04	1,21	1,37	1,58	1,800	2,09	2,41	2,72	3,16	3,59	4,17	4,81	–	–
80	1,26	1,46	1,64	1,91	2,160	2,52	2,91	3,28	3,82	4,32	5,04	–	–	–
100	1,46	1,67	1,91	2,21	2,500	2,92	3,36	3,81	4,41	4,99	5,81	–	–	–
125	1,69	1,94	2,20	2,56	2,910	3,37	3,89	4,39	5,11	5,76	–	–	–	–
160	1,98	2,29	2,57	3,01	3,420	3,96	4,55	5,16	5,99	6,76	–	–	–	–
200	2,29	2,65	2,97	3,47	3,920	4,57	5,27	5,96	6,95	–	–	–	–	–
250	2,65	3,06	3,46	4,01	4,540	5,29	6,08	6,88	8,03	–	–	–	–	–
320	3,11	3,58	4,05	4,72	5,330	6,21	7,15	8,10	–	–	–	–	–	–
400	3,60	4,14	4,68	5,45	6,160	7,19	8,26	9,40	–	–	–	–	–	–
500	4,16	4,79	5,40	6,30	7,130	8,31	5,25	10,80	–	–	–	–	–	–
600	4,68	5,40	6,08	7,11	8,030	9,34	10,76	12,15	–	–	–	–	–	–

Таблица 55. Время загрузки (выгрузки) приспособления в камерную печь (вручную)

Количество поддонов (коробок) в садке N, до	Масса поддона (коробки) Q, кг, до						
	1,0	1,6	3,0	5,0	8,0	12,0	20,0
	Время на одну садку, мин						
1	0,190	0,219	0,266	0,308	0,355	0,401	0,467
2	0,331	0,380	0,460	0,536	0,618	0,697	0,813
3	0,441	0,527	0,637	0,746	0,853	0,963	1,160
5	0,688	0,792	0,958	1,120	1,280	1,450	1,690
8	0,999	1,150	1,390	1,620	1,860	2,110	2,450
10	1,200	1,380	1,670	1,940	2,240	2,530	2,950
12	1,190	1,600	1,940	2,240	2,580	2,630	2,400
14	1,570	1,810	2,200	2,550	2,930	3,310	3,860
16	1,750	2,010	2,470	2,850	3,250	3,690	4,290
18	1,920	2,200	2,660	3,120	3,570	4,050	4,710
20	2,090	2,390	3,160	3,380	3,900	4,390	5,130

При проектировании оригинальных технологических процессов тепловой обработки поиск данных укрупненных нормативов времени в справочниках часто представляет сложную задачу. В этом случае при расчете оперативного времени можно использовать метод микроэлементного нормирования. Микроэлементное нормирование – это инструмент для разложения действий рабочего на отдельные элементы, длительности которых уже известны (измерены в более фундаментальных исследованиях), а затем их суммирования для вычисления искомой нормы времени на производственную операцию. При микроэлементном нормировании труда сложные трудовые действия рабочего разделяют на ряд простых элементов, таких, как «взять», «повернуть», «установить» и т. п. Имея нормативы времени на отдельные микроэлементы, можно спроектировать и определить норму времени на разнообразные трудовые процессы, как выполняемые, так и не выполняемые в производстве. Микроэлемент состоит из одного или нескольких движений, выполняемых непрерывно, и представляет такой элемент трудового процесса, который дальше расчленять нецелесообразно. Затраты времени на выполнение микроэлементов с учетом влияющих факторов

представлены в справочниках микроэлементных нормативов. Пользуясь данной системой, можно охватить микроэлементным нормированием до 80% ручных трудовых процессов, встречающихся на различных видах работ. Одним из основных преимуществ микроэлементного нормирования труда является то, что оно позволяет создавать в короткие сроки нормативы без проведения больших исследований. К достоинствам МЭН можно отнести:

- точность и объективность получаемых нормативов, на которые не может повлиять намеренное негативное поведение работника;
- простота методики проведения замеров;
- возможность использования для проектируемых технологических процессов, где отсутствует возможность провести замеры фактических трудозатрат;
- возможность прогнозировать выигрыши для тех или иных мер по их оптимизации без их практической реализации.

За рубежом созданы автоматизированные системы микроэлементного нормирования, такие, как Most, Univation, Wocom, 4M-Data, Modapts Plus, Worк Factor и др. Наиболее распространенной, является система МТМ (Methods-Time Measurement), составленная на основе анализа большого фактического материала, анализа большого количества трудовых процессов. Система МТМ-1, являющаяся системой первого уровня, содержит 460 значений нормативов времени, охватывающих 19 основных движений. В России создана аналогичная система микроэлементного нормирования, которая получила название «Базовая система микроэлементных нормативов времени 1-го уровня (БСМ-1)» [41] Система состоит из 41 микроэлемента - 26 микроэлементов, выполняемых руками, 6 – ногами, 7 – туловищем и 2 – глазами, объединенных в 20 групп. Микроэлементное нормирование является одним из наиболее перспективных и развивающихся методов организации единства норм труда, повышения их качества и возможности использования при составлении компьютерных программ для обоснования и расчета затрат труда на выполнение определённого вида работ.

Результаты нормирования в дальнейшем используют для расчета технико-экономических показателей проекта.

23. Оформление технологической документации

Все решения, принятые в процессе ТПП изделия должны быть документально оформлены. Технологическая документация (ТД) выполняет две основные функции – организационную и информационную. Информационная функция заключается в том, что ТД содержит необходимую информацию для различных служб предприятия и используется для определения загрузки оборудования участков и цехов, установления потребности в средствах технологического оснащения и материалах, расчета себестоимости изделия. Организационная функция ТД служит средством организации труда всех участников производственного процесса и обеспечивает изготовление деталей и сборочных единиц. Для эффективного использования ТД она стандартизирована и унифицирована. Создание и оформление технологической документации производят в соответствии с Единой системой технологической документации (ЕСТД), которая включает в себя комплекс государственных стандартов и руководящих нормативных документов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения порядок разработки, комплектации, оформления и обращения технологической документации, применяемой при изготовлении и ремонте изделий (включая контроль и перемещения). Комплекс стандартов и руководящих нормативных документов ЕСТД предусматривает:

- применение единых правил оформления технологических документов в зависимости от типа и характера производства, состава и вида разрабатываемых технологических процессов (операций), применяемых способов их описания;
- применение унифицированных бланков технологических документов и централизованного их размножения;

• обеспечение оптимальных условий при передаче технологической документации на другое предприятие (другие предприятия) с минимальным переоформлением;

• создание базы для автоматизированных систем управления и проектирования;

• создание предпосылок по снижению трудоемкости инженерно-технических работ в сфере технологической подготовки и управления производством;

• создание необходимых условий для разработки прогрессивных, типовых и групповых технологических процессов;

• обеспечение взаимосвязи с разработанными и разрабатываемыми системами стандартов ЕСКД, ЕСТПП и др.

23.1. Виды описания технологического процесса

Содержание разработанного ТП записывают с различной степенью детализации описания.

1. *Маршрутное описание* – сокращенное описание всех технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов. Маршрутное описание технологических процессов (ТП) используют в документах на ТП, выполняемые в опытном и мелкосерийном типах производства. Маршрутное описание применяют для операций не связанных с жесткой регламентацией режимов и в тех случаях, когда квалификация исполнителей позволяет за счет производственного опыта самостоятельно настраивать оборудование на оптимальный режим работы. Не рекомендуется применять маршрутное описание для операций, связанных с опасностью выполняемых работ, с надежностью изготовления изделий и их эксплуатацией и т. п.

2. *Операционное описание* – полное описание всех технологических операций в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов. Операционное описание ТП характерно для документов, разрабатываемых и применяемых в серийном и массовом типах производства.

Соответствующая форма организации таких производств определяет постоянное закрепление за каждым рабочим местом документов с подробнейшим выполнением действий

3. *Маршрутно-операционное описание* – сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения с полным описанием отдельных операций в других технологических документах Маршрутно-операционное описание используют для ТП, в которых присутствуют отдельные операции, использующие другой технологический метод, или более сложное в обслуживании технологическое оборудование, или требующие строгого соблюдения технологического режима. Например, ТП сборки-сварки, в котором для основной части процесса, связанной с подготовкой составных частей под сварку, принято маршрутное описание, а для операций, непосредственно связанных со сваркой, – операционное. Выбор степени детализации определяет разработчик технологической документации (ТД) с учетом стадии разработки документов, типа производства и сложности выпускаемых изделий.

23.2. Виды технологических документов

Технологическим документом называют графический или текстовый документ, который отдельно или в совокупности с другими документами определяют технологический процесс или операцию изготовления изделия. В зависимости от назначения технологические документы подразделяют *на основные и вспомогательные***.** К основным технологическим документам относят документы: содержащие сводную информацию, необходимую для решения одной или комплекса инженерно-технических, планово-экономических и организационных задач; полностью и однозначно определяющие технологический процесс (операцию) изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия). К вспомогательным технологическим документам относят документы, применяемые при разработке, внедрении и функционировании вспомогательных технологических процессов и операций, например, карта заказа на проектирование технологической оснастки, акт

внедрения технологического процесса и др. Основные технологические документы подразделяют на документы *общего и специального назначения***.** К документам общего назначения относят технологические документы, применяемые в отдельности или в комплектах документов на технологические процессы (операции), независимо от применяемых технологических методов изготовления или ремонта изделий (составных частей изделий), например, карты эскизов и технологические инструкции. К документам специального назначения относят документы, применяемые при описании технологических процессов и операций в зависимости от типа, вида производства и применяемых технологических методов изготовления или ремонта изделий (составных частей изделий), например, маршрутные карты, карты технологического процесса, карты типового (группового) технологического процесса, ведомости изделий (деталей, сборочных единиц) т.д.

Выбор и построение форм технологических документов

В системах технологической подготовки производства применяют большой состав различной технологической документации. Ее выбор определяется:

- типом и видом производства;
- технологическими методами, применяемыми при изготовлении деталей;
- наличием специфического оборудования;
- стадией разработки технологической документации;
- объемом выпуска изделий.

Выбор документов в зависимости от специфики производства. Для специфических или ответственных производств применяют оригинальные (настандартизованные) формы подробного описания технологических операций или технологических процессов. Подробные технологические карты так же применяют для сложного технологического оборудования, или оборудования, имеющего определенную специфику настройки и управления. Комплектность документов для каждого единичного технологического процесса (ГОСТ 3.1119-83**)** устанавливается разработчиком документов применительно к конкретным

условиям производства. Допускается применение дополнительных технологических документов.

Таблица 56. Выбор состава технологической документации в зависимости от стадии разработки

Предварительный проект	Разработка документации для изготовления макета изделия или его составных частей
Разработка документации опытного образца	Разработка документации для изготовления опытного образца изделия Корректировка документации по результатам предварительных испытаний опытного образца
Разработка документации опытной партии изделий	Разработка документации для изготовления опытной партии изделий Корректировка документации по результатам предварительных и приемочных испытаний опытной партии изделий
Разработка документации для серийного производства	Разработка документации для изготовления серийного (массового) производства изделий

При маршрутном описании технологического процесса маршрутная карта выполняет роль основного документа, где все операции описывают в технологической последовательности без указания переходов и режимов обработки, например ЕТП слесарных, слесарно-сборочных работ (табл. 57)

Таблица 57. Комплект документов при маршрутном описании технологического процесса

1	Титульный лист (ТЛ)	желательно

2	Маршрутная карта (МК)	обязательно
3	Ведомость оснастки (ВО)	желательно
4	Комплектовочная карта (КК)	желательно
5	Ведомость операций (ВОП)	желательно
6	Карта эскизов (КЭ)	желательно

При маршрутно-операционном описании технологического процесса маршрутная карта (МК) выполняет роль основного документа, где все операции описывают в технологической последовательности без указания переходов и режимов обработки. В ведомости операций указываются технологические переходы отдельных операции (например сборки) дающие представление о ходе данной операции (таблица 58).

Таблица 58. Комплект документов при маршрутно-операционном описании технологического процесса

1	Титульный лист (ТЛ)	желательно
2	Маршрутная карта (МК)	обязательно
3	Ведомость оснастки (ВО)	желательно
4	Комплектовочная карта (КК)	желательно
5	Ведомость операций (ВОП)	обязательно
6	Карта эскизов (КЭ)	желательно

При операционном описании технологического процесса маршрутная карта (МК) выполняет роль основного документа, где все операции описывают в технологической последовательности без указания переходов и режимов обработки.

Второй основной документ – альбом операционных карт, где подробно описывается каждая операция.

Таблица 59. Комплект документов при операционном описании процесса

1	Титульный лист (ТЛ)	желательно
2	Маршрутная карта (МК)	обязательно
3	Ведомость оснастки (ВО)	желательно
4	Комплектовочная карта (КК)	желательно
5	Операционная карта (ОП)	обязательно
6	Карта эскизов (КЭ)	желательно

23.3. Титульный лист

На титульном листе комплекта технологической документации указывается:

- организация – разработчик технологического процесса обработки;
- номер и наименование детали (согласно рабочего чертежа детали);
- количество листов всего технологического процесса (титульный лист считается первым листом технологического процесса);
- фамилия разработчика технологического процесса;
- фамилия проверившего техпроцесс (руководителя проекта);
- фамилия нормоконтролера;
- фамилия лица, утвердившего технологический процесс

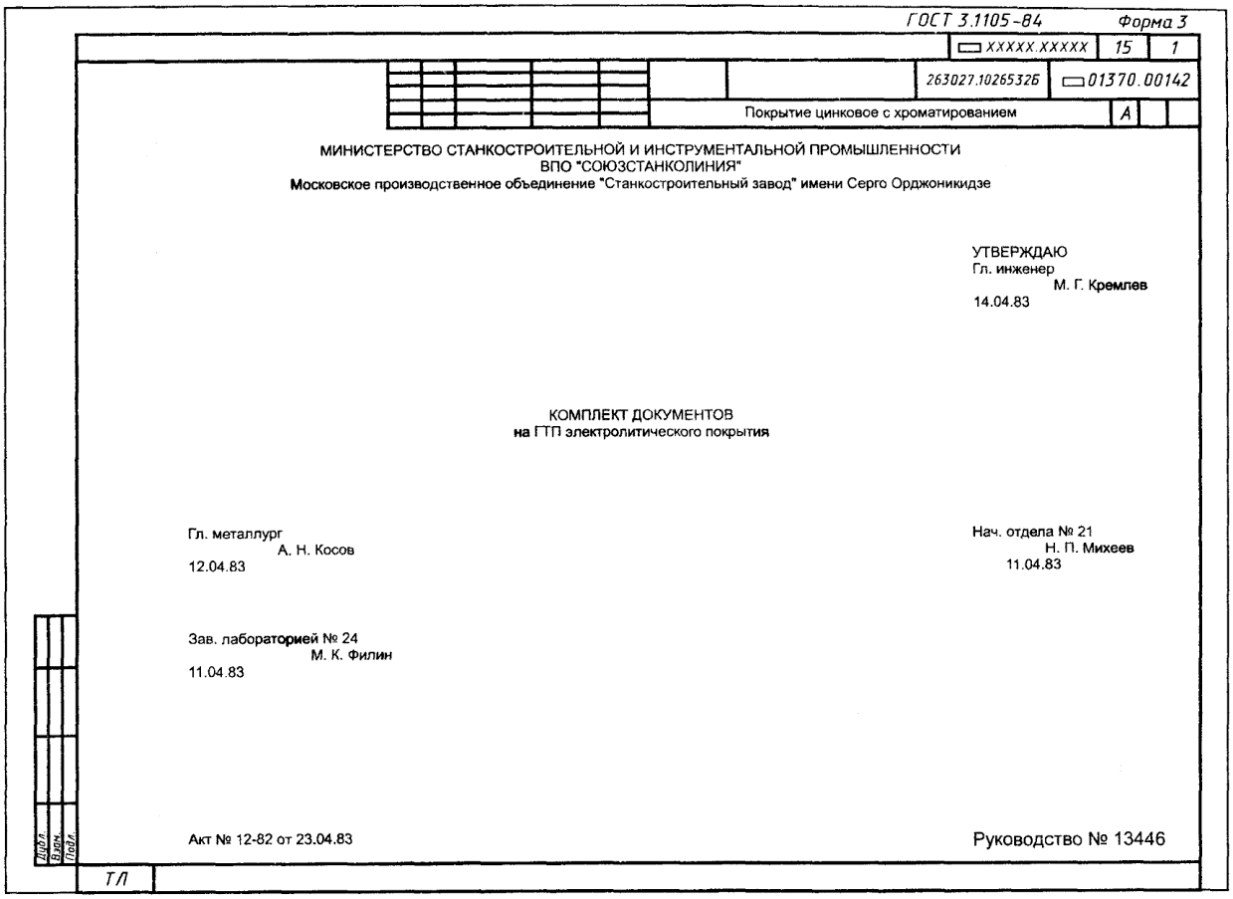


Рисунок 158. Форма титульного листа пакета технологической документации.

23.4.Основная надпись на технологических документах.

Все виды технологических документов содержат единую форму основной надписи, содержание и правила заполнения которой регламентируются ГОСТ 3.1103-82 «Единая система технологической документации. Основные надписи». Данные вносимые в основную надпись приведены в таблице.

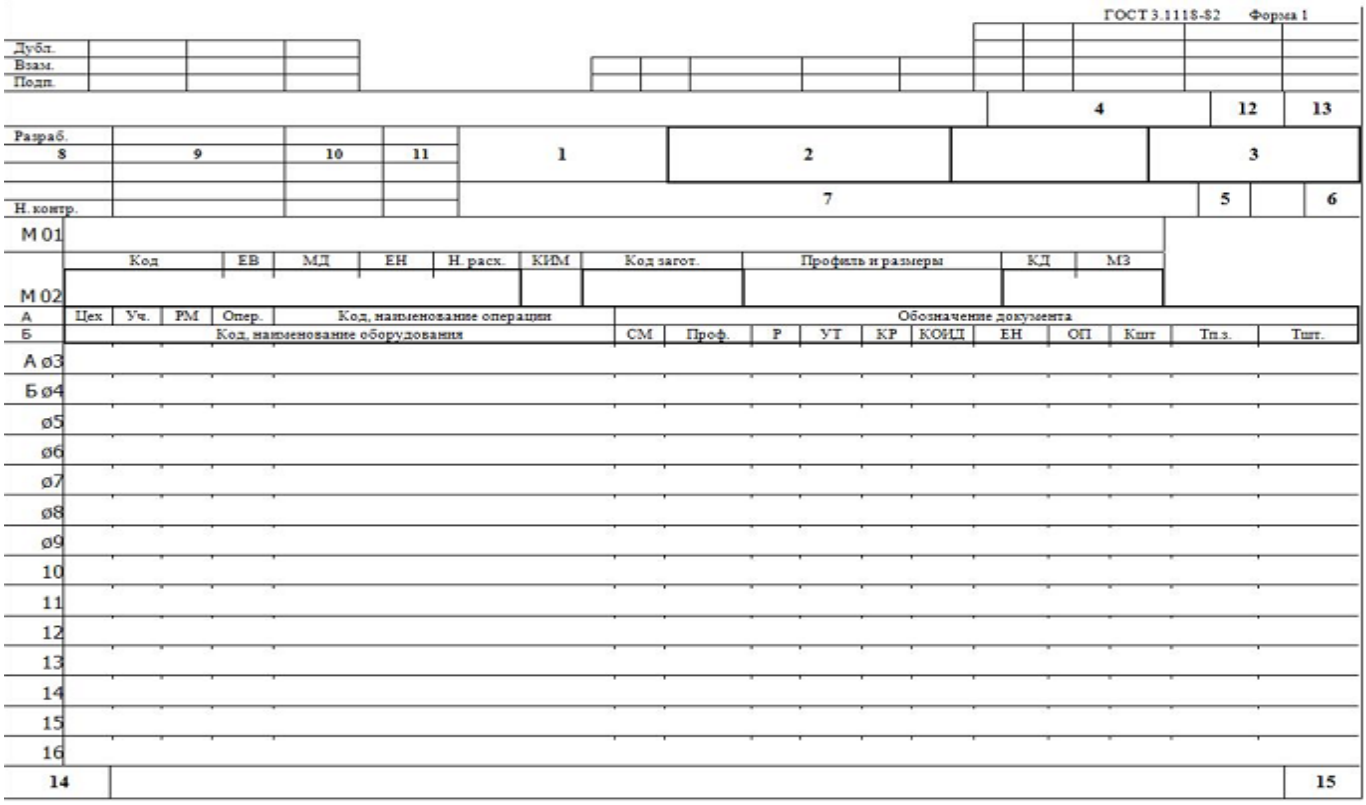


Рисунок 159. Форма бланка с основной надписью.

Номер графы	Содержание вносимой информации
1	Наименование организации в полном или сокращенном виде
2	Обозначение изделия (детали, сборочной единицы) по основному конструкторскому документу
3 4	Обозначение документа: - место кода организации разработчика или учебного заведения - код характеристики документа, выбираемый из ГОСТ 3.1201-85.
5	Литера, присвоенная технологическому документу по ГОСТ 3.1102-81: П – предварительный проект; А – серийное производство; Б – массовое производство; *(КП – курсовой проект; ДП – дипломный проект)*
6	Номер операции

7	Наименование изделия (детали, сборочной единицы) по основному конструкторскому документу
8	Характер работы, выполняемой лицами, подписывающими документ
9	Фамилии лиц, участвующих в разработке, оформлении и контроле документа
10	Подпись ответственного лица, участвующего в разработке
11	Дата подписи (Написание месяца римскими цифрами не допускается)
12	Общее количество листов документа
13	Порядковый номер листа документа
14	Условное обозначение вида документа по ГОСТ 3.1102-81. МК – маршрутная карта; КЭ – карта эскизов; ОК – операционная карта
15	Графа для сквозной нумерации листов всего комплекта или всей пояснительной записки

23.5. Карта эскизов

Карты эскизов содержат графическую иллюстрацию определенной операции изготовления детали и являются дополнением к тексту соответствующей операционной карте. Масштаб выбирают произвольным, однако принятый масштаб изображения желательно выдерживать на всех эскизах. На каждом эскизе показывают:

- заготовку в рабочем положении;
- поверхность, обрабатываемую на данной операции (контурной линией);
- остальную часть детали тонкой сплошной линией или штрихпунктирной линией с двумя точками с обязательным изображением предыдущих обработанных поверхностей;

• условные обозначения технологических баз, опор, зажимов и установочных устройств;

• размеры, получаемые на данной операции с указанием допусков и требуемой шероховатости обработанных поверхностей и их условное обозначение арабскими цифрами в окружности диаметром 6 - 8 мм.

Порядок оформления карты эскизов регламентирован следующими стандартами**:**

• ГОСТ 3.1128-93 ЕСТД. Общие правила выполнения графических технологических документов;

• ГОСТ 3.1105-84 Единая система технологической документации. Форма и правила оформления документов общего назначения

• ГОСТ 3.1107-81 Единая система технологической документации. Опоры, зажимы и установочные устройства. Графические обозначения;

• ГОСТ 3.1125-88 Единая система технологической документации. Правила графического выполнения элементов литейных форм и отливок;

• ГОСТ 3.1126-88 Единая система технологической документации. Правила выполнения графических документов на поковки

ГОСТ 3.1201-85 Единая система технологической документации. Система обозначения технологической документации.

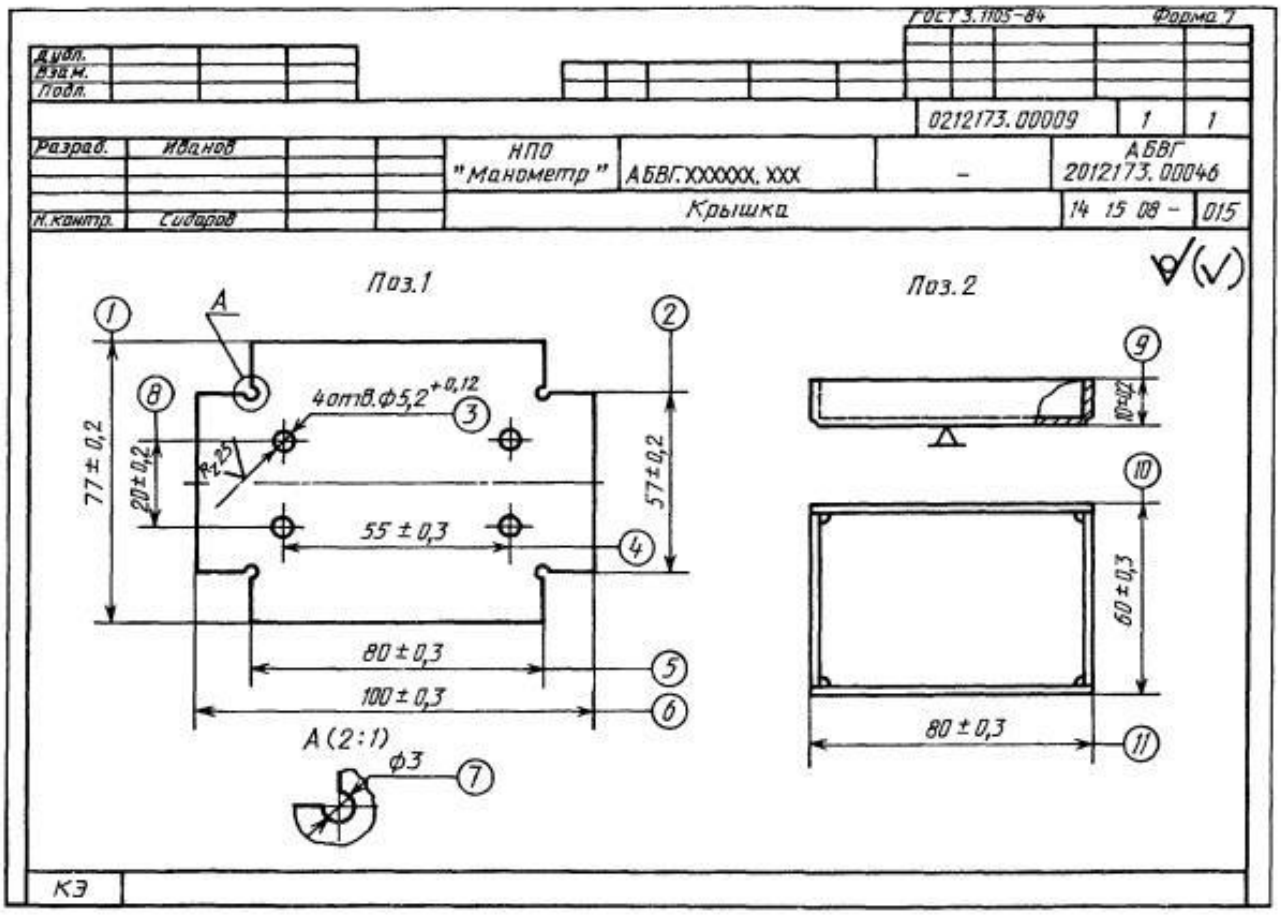


Рисунок 160. Карта эскизов

23.6.Маршрутная карта

Общие требования к оформлению технологических документов могут быть сформулированы следующим образом

- Для описания технологических процессов (ТП) в технологической документации (ТД) используют способ заполнения, при котором информацию вносят построчно несколькими типами строк. Каждому типу строки соответствует свой служебный символ.
- В качестве обозначения служебных символов приняты буквы русского алфавита, проставляемые перед номером соответствующей строки и выполняемые прописной буквой. После служебного символа следует порядковый номер строки на текущей странице ТД. Например, **М01**, **А03**, **О14** и т.д.

• Допускается для удобства восприятия вместо начальной цифры **0** указывать символ **Ø**. Например, **МØ1**, **АØ3**, и т.д. Н

• Нумерацию строк производят раздельно для каждой страницы. Нумеруют все строки страницы ТД, даже пустые или не имеющие служебного символа.

• Служебные символы определяют состав информации, размещаемой в графах данного типа строки. Используемые служебные символы и содержание информации, вносимой в строки формы ТД, определяется соответствующим стандартом ЕСТД.

• Простановка служебных символов обязательна. Допускается не проставлять служебный символ на последующих строках, несущих ту же информацию, при описании одной и той же операции, на данном листе документа.

• Строки могут быть разделены на графы. Размеры граф установлены соответствующими стандартами.

Маршрутная карта является основным технологическим документом; ее разрабатывают на всех стадиях составления рабочей документации. Она содержит описание технологического процесса изготовления и контроля изделия по всем операциям в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, профессии и разряде рабочего, количестве одновременно обрабатываемых деталей и количестве рабочих, занятых выполнением операции, единице нормирования, объеме производственной партии, норме штучного и подготовительно-заключительного времени. В маршрутной карте также указывается наименование и твердость материала, масса детали и заготовки, вид, профиль и размеры заготовки, номер и наименование операции, сведения по охране труда.

Формы маршрутных карт являются унифицированными и применяются вне зависимости от типа производства и степени детализации технологических процессов. При маршрутном и маршрутно-операционном описании технологического процесса МК является одним из основных документов, на котором описывается весь процесс в технологической последовательности

выполнения операций. Для изложения технологических процессов в МК используют способ заполнения, при котором информацию вносят построчно несколькими типами строк. Каждому типу строки соответствует свой служебный символ. Информация, вносимая в отдельные графы и строки маршрутной карты, выбирается с помощью ГОСТ 3.1118-8

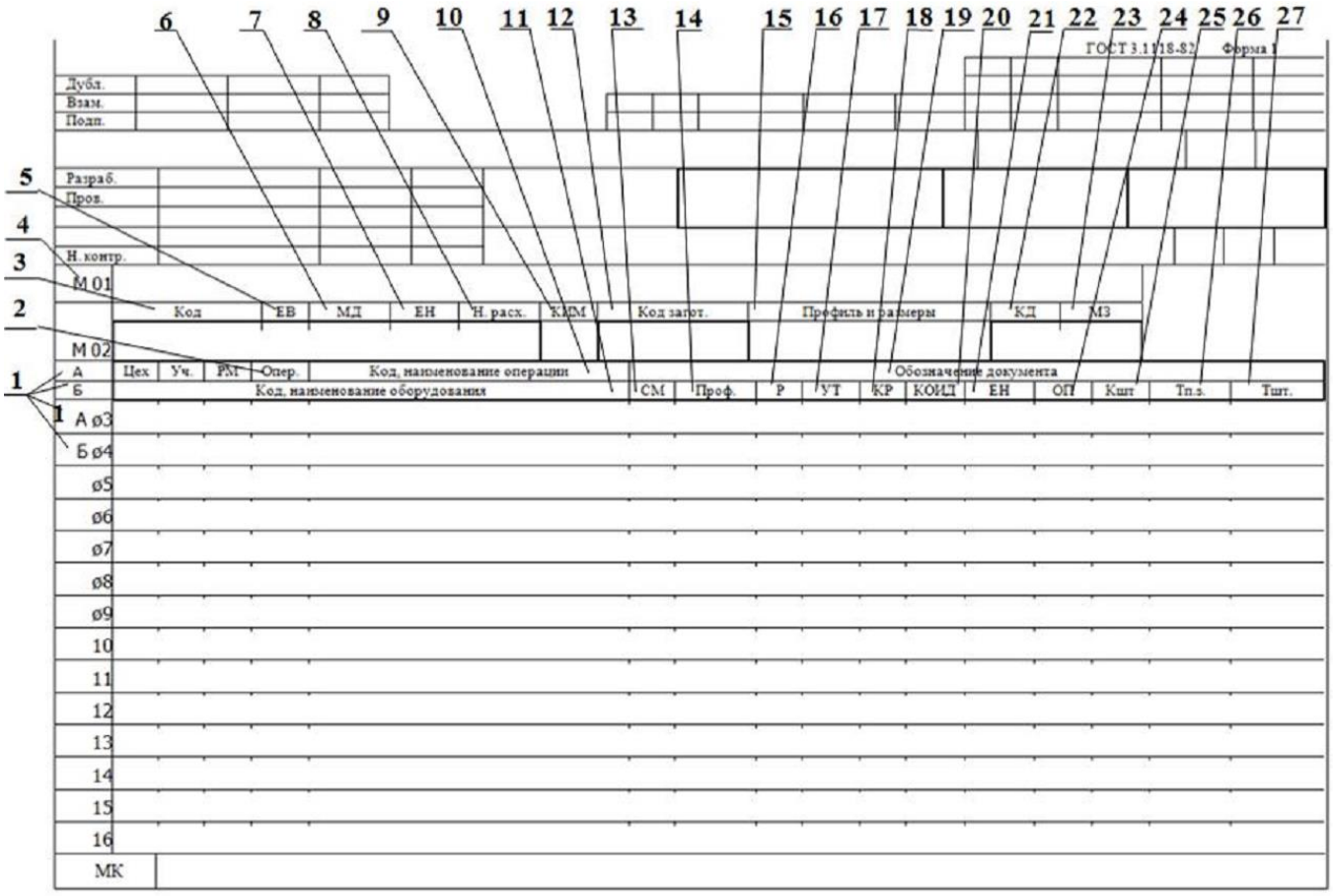


Рисунок 161 Маршрутная карта

Номер графы	Содержание вносимой информации

1	Обозначение служебных символов: А – номер цеха, участка, рабочего места, номер операции, код и наименование операции, обозначение документов, применяемых при выполнении операции. Б – код, наименование оборудования и информация по трудозатратам. М – информация о применяемом основном материале и исходной заготовке, вспомогательных и комплектующих материалах с указанием их кода, кода единицы величины, количества на изделие и нормы расхода. О – содержание операции (перехода). Информация записывается по всей строке, при необходимости продолжение информации переносится на следующие строки. Т – информация о технологической оснастке в такой последовательности: приспособления; вспомогательный инструмент; режущий инструмент; слесарно-монтажный инструмент; средства измерения. Р – строка вводится, если требуется указать информацию о режимах обработки.
2	Номер операции в технологической последовательности изготовления, контроля и перемещения, производится через 5 позиций: 005, 010, … 095, 100, 105 и т.д
3	Код материала.
4	В графе «М01» указывается наименование, сортамент, размер и марка материала, номер стандарта, т.д. В данной графе запись выполняется одной строкой с разделительным знаком « / ». Круг 80мм ГОСТ 7417-75 /Сталь 45ГОСТ 1050-88
5	Код единицы величины – массы, длины, площади и т.п. детали или заготовки по классификатору. Например: для массы код в килограммах – 166; в граммах – 163; в тоннах – 168
6	Масса детали по конструкторскому документу

7	Единица нормирования, на которую установлена норма расхода материала или времени (1, 10, 100 и т.д.)
8	Норма расхода материал
9	Коэффициент использования материала
10	Код операции согласно классификатору технологических операций
11	Код оборудования, краткое наименование оборудования.
12	Код заготовки по классификатору. Допускается указывать вид заготовки (отливка, прокат, поковка и т.п.)
13	Код степени механизации труда, указывается однозначной цифрой: 1-Наблюдение за работой автоматов 2-Работа с помощью машин и автоматов 3-Вручную при машинах и автоматах 4--Вручную без машин и автоматов 5-Вручную при наладке машин и ремонте
14	Код профессии согласно классификатору
15	Профиль и размеры исходной заготовки.
16	Разряд работы, необходимый для выполнения операции. Код включает три цифры. Первая – разряд работы по тарифно-квалификационному справочнику, две следующие – код формы и системы оплаты труда: 10 – сдельная оплата труда 11 – сдельная система оплаты труда прямая 12 – сдельная система оплаты труда премиальная 13 – сдельная система оплаты труда прогрессивная 20 – повременная форма оплаты труда 21 – повременная система оплаты труда простая 22 – повременная система оплаты труда премиальная

17	Код условий труда, включает в себя цифру – условия труда: 1 – нормальные, 2 – тяжелые и вредные, 3 – особо тяжелые, особо вредные букву, указывающую вид нормы времени: Р – аналитически-расчетная, И – аналитически-исследовательская, Х – хронометражная, О – опытно-статистическая.
18	Количество исполнителей, занятых при выполнении операции.
19	Обозначение документов, применяемых при выполнении данной операции.
20	Количество одновременно обрабатываемых заготовок.
21	Единица нормирования, на которую установлена норма времени. Например: 1, 10, 100.
22	Количество деталей, изготавливаемых из одной заготовки
23	Масса заготовки.
24	Объем производственной партии в штуках
25	Коэффициент штучного времени при многостаночном обслуживании зависит от количества обслуживающих станков: Количество станков 1 2 3 4 5 6 Коэффициент 1 0,65 0,48 0,39 0,35 0,32
26	Норма подготовительно-заключительного времени на операцию
27	Норма штучного времени на операцию

23.7. Формы и требования к заполнению и оформлению документов на технологические процессы термической обработки (ГОСТ 3.1405-86)

Выбор соответствующих видов документов в зависимости от типа и характера производства, стадии разработки технологической документации, степени детализации описания ТП устанавливается самостоятельно инженером-технологом. Возможные варианты описания технологического процесса приведены в таблице.

Таблица 60 Возможные варианты описания технологического процесса термической обработки

Тип производства	Стадия разработки документации	Степень детализации описания технологического процесса	Наименование вида документа	Условное обозначение вида документа	Указания по применению
Единичное, мелкосерийное	Предварительный проект, разработка документации опытного образца (опытной партии)	Маршрутно-операционное описание	Маршрутная карта (МК) по ГОСТ 3.1118-82; формы 1, 1б, 3, 3б, 5, 5а	КТП	Для описания операций термической обработки с указанием режимов в строке со служебным символом «Р» или в тексте содержания перехода. Маршрутное описание допускается применять для операций, сопутствующих операциям термической обработки, например, операции зачистки и т.п.
Среднесерийное, крупносери	Разработка документации серийного	Операционное описание	Маршрутная карта (МК) по ГОСТ	ОК	Для описания операций термической

Тип производства	Стадия разработки документации	Степень детализации описания технологического процесса	Наименование вида документа	Условное обозначение вида документа	Указания по применению
йное	и крупносерийного производства		3.1118-82; формы 1, 1б, 3, 3б, 5, 5а		обработки с указанием режимов в строке со служебным символом «Р» или в тексте содержания перехода.
			То же	КТО	Для описания типовых (групповых) операции с указанием постоянной информации для всей группы изделий
			Маршрутная карта (МК) по ГОСТ 3.1118-82; формы 1, 1б, 3, 3б, 5, 5а	КТИ	Для указания переменной информации по изделию одного обозначения дополнительно к ТТП, к типовой (групповой) операции (ТС, ГО) взамен ведомости к типовому (групповому) процессу (ВТП, ВТО)
			Маршрутная карта (МК) по ГОСТ	КТП	Для описания операций, сопутствующи

Тип производства	Стадия разработки документации	Степень детализации описания технологического процесса	Наименование вида документа	Условное обозначение вида документа	Указания по применению
			3.1118-82, формы 2, 1б, 4, 3б		х операциям термической обработки, в технологической последовательности
			То же	КТТП	Для описания операций термической обработки и операций, сопутствующих операциям термической обработки, а технологической последовательности
Все типы производства	На всех стадиях разработки документации	Маршрутно-операционное описание	Ведомость деталей к ТТЦ, ГТП по ГОСТ 3.1121-84, формы 3, 3а, 2 и 2а	ВТП (ВТО)	Для указания состава изделий, обрабатываемых по ТТП (ГТП), ТО(ГО)
			Технологическая инструкция по ГОСТ 3.1105-84, формы 5 и 5а	ТИ	Для описания процессов подготовки материалов, среды охлаждения и т. п.
			Карта эскизов ГОСТ 3.1105-84, формы 6, 6а,	КЭ	Для указания графических иллюстраций

Тип производства	Стадия разработки документации	Степень детализации описания технологического процесса	Наименование вида документа	Условное обозначение вида документа	Указания по применению
			7, 7а, 8, 8а		
			Ведомость технологических документов по ГОСТ 3.1122-84, формы 5, 5а	ВТД	

Для описания технологических процессов (операций) термической обработки применяют формы маршрутных карт по ГОСТ 3.1118-82. Запись наименования операции выполняют в соответствии с классификатором технологических операций машиностроения. Указание параметров технологических режимов термической обработки выполняют в последовательности, предусмотренной в типовых блоках режимов термической обработки по всей длине строки с возможностью переноса информации на последующие строки. Графы блоков режимов термообработки заполняют в соответствии с табл. 61. Пример оформления формы МК/КТП приведен на рисунке 162.

Таблица 61. Заполнение граф маршрутной карты ТО

Номер графы	Условное обозначение графы при		Номер блока режимов	Содержание графы
	ручном способе заполнения	автоматизированном проектировании		
1	Среда	СРЕДА	Р1	Наименование среды, в которой производят нагрев или охлаждение изделия
2	Т-ра	Т-РА	Р1	Температура среды нагрева или охлаждения изделия
3	Скорость	*V*	Р1	Скорость: перемещения

Номер графы	Условное обозначение графы при		Номер блока режимов	Содержание графы
	ручном способе заполнения	автоматизированном проектировании		
				изделия в рабочем пространстве оборудования; нагрева или охлаждения изделия.
4	Время	*T*	Р1, Р3	Время нагрева, выдержки или охлаждения изделия и
5	Твердость	ТВЕРДОСТЬ	Р1	Твердость изделия после термообработки
6	-	-	Р1, Р2, Р3	Резервная графа. Заполняют при необходимости
7	ЛГ	ЛГ	Р2	Ламповый генератор (ЛГ)*
8	IA	IA	Р2	Сила анодного тока ЛГ*
9	IC	IC	Р2	Сила сеточного тока ЛГ*
10	UA	UA	Р2	Анодное напряжение ЛГ*
11	UK	UK	Р2	Напряжение на контуре ЛГ*
12	МГ	МГ	Р2	Машинный генератор (МГ)*
13	IГ	IГ	Р2	Сила тока МГ*
14	IB	IB	Р2	Сила тока возбуждения МГ*
15	UГ	UГ	Р2	Напряжение МГ*
16	UN	UN	Р2	Напряжение на индукторе МГ*
17	NГ	NГ	Р2	Потребляемая мощность М*Г
18	№ изл	NH	Р3	Мощность излучения*
19	v луча	VЛ	Р3	Скорость перемещения луча*
20	D пятна	DП	Р3	Диаметр пятна луча*

Номер графы	Условное обозначение графы при		Номер блока режимов	Содержание графы
	ручном способе заполнения	автоматизированном проектировании		

* графы заполняют при индукционном или лазерном нагреве

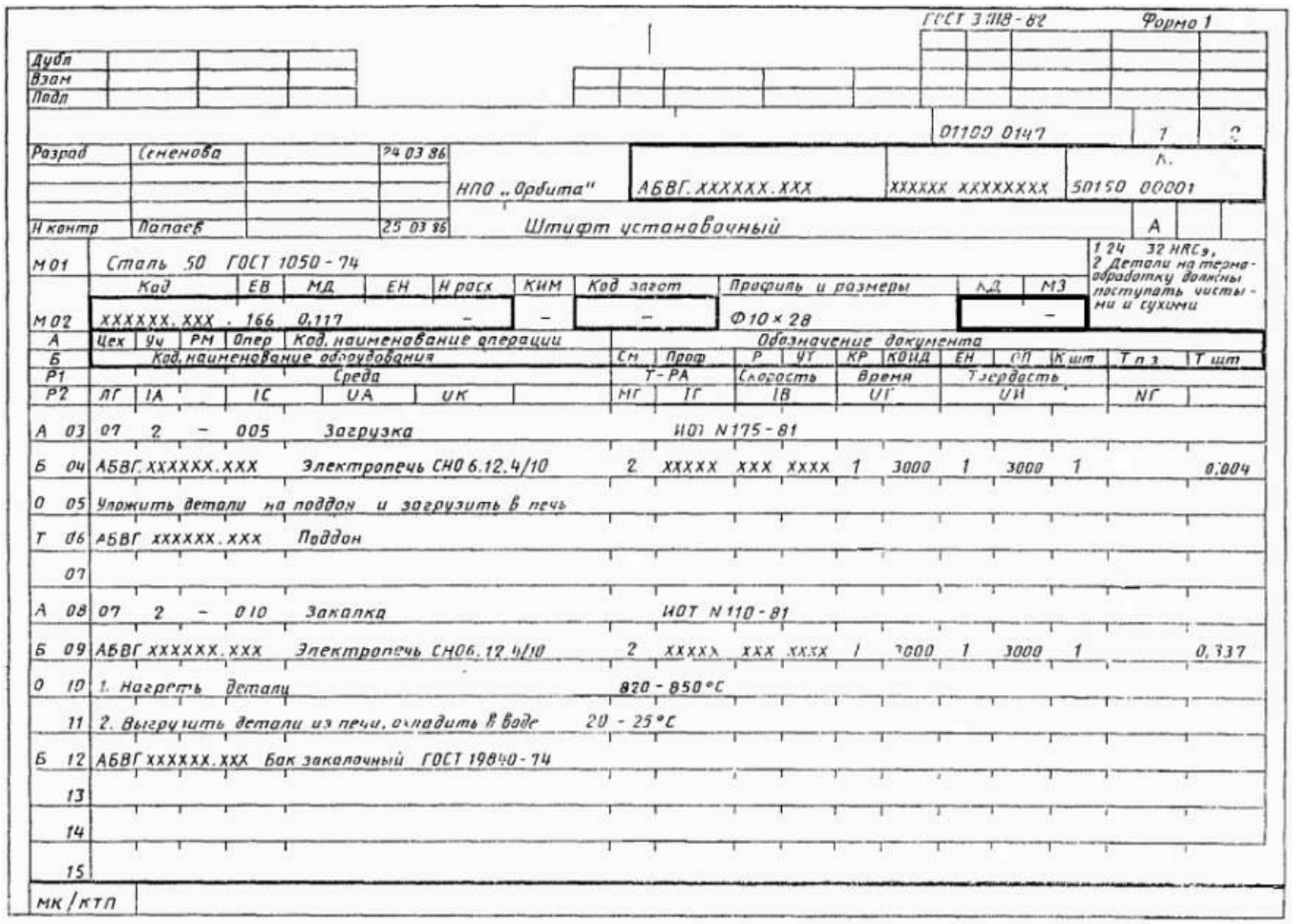


Рис 162 . Пример заполнения маршрутной карты термической обработки

24. Технологическая оснастка. Основы конструирования и выбора

24.1. Классификация и виды приспособлений

Станочными приспособлениями называются дополнительные устройства к станкам, служащие для установки и закрепления обрабатываемых деталей и

инструмента. Приспособления, предназначенные для установки и закрепления деталей называться просто приспособлениями. Приспособления для закрепления режущего инструмента называются вспомогательным инструментом. Станочные приспособления вместе с режущим и вспомогательным инструментом принято называть технологической оснасткой. Использование приспособлений позволяет решить ряд задач.

1. Расширить технологические возможности станка. В этом случае наиболее существенную экономию получают за счёт того, что оснащение станка специальным приспособлением позволяет отказаться от приобретения другого станка, или транспортирования деталей на другой участок или предприятие, где имеется соответствующее оборудование.

2. Повысить производительность оборудования. Существует различные причины повышения производительности: сокращение время на установку и закрепление деталей (вспомогательное время); увеличение число одновременно работающего инструмента; одновременная обработка нескольких деталей; повышение режимов обработки, за счет увеличения жесткости деталей.

3. Изменить назначение оборудования. Наиболее часто применяется в практике работы цехов индивидуального производства, где при большой номенклатуре деталей парк станков ограничен.

4. Повысить точность и качество изготовления и сборки изделий. Применение приспособлений позволяет уменьшить погрешности, возникающие на различных этапах технологического процесса, повысить единообразие различных свойств изготовляемых изделий, сокращает расход материала из-за уменьшения припусков, снижает трудоемкость последующей обработки, а так же способствует достижению взаимозаменяемости элементов конструкции и обеспечивает возможность быстрой сборки изделия.

5. Облегчить условия труда и повысить безопасность работы. Организация рабочих мест, их применение приспособлений позволяет рационально осуществлять ход технологического процесса, устранять в процессе работы ненужные, лишние и малоэффективные трудовые движения, совмещать их за

счет параллельности выполнения отдельных работ. Кроме того механизация позволяет повысить безопасность персонала при выполнении опасных и вредных операций.

6. Сократить количество работающих и снизить необходимую квалификацию для выполнения операций. Значительная доля подготовительно-заключительного времени приходится на статическую настройку технологической системы. Использование различных регулировочных и вспомогательных устройств позволяет быстро и с достаточной точностью придать требуемое положение детали или заготовки относительно рабочих органов станка, что позволяет уменьшить численность персонала и требования к квалификации рабочих.

По целевому назначению все приспособления для механической обработки деталей подразделяются на пять основных групп.

Станочные приспособления делятся в зависимости от вида механической обработки на сверлильные, фрезерные, расточные токарные, строгальные и т.д. К этой группе можно отнести приспособления специального назначения (приспособления для гибки, рихтовки и др.).

Приспособления для установки и закрепления режущего инструмента выполняют роль связующего звена между инструментом и станком. Рассматриваемая группа приспособлений характеризуется большим количеством нормализованных устройств благодаря широкой стандартизации и нормализации самих рабочих инструментов.

Сборочные приспособления для выполнения соединений сопрягаемых деталей в узлы и целые изделия подразделяются на приспособления для крепления базовых деталей (или узлов) собираемого объекта; для обеспечения правильной установки соединяемых элементов изделия; для предварительного деформирования собираемых упругих элементов (пружин, рессор, разрезных колец); для запрессовки, клёпки, развальцовки.

<u>Приспособления для захвата, перемещения и перевёртывания обрабатываемых заготовок</u> применяются для тяжелых объектов, перемещение которых мускульной силой рабочего невозможно или затруднительно.

По степени специализации приспособления могут быть классифицированы на:

а) *универсальные приспособления* - применяются в условиях индивидуального и мелкосерийного производства - машинные тиски, патроны, делительные головки, поворотные столы, планшайбы, и т.д.
б) *специализированные приспособления*, которые выполняются на базе универсальных приспособлений. Их налаживают для обработки определённых деталей с использованием дополнительных или сменных устройств (например специальных губок для машинных тисков).
в) *специальные приспособления,* которые конструируют и изготавливают в индивидуальном порядке для деталей определённого типа.
По степени механизации и автоматизации приспособления делятся на:

- ручные
- механизированные
- полуавтоматические
- автоматические

Приспособления имеют в своем составе следующие элементы:

1. установочные элементы;
2. зажимные устройства;.
3. элементы, направляющие инструмент;
4. делительные устройства;
5. корпуса и вспомогательные устройства;
6. копирующие устройства;
7. приводы приспособлений.

24.2.Установочные элементы приспособлений

Установочные элементы приспособлений могут быть в виде точечных опор, опорных шайб или пластин, призм

- *Точечные опоры* используют для установки небольших по размерам заготовок. Опоры со сферической опорной поверхностью служат для установки на них деталей и заготовок с необработанными базами. Детали и заготовки с обработанными базами устанавливают на опоры с плоской опорной поверхностью. Опоры с насеченной опорной поверхностью, как правило, являются боковыми опорами или служат для установки по черновым базам.
- *Опорные шайбы и опорные пластины* служат для установки заготовок по окончательно обработанным поверхностям. Шайбы используют для установки мелких, а пластины – средних и крупных по размерам заготовок. Опорные пластины без пазов служат боковыми и верхними опорами, а опорные пластины с пазами - нижними опорами (в пазах собирается стружка). Заготовки цилиндрической формы удобно закреплять в призмах. *Призмой*_называется установочный элемент, имеющий две рабочие плоскости, расположенные друг к другу под углом α, называемым углом призмы. *Регулируемые опоры* применяют для установки заготовок с необработанными поверхностями; при больших изменениях припуска на механическую обработку; при выверке заготовок по разметочным рискам. Установку деталей и заготовок по отверстию осуществляют с использованием установочных пальцев, оправок и самоцентрирующих патронов.
- *Вспомогательные опоры (подводимые)* используют для увеличения жесткости установки если 3-х опорных точек недостаточно. Такие опоры в счёт опорных точек не входят, а конструкция их может быть такой же, как и регулируемых.
- *Комбинированную установку* применяют, когда в качестве баз используют совокупность отдельных элементарных поверхностей заготовок. При этом необходимо обращать внимание на то, чтобы ни один из установочных элементов приспособления не дублировал функции другого

Требования к установочным элементам.

- Контакт при установке должен быть в не более чем шести точках.
- Расстояние между опорами должно быть максимально большим. При этом не возникает опрокидывающий момент.
- Все опоры должны быть жестко связаны между собой.
- Установочные элементы должны располагаться в местах высокой жесткости.
- Установочные элементы не должны портить базы заготовки.
- Если деталь нежесткая – необходимо большее число точек, если необходим поворот - меньшее. Дополнительные опоры должны быть самоустанавливающимися.
- Конструкция установочных элементов должна обеспечивать их быструю замену.
- Чаще всего делают точечные опоры, т.к они обеспечивают максимальную точность, но могут повредить поверхность.
- Обычно опоры изготавливают из сталей с закалкой до HRC 55-60.
- Типовые схемы установки- плоские детали устанавливают на точечные опоры и плоскости, цилиндрические – на призмы, кондукторные втулки, цанги, патроны, центры.
- При наличии внутренних отверстий в качестве опор используют пальцы, конуса или оправки.

24.3.Зажимные устройства

Основное назначение зажимного устройства – обеспечить надежный контакт заготовки с установочными элементами и предотвратить в процессе обработки смещение заготовки под действием сил. Потребность в зажимных устройствах исключается в случаях, когда:

1. силы обработки весьма малы по сравнению с весом заготовок и силами трения;

2. силы обработки (сборки) по направлению таковы, что не могут нарушить положение заготовки, обусловленное базированием.

Основные требования к зажимным устройствам.

- простота, надежность, жесткость и износостойкость;
- постоянная по величине сила закрепления и минимальное время закрепления - открепления заготовки;
- отсутствие деформации заготовки и ее смещения в процессе закрепления;
- при зажиме не должно нарушаться положение детали, достигнутое установкой;
- сила зажима должна надёжно обеспечить неизменное положение детали во время обработки;
- смятие опорных поверхностей детали и её деформация в целом при зажиме должны быть минимальными и сила зажима должна быть оптимальной;
- закрепление детали при установке должно быть рациональным;
- минимальное время закрепления - открепления заготовки.

Принцип действия и конструкцию зажимного устройства конструктор выбирает исходя из конкретных условий выполнения операций:

- типа производства;
- величин сил, действующих на заготовку при выполнении операций;
- конструктивных особенностей заготовки;
- типа станка.

При выборе места приложения силы зажима следует придерживаться следующих правил:

1) сила зажима не должна приводить к опрокидыванию заготовки или ее сдвигу по установочным элементам. Для этого необходимо, чтобы точка приложения силы зажима проецировалась на установочный элемент (как можно ближе к его центру) или в треугольник, образованный линиями, соединяющими центры трех установочных элементов, расположенных в одной плоскости (как можно ближе к центру или в центр тяжести треугольника опор). Участок поверхности заготовки должен быть параллелен поверхности установочных элементов, воспринимающих силу зажима.

2) действие сил зажима и вызываемых ими реакций опор не должно приводить к созданию изгибающих моментов, которые отрицательно сказываются на точности обработки нежестких заготовок;

3) точка приложения силы зажима должна быть как можно ближе к месту обработки, особенно для нежестких заготовок.

Классификация зажимных устройств

В зависимости от энергии источника различают механические, пневматические, гидравлические, пневмогидравлические, электромагнитные, электростатические зажимы. В зависимости от конструкции различают простые зажимы, у которых давление передаётся прямо на деталь (клиновые, эксцентриковые, резьбовые, рычажные) и комбинированные зажимы, у которых давление от штока на деталь передаётся с помощью промежуточных механизмов (клиньев, рычагов, винтов и т.д).

Клиновые зажимные устройства используются для непосредственного зажима заготовки и в сложных зажимных системах, например в качестве усилителей пневмо- и гидроприводов. Клиновые и клиноплунжерные самоцентрирующие механизмы применяют в конструкциях оправок. Достоинствами клиновых механизмов являются простота и компактность конструкции; удобство в наладке и эксплуатации; способность к самоторможению (кроме механизмов с роликами); постоянство сил закрепления, которые не зависят от допуска на размер заготовки.

Основные недостатки: сосредоточенный характер сил закрепления, что затрудняет использование этих механизмов при обработке нежестких заготовок; низкая надежность, которая зависит от характера клинового сопряжения, формы поперечного сечения плунжеров и пазов под плунжеры, зазоров между плунжерами и пазами, защищенности механизма от стружки.

Основными деталями клиновых и клиноплунжерных механизмов являются: клин, к которому приложена сила от привода; плунжеры (кулачки) развивающие силу закрепления; корпус с пазами, в которых перемещаются клин и плунжеры (кулачки); опорные ролики (если в механизме предусмотрено их использование).

Важнейшим конструктивным элементом механизмов является угол скоса клина. С уменьшением угла αувеличивается выигрыш в силе, но одновременно увеличивается проигрыш в перемещениях и наоборот.

Рычажные зажимные механизмы выполняют в виде прихватов (прижимных планок) или в качестве рычагов усилителей силовых приводов. Для облегчения установки заготовок рычажные механизмы выполняют поворотными, откидными и передвижными. По конструкции они могут быть прямолинейными и изогнутыми Рычажные зажимы не обладают свойством самоторможения и не могут быть использованы как отдельные зажимные механизмы. Поэтому их применяют только в сочетании с другими зажимными системами. Они позволяют, при относительной простоте, получить выигрыш в силе (или в перемещениях), обеспечить постоянство усилия зажима, осуществлять закрепление в труднодоступных местах.

Винтовые зажимные механизмы применяются в зажимных устройствах с ручным закреплением деталей, в механизированных приспособлениях и на автоматических линиях в приспособлениях спутниках. Их достоинства это простота и компактность конструкции; широкое использование в конструкции стандартизованных деталей; удобство в наладке; хорошая ремонтопригодность; возможность получать значительную силу закрепления заготовок при сравнительно небольшом моменте на приводе; большой ход нажимного винта (гайки), позволяющий надежно закреплять заготовки со значительными отклонениями размеров. Основные недостатки винтовых зажимных устройств: сосредоточенный характер сил закрепления, что ограничивает применение винтовых зажимов для установки тонкостенных и термически необработанных заготовок; сравнительно большое (0,04 - 0,07 мин) время срабатывания винтовых зажимов с ручным приводом; нестабильность сил закрепления винтовыми зажимами с ручным приводом, что снижает точность обработки (попытки применять тарированные или предельные ключи приводят к увеличению вспомогательного времени и большей утомляемости работающих); возможность смещения детали от силы трения на нажимном конце винта

Эксцентриковые зажимные механизмы (ЭЗМ) используются для непосредственного зажима заготовок и в сложных зажимных системах. Их основные преимущества: простота и компактность конструкции; широкое использование в конструкции стандартизованных деталей; способность к самоторможению; высокое быстродействие (время срабатывания привода около 0,04 мин). Недостатки эксцентриковых зажимных механизмов: сосредоточенный характер сил, что не позволяет применять эксцентриковые механизмы для закрепления нежестких заготовок; силы закрепления круглыми эксцентриковыми кулачками нестабильны и существенно зависят от размеров заготовок; пониженная надежность в связи с интенсивным изнашиванием эксцентриковых кулачков.

В состав эксцентриковых зажимных механизмов входят эксцентриковые кулачки, опоры под них, цапфы, рукоятки и другие элементы. Различают три типа эксцентриковых кулачков: круглые с цилиндрической рабочей поверхностью; криволинейные, рабочие поверхности которых очерчены по спирали Архимеда (реже – по эвольвенте или логарифмической спирали); торцевые. Из-за простоты изготовления наибольшее распространение получили круглые эксцентрики

*Пневматические зажимные механизмы***.** Исходной энергией в пневматических приводах является энергия сжатого воздуха. Широкому внедрению пневматических устройств способствуют следующие их достоинства: относительная простота конструкции и эксплуатации, а следовательно, низкая первоначальная стоимость и быстрая окупаемость затрат; надежность работы в широком диапазоне температур, влажности и запыленности окружающей среды; пожаро- и взрывобезопасность; большой срок службы, достигающий 50 млн. циклов; высокая скорость перемещения выходного звена пневматических исполнительных устройств (линейного до 15 м/с, вращательного до 100 000 об/мин); легкость получения и относительная простота передачи энергоносителя и возможность снабжения им большого количества потребителей от одного источника; отсутствие необходимости в защитных устройствах при перегрузке.

К основным недостаткам пневматических устройств можно отнести: недостаточную плавность перемещения рабочих элементов, особенно при переменной нагрузке, из-за сжимаемости воздуха; сложность позиционирования исполнительных органов пневмодвигателей; небольшое давление сжатого воздуха в рабочих полостях (0,4 - 0,6 МПа) и поэтому относительно невысокую нагрузочную способность.

Гидравлические зажимные механизмы это самостоятельные устройства, состоящие из нагнетательной аппаратуры, гидродвигателя или гидроцилиндра, системы управления, распределительных и предохранительных устройств. Гидроприводы обладают возможностью бесступенчатого регулирования в широких пределах скоростей и подач; простотой и легкостью управления; плавностью и бесшумностью работы. Высокое давление масла в гидросистеме (до 15 МПа) позволяет развивать большие усилия при небольших габаритах, а рабочая жидкость выполняет одновременно функции смазки, предохраняя движущиеся части привода от износа и коррозии. Гидравлические зажимные механизмы способны работать в динамических режимах, при частых включениях и реверсах. К недостаткам гидроприводов можно отнести высокую первоначальная из-за сложности нагнетательных аппаратов, управляющей и контрольно-регулирующей аппаратуры и повышенные требования к эксплуатации.

Вакуумными называются приводы, с помощью которых под обрабатываемой заготовкой или над ней создается разрежение, в результате чего заготовка надежно прижимается к опорной поверхностьи. В вакуумных приводах для создания разрежения используются пневмоцилиндры или вакуумные насосы. Конструкции вакуумных приводов просты, так как для закрепления обрабатываемых заготовок в них не требуется создание специальных механических устройств.

Выбор приспособлений осуществляется следующим образом. На первом этапе получают и анализируют исходные данные, изучают рабочих чертежи заготовки и готовой детали, и требования, предъявляемые к приспособлению,

изучают технологический процесс обработки детали. Второй этап заключается определении технологических баз и в уточнении схемы установки детали, определении типа и количества установочных элементов и их взаимное расположение. На третьем этапе устанавливают место и положение сил закрепления и рассчитывают их величину. Затем выбирают тип зажимного устройства и определяют его основные размеры. На последнем этапе выявляют необходимые вспомогательные устройства, вбирают их конструкции и размеры. При разработке конструкции приспособления максимально используют имеющиеся стандартные детали и узлы.

25. Планировка термических участков

Технологическая планировка является одним из завершающих этапов проектирования производства изделий, при разработке которой решают комплекс взаимосвязанных технических и организационных задач:

- установление состава производственных участков и отделений, вспомогательных служб, санитарно-бытовых и административных помещений;
- расчет площадей цеха;
- выбор типа, объемно-планировочных и конструктивных решений основного производственного и вспомогательного зданий;
- компоновка цеха, организация грузопотоков;
- выбор и расчет количества транспортирующих устройств;
- планировка производственных участков изготовления деталей, сборки узлов и изделий в целом;
- разработка общей технологической планировки цеха и ситуационного плана производственного корпуса.

Планировка представляет собой графическое изображение помещений и располагаемого в них оборудования, энергетических и подъемно-транспортных устройств, инженерных коммуникаций. Составление планировок необходимо как при разработке проектов на строительство или реконструкцию новых подразделений, так и при решении отдельных производственных задач, например

при установке нового оборудования. При перепланировках следует максимально использовать существующие инженерные коммуникации, подъемно-транспортные средства и санитарно-гигиенические устройства.

Исходные данные для составления планировок:

- ведомости на все виды оборудования и другие средства технологического оснащения с указанием габаритных размеров, мощности (в отдельных случаях и массы), мест подключения к энергетическим коммуникациям;
- чертежи производственного помещения, отводимого для проектируемого подразделения, с указанием ширины пролета, шага колонн, характера стен, расположения ворот, окон, подвалов и т.д;
- схему той части генерального плана предприятия, в которой находится проектируемое подразделение, с указанием мест размещения смежных цехов и служб, с которыми данное термическое подразделение поддерживает технологические связи;
- прочие сведения, которые могут оказать влияние на характер планировки, например вид межцехового транспорта и др.

Составлению планировки предшествует компоновка производственных площадей с изображением границ его отделений и участков, складов, мастерских, бытовых помещений, проездов и проходов. Компоновка должна быть увязана с планом завода в отношении характера транспортных средств, инженерных коммуникаций, складов и др. При компоновке выявляют потребные размеры производственных площадей, выбирают общецеховые подъемно-транспортные средства, тару, хозяйственный инвентарь.

По назначению площади цехов делятся

- производственную, занятую производственным оборудованием и рабочими местами у этого оборудования,
- вспомогательную, занятую вспомогательными подразделениями (ремонтными и инструментальными службами, лабораториями, объектами складского хозяйства), а также магистральными проездами между цехами.

- служебно-бытовую для административно-технического персонала, объектов санитарно-гигиенического назначения.

Ориентировочно площади можно определить по укрупненным нормативам. Производственная площадь цеха (участка) $S_{пр}$, м^2, рассчитывается как произведение удельной производственной площади $S_{уд.пр}$ на принятое количество оборудования $C_{пр}$ в цехе или на участке: $S_{пр} = S_{уд.пр} * C_{пр}$. Удельная производственная площадь $S_{уд.пр}$ (площадь, приходящаяся на единицу оборудования) с учётом проходов составляет: для мелкого оборудования (до 1800мм) 10 - 12 м^2; для среднего (до 4000 мм) -15 - 25 м^2; для крупного - 30 - 90 м^2. Проезды и проходы считаются отдельно и составляют в среднем 25 - 30 % от производственной площади. Служебно-бытовые площади рассчитываются из расчёта 4- 6 м^2 на каждого работающего. В рабочем проекте технологическую планировку оборудования участка, цеха, малого предприятия (МП) выполняют

- в масштабе **М 1 : 100** для цехов и МП, насчитывающих свыше 200 единиц оборудования,
- в масштабе **М 1 : 200** для цехов и МП, насчитывающих менее 70 единиц оборудования,
- в масштабе **М 1 : 50** для производственных участков.

Основой для разработки технологической планировки является ранее разработанная компоновка участка, цеха или МП. Расположение оборудования и рабочих мест координируется относительно колонн. При расстановке станков руководствуются нормами технологического проектирования.

Таблица 62. Нормы расстояний между оборудованием

Расположение станков			Обозначение на схеме	Расстояние, мм						
				Единичное, мелкосерийное и среднесерийное производство				Крупносерийное и массовое производство		
				Наибольший из габаритных размеров станка в плане, мм						
				До 1800	От 1800 до 4000	От 4000 до 8000	Св. 8000	До 1800	От 1800 до 4000	Св. 4000
От проезда до	фронта		а	1600		2000 / 2400*		1000 / 1200*		
	тыльной стороны		б	500		500		500		
	боковых сторон		в	500		700	1000	500		
	в «затылок»		г	1700		2600		1400	1600	1800
Относительно друг друга	тыльными сторонами		д	700	800	1000	1300	700	800	1000
	боковыми сторонами		е	900		1300	1800	900		1200
	фронтом при обслуживании одним рабочим	одного станка	ж	2100	2500	2600		1900	2300	2600
		двух станков	з	1700		–		1400	1600	–
	при П-образном расположении трёх станков, обслуживаемых одним рабочим		и	2500		–		1400	1600	–
			к	700		–		700		–
От стен и колонн до	фронта		л	1600		1600 / 2000*		1300	1500	
			л1	1300		1500		1300	1500	
	тыльной стороны		м	700	800	900	1000	700	800	900
	боковых сторон		н	1200				900		

Примечание. В числителе указаны нормы расстояний для поточной формы организации производства, в знаменателе – для непоточной.

Таблица 63. Нормы ширины проездов

Вид проезда	Наименование транспортных средств	Ширина проезда, мм	
		при одностороннем движении	при двустороннем движении
Магистральный	Напольные: электротележки, электротягачи, электропогрузчики автопогрузчики, автомашины, уборочные машины и пр.		4500 5500
Цеховой	Все виды напольного электротранспорта, кроме робокар Робокары	$A^x + 1400$ $A^x + 400$	$2A + 1600$ –
Пешеходный проход		–	1400

Выбор параметров производственных зданий и помещений

Производственные здания могут быть одноэтажными и многоэтажными. Наиболее распространены - одноэтажные многопролетные здания прямоугольной формы с полом на бетонном основании и перекрытием, поддерживаемым системой колонн. Основные размеры здания в плане измеряются между разбивочными осями, продольные обозначают заглавными буквами русского алфавита, поперечные – цифрами. Продольный размер пролета должен быть кратным шести метрам (таблица 64). Поперечный шаг пролета равен 6 или 12 м. Высота от пола до низа несущих конструкций должна быть кратна 0,6 м, но не менее 3.6 метра. Несущие конструкции здания могут быть металлическими, железобетонными или смешанными. Металлическая конструкция состоит из металлических колонн и ферм. Железобетонная конструкция состоит из железобетонных колонн, связывающих рам, балок, подкрановых элементов здания. Железобетонные конструкции могут быть монолитными и сборными. Стены производственных зданий обычно делают панельными. Кирпичная кладка

применяется для зданий небольшого объема. Смешанные конструкции состоят из железобетонных колонн, подкрановых балок, металлических ферм. По конструктивному признаку стены здания разделяются на несущие и каркасные Несущие наружные стены делают из кирпича или бетона. В каркасных зданиях несущие функции выполняет каркас, состоящий из колонн и балок, а ограждающие функции – стеновое заполнение. Внутренние перегородки бывают различных видов в зависимости от назначения помещения. Для перегородок бытовок используют легкие строительные материалы: фанеру, древестростружечные плиты, гипсокартон. Для помещений с высоким уровнем освещенности – заточных и лекальных участков, офисных служб используют перегородки с верхней стеклянной частью. Внутренние складские помещения огораживают металлической сеткой. Массивные кирпичные или железобетонные перегородки используют для ограждения механических или термических участков. Полы производственных помещений делают из керамической плитки, асфальта, или бетона. Предельная ширина проходов производственных помещений должна быть не менее 1 м., коридоров – 1,4 м, дверей – 0,8 (для одинарных) или 2,4 м (для распашных). Высота дверей должна быть не менее 2,0 м. Ширина ворот должна быть не менее 1,8 м и должна превышать наибольшую ширину транспортных средств не менее чем на 600 мм. Расстояние от наиболее удаленного рабочего места до выхода наружу для одноэтажных зданий должны быть не более 100 м, для многоэтажных не более 75 м. Количество эвакуационных выходов должно быть не менее двух.

Таблица 64. Унифицированные параметры одноэтажных производственных зданий

<table>
<tr><th rowspan="2">Высота от пола до оголовка колонны, м</th><th rowspan="2">Пролет, м</th><th colspan="2">Шаг колонн, м</th></tr>
<tr><th>крайних</th><th>средних</th></tr>
<tr><td>3,6*
4,2*</td><td>12</td><td rowspan="8">6, 12</td><td rowspan="3">6, 12</td></tr>
<tr><td>4,8</td><td>12, 18</td></tr>
<tr><td>5,4
6,0</td><td>12, 18, 24</td></tr>
<tr><td>7,2</td><td rowspan="2">18, 24</td><td rowspan="5">12</td></tr>
<tr><td>8,4
9,6</td></tr>
<tr><td>10,8
12,6</td><td>18, 24, 30</td></tr>
<tr><td>14,4
16,2
18,0</td><td>24, 30, 36</td></tr>
<tr><td colspan="4">* Высоту 3,6 и 4,2 принимают только при наружном водоотводе (у наружной стены).</td></tr>
</table>

Современные тенденции строительства и реконструкции производственных зданий и помещений

- Сокращение числа трудящихся на производстве и повышение уровня их квалификации приводит уменьшению доли производственных площадей занятых вспомогательными и бытовыми помещениями при одновременном повышении требований качеству организации рабочих мест.
- Внедрение в производство робототехники, станков с числовым программным управлением требует обеспечения стабильного теплового режима помещений, их низкой запыленности и хорошей освещенности.
- Высокая гибкость производства предполагает возможность оперативной перестановки оборудования, поэтому подводимые коммуникации должны быть легкодоступны. Общая тенденция, наблюдаемая при организации современных производств - прокладка коммуникаций под потолком здания в легкодоступных, быстромонтируемых кабель-каналах.

- Целесообразно объединение различных технологических линий и складских помещений в один корпус, имеющих значительную площадь.
- Создание гибких универсальных промышленных систем требует применения производственных зданий с полом, рассчитанным на максимально возможные нагрузки, так как оборудование монтируется не на фундамент, а ставится непосредственно на пол.
- Использование типовых промышленных объектов, собираемых из стандартных модулей, позволяет по-разному компоновать основные строительные конструкции, обеспечивая легкость перемещения или замены технологического оборудования и организации новых транспортных потоков.
- Применение индивидуальных систем отопления существенно уменьшает затраты на теплоснабжение. Наиболее перспективны для использования индивидуальные газовые котельные.

Внедрение прогрессивных типов свайных оснований снижает объемы земляных работ, трудоемкость и сроки строительства фундаментов зданий

Составление планировок термических и механических участков

Решение вопросов общей компоновки цеха строго не регламентировано правилами и зависит навыков проектанта. Основным требованием, предъявляемым к компоновке плана проектируемого цеха, является рациональная технологическая связь между отдельными звеньями и участками производственного потока, а так же вспомогательными помещениями для максимально рационального использования строительной площади цеха. Компоновочным планом или компоновкой цеха (корпуса), называется план, выполненный в заданном масштабе (обычно 1:200 или 1:400) с нанесением на нем в том же масштабе границами производственных и вспомогательных участков, служебно-бытовых помещений, магистральных проездов и выездных проемов, но без детального расположения оборудования. Возможны различные типы компоновок производственных участков. *Произвольная компоновка (рис 163)*

применяется при недостатке производственных площадей Основной недостаток данной компоновки - сложность и нерациональность транспортных маршрутов. *При Функциональной компоновке* (рис 164) заготовки и детали последовательно проходят с начала до конца техпроцесса. Эта компоновка наиболее характерна для цеха мелкосерийного производства. *Модульная компоновка* (рис. 165) предусматривает выполнение аналогичных операций параллельно одинаковыми модулями. Она обладает определенными возможностями для резервирования производственных мощностей. *При групповой компоновке* каждая группа станков предназначена для обработки определенной номенклатуры деталей. *Ступенчатая компоновка* предусматривает наличие различных **у**частков с персоналом, переходящим с участка на участок в зависимости от степени загруженности в рабочее время

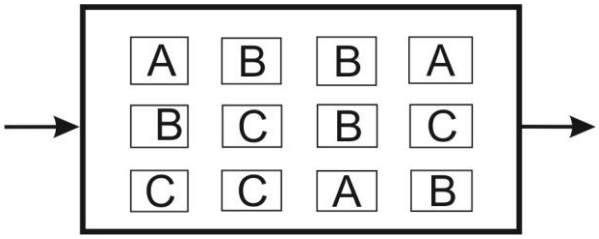


Рисунок 163 Произвольная компоновка

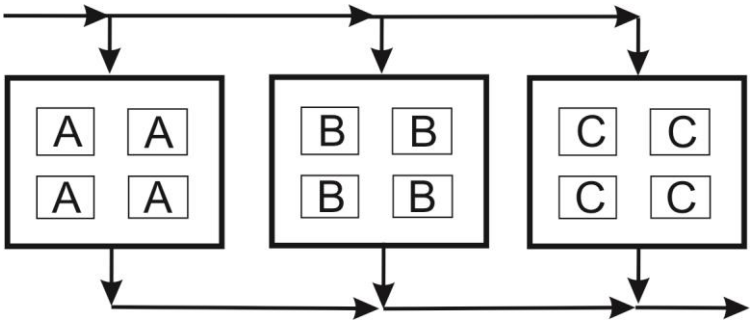


Рисунок 164 Функциональная компоновка

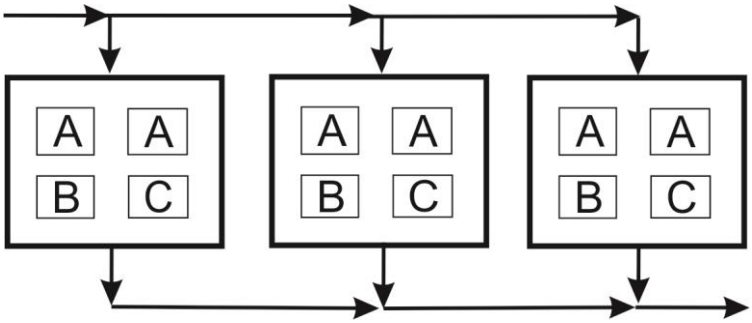


Рисунок 165 Модульная компоновка

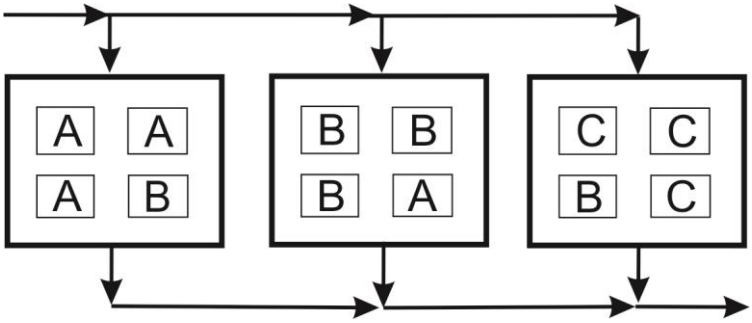


Рисунок 166. Групповая компоновка

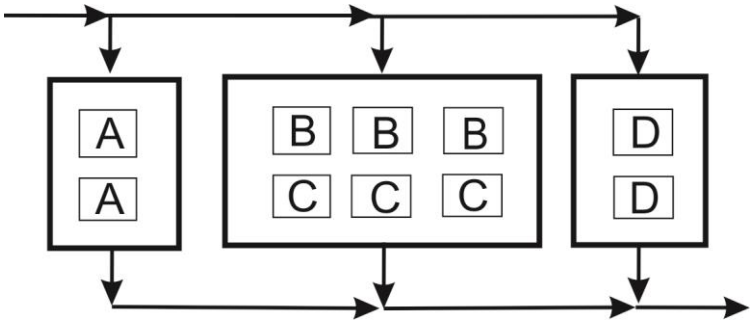


Рисунок 167. Ступенчатая компоновка

Рекомендации при составлении компоновочного плана

• При размещении оборудования на технологических планировках следует обеспечить свободный доступ к рабочим местам, удобство транспортирования заготовок к месту работы. Размер рабочей зоны должен составлять не менее 800 мм.

• Желательно производить размещение оборудования по участкам.

• С целью ликвидации влияния вредных факторов желательно изолировать рабочие места.

• Оборудование должно располагаться в соответствии с общим направлением основного грузопотока, чтобы не было встречных движений и транспортировки грузов над рабочими местами.

• Крупное оборудование желательно располагать вдоль цеха в несколько рядов.

• Крупные станки не должны стоять у окон, так как это приводит к затемнению цеха.

• При разных габаритах оборудования его располагают в одну линию по загрузочной стороне.

• Расстояние между оборудованием берут в соответствии с нормами с учетом наружных габаритных размеров станков, включающих крайние положения движущихся частей.

• При установке станков на индивидуальные фундаменты расстояние принимаются с учетом конфигурации фундаментов.

• При разных размерах двух рядом стоящих станков расстояние между ними принимается по большему из этих станков.

• Необходимо предусматривать наличие проездов в середине цеха или по краям. Ширина проездов или проходов выбирают по соответствующим нормам исходя из предполагаемых транспортных устройств и механизмов.

• Транспортируемые изделия не должны выходить за пределы транспортных средств (на площадь прохода).

• При обработке деталей с большим количеством операций грузопотоку придают зигзагообразную форму для того чтобы длина каждого участка не превышала 40 – 60 м

• Следует предусматривать механизацию перемещения заготовок, деталей.

• Необходимо предусматривать наличие и близость расположения комнат курения, туалетов, раздевалок и других помещений бытового назначения.

Планировка производственного участка это детальный план размещения рабочих мест и оборудования, который выполняют в условных обозначениях, принятых в нормах технологического проектирования (таблица 65, рис 168).

Соблюдение стандартных условных графических обозначений обязательно. Оборудование и рабочие места обозначают в виде плоских масштабных моделей (темплетов). На технологических планировках с помощью условных обозначений указывают:

- - технологическое оборудование;
- - рабочий персонал;
- - стационарные подъемно-транспортные средства;
- - санитарно-техническое оборудование;
- - места складирования изделий;
- - проходы и проезды с учетом применяемых напольных транспортных средств;
- - средства пожаротушения (гидранты, пожарные щиты и т.п.);
- - на каких рабочих местах предлагается применение местной вентиляции;
- - места подвода различного вида энергоносителей (электрического тока, пара, газа, сжатого воздуха и др.).

Рациональная планировка производственных участков и цехов обеспечивает условия для высокопроизводительной и безопасной работы производственного и обслуживающего персонала, эффективное и экономичное использование производственных площадей, повышение уровня технического оснащения, организации и культуры производства.

Таблица 65. Обозначение объектов на компоновочном плане

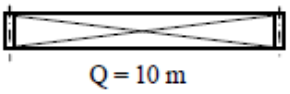
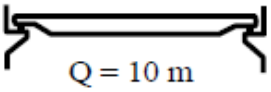
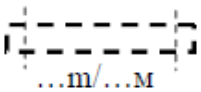
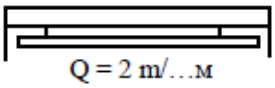
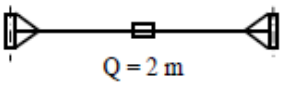
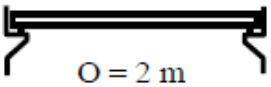
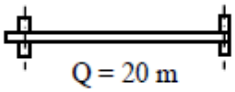
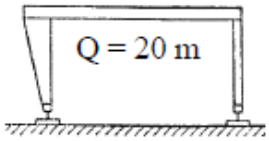
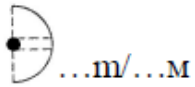
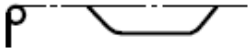
Объект	Условное обозначение
КОМПОНОВОЧНЫЙ ПЛАН	
Капитальная стена, сплошная перегородка до низа фермы или до потолка	
Легкие перегородки всех типов	
Граница цеха, отделения, участка	
Колонна задания	+
Санитарный узел	СУ
Трансформаторная подстанция	
ПЛАН РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ	
Строительные элементы	
Капитальная стена	
Колонна железобетонная с фундаментом *	
Колонна металлическая	I
Дверь однопольная	
Дверь двупольная	
Ворота распашные	
Ворота подъёмные	

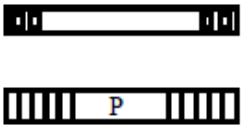
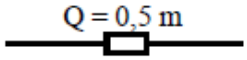
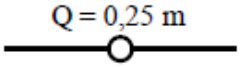
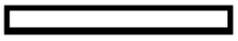
* Фундамент (штриховая линия) показывают только для колонн, вблизи которых располагают оборудование с индивидуальным фундаментом

Объект	Условное обозначение
Ворота откатные	
Ворота складчатые	
Оконный проём	
Остекленная перегородка	
Перегородка с сеткой	
Металлическая перегородка на каркасе	
Звукоизолирующая перегородка	
Технологическое оборудование	
Автоматические линии	
Технологическое оборудование (станок и др.) и № по плану	МР71
Технологическое оборудование, существующее в цехе, неперестанавливаемое	163
Место рабочего	
Место рабочего при многостаночном обслуживании	
Разметочная плита	РП

Объект	Условное обозначение
Контрольная плита	КП
Верстак	В
Контрольный стол	КС
Резервное место под оборудование	РМ
Складочное место заготовок и деталей	
Контрольный пункт деталей	КП
Подводы промышленных жидкостей, газов и электротока; вентиляционные отсосы	
Подвод холодной воды	
Подвод холодной воды с отводом в канализацию	
Подвод холодной воды с раковиной на стене (перегородке)	+
То же холодной и горячей воды	++
Слив отработанной охлаждающей жидкости в канализацию	

Объект	Условное обозначение
Подвод сжатого воздуха ρ = 6 ат	6
То же, ρ = 3 ат	З
Подвод эмульсии	Э
Подвод содового раствора	С
Подвод масла (сульфофрезола)	М
Подвод газа	Г
Местный вентиляционный отсос	
Подвод спецтоков	С
Местное освещение	
Щит управления	Щ
Пожарный кран	
Подвод пара	

Объект	Условное обозначение
Подъемно-транспортное оборудование (компоновочные планы и планы расположения оборудования)	
Электрический мостовой кран на плане здания	
То же на разрезе здания	
Кран однобалочный подвесной, кран-балка на плане здания	
То же на разрезе здания	
Кран мостовой однобалочный (опорный), кран балка опорная на плане здания	
То же на разрезе здания	
Электрический козловый кран в плане	
То же, вид спереди	
Кран поворотный в плане	
Подвесной цепной конвейер с примыкающим монорельсом	
Подъем и спуск подвесного цепного конвейера	
Ленточный транспортер	

Объект	Условное обозначение
Рольганг	
Монорельс с тельфером	
Монорельс с пневматическим подъемником	
Электроинструмент на монорельсе	
Желоб, склиз	

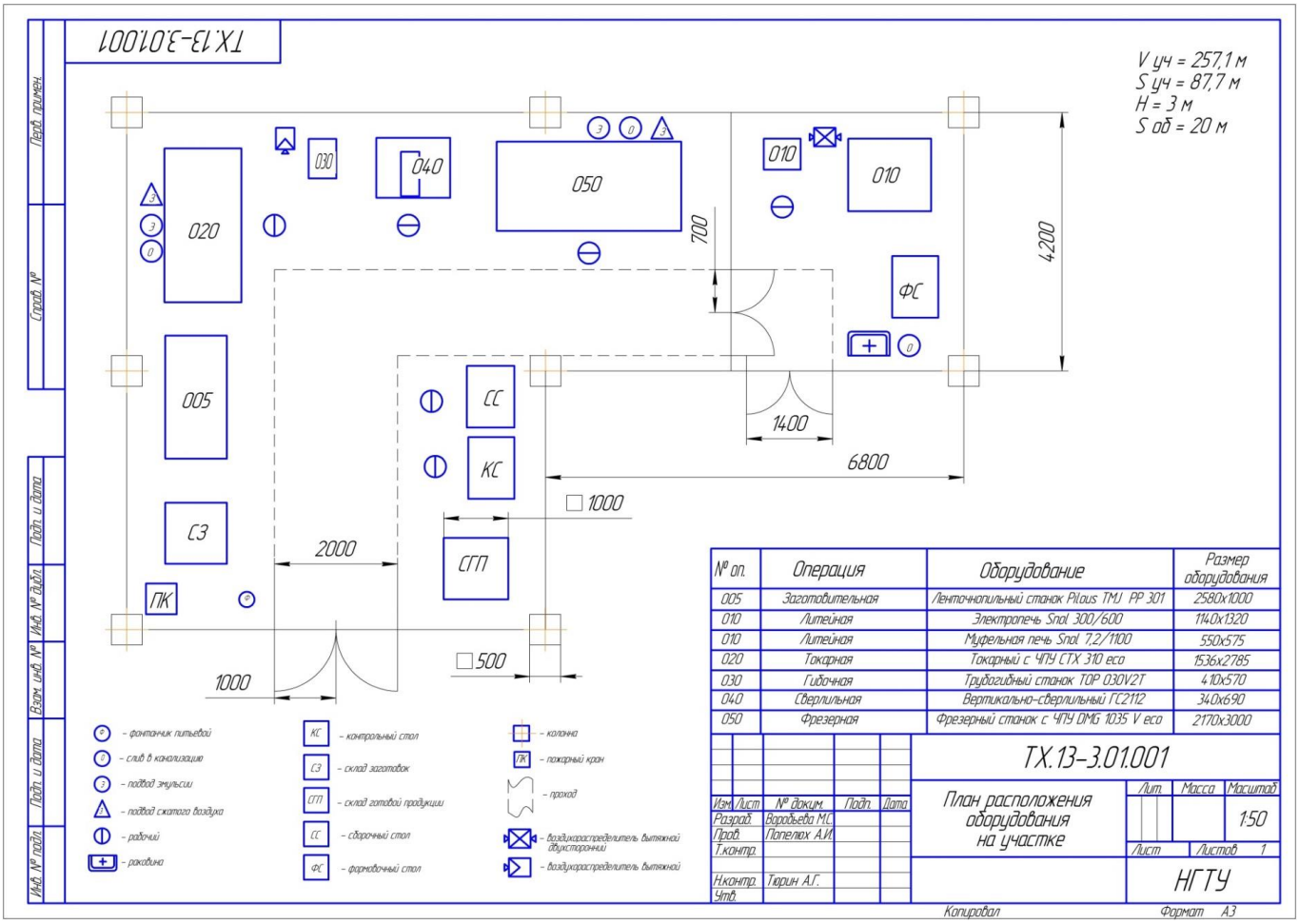


Рисунок 168. Пример планировки литейного участка.

Литература

1. George E. Totten. Heat Treatment Steel: Equipment and Process design. CRC Press.- 2006.- 714 P
2. Смирнов . В.А. Перспективы развития термической обработки. МиТОМ.- 1985.- 6. С 6-13.
3. Техническая подготовка производства. http://laboureconomics.ru/firmeconomics/50-prepare (электронный ресурс)
4. ГОСТ 14.001-73. Единая система технологической подготовки производства. Общие положения.
5. ГОСТ 3.1001-2011 Единая система технологической документации (ЕСТД). Общие положения.
6. Солодихин А. Технология, организация и проектирование термических цехов. Учебное пособие для вузов. М. Высшая школа.- 1987.-368с.
7. ГОСТ 14.205-83 Технологичность конструкции изделий. Термины и определения.
8. Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники: Учебное пособие. М.: Машиностроение.- 2002.- 260 с.

9. Тымчак В.М., ГусовскийВ.Л. Расчет нагревательных и термических печей. М: Металлургия.- 1983.- 480 с.
10. Электротермическое оборудование. Справочник / Под ред. А.П. Альтгаузена. М.: Энергия.- 1980.- 448 с.
11. Рустем С.Л. Оборудование термических цехов М.Машиностроение.- 1971.- 288. с.
12. Д. Я. Вишняков, Г. Н. Ростовцев, А. А. Неуструев. Оборудование, механизация и автоматизация в термических цехах. М: Металлургия.- 1964. - 467 с.
13. Гусовский В.Л., Лившиц А.Е.Методики расчета нагревательных и термических печей. М.: Теплотехник.- 2004.- 400 с.
14. В. Люты. Закалочные среды М. Металлургия.- 1990.- 192 с.
15. Гусовский В.Л., Ладыгичев М.Г., Усачев А.Б.Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики): Справочник. М.: Теплотехник.- 2007.- 656 с.
16. Арендарчук А.В., Бородачев А.С., Филиппов В.И. Общепромышленные электропечи периодического действия М.: Энергоатомиздат.- 1990. - 112 с.
17. Соколов К.Н. Оборудование термических цехов. Киев: Выща школа.- 1984.- 328 с.
18. Арендарчук А.В., Бородачев А.С., Филлипов В.И. Общепромышленные электропечи непрерывного действия. М. : Энергия.- 1977 . – 248 с.
19. А.В.Чечеткин, Н.А.Знаменосец. Теплотехника. М: Высшая школа.- 1986.- 344 с.
20. Мастрюков В.С. Теория, конструкция и расчеты металлургических печей . М. Металлургия.- 1978.- 272 с.
21. Кащеев И.Д. Свойства и применение огнеупоров. М.: Теплотехник 2004г. 352 с.
22. Большакова, К. С. Борисанова, В. И. Бурцев и др.; Под ред. М. Б. Гутмана. Материалы для электротермических установок: Справочное пособие. Из-во: Энергоатомиздат.- 1987.- 296 с.
23. К.К. Стрелов, П.С. Мамыкин. Технология огнеупоров М.: Металлургия.- 1978.- 370 с.
24. Жуков Л.Л., Племянникова И.М., Миронова М.Н., Баркая Д.С., Шумков Ю.В Сплавы для нагревателей М.:Металлургия.- 1985.- 144 с.
25. Ю. А. Белавин, М. А. Евстигнеев, А. Н. Чернявский. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением. М. :Энергоатомиздат.- 1989.- 157 с.
26. В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц, В. М. Тымчак. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей : Справочник. М. : Металлургия.- 1981. - 272 с.
27. Попов А.Г. Тепловое заграждение нагревательных и термических печей: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ.- 2006.- 31 с.
28. Индукционная закалка сталей: учебное пособие / Ю.Д. Корягин, В.И.Филатов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ.- 2006. – 52 с.

29. Гордиенко А.И., Михлюк А.И., Вегера .И. И. Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы и перспективы развития. // Литье и металлургия .-2010.- №54.- С 140-148.
30. Головин Г.В. Замятин М.М. Высокочастотная термическая обработка Л.: Машиностроение. -1990.- 239с
31. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов М.Машиностроение.- 1981.-168 с.
32. А. С.Коротеев, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение.- 1993. - 296 с.
33. П.И. Дячек. Холодильные машины и установки. Изд-во: Феникс.-2007.- 432с.
34. Крамарухин Ю.Е. Приборы для измерения температуры М.Машиностроение.- 1990.- 208 с.
35. О.А.Геращенко, В.Г. Федотов. Тепловые и температурные измерения Киев: Наукова думка.- 1965.- 296 с.
36. В.С Мухин, И.А. Санов. Приборы контроля и средства автоматики тепловых процессов. М.: Высшая школа.- 1988.- 252 с.
37. Киселев Е.В., Кутьин В.Б., Матюхин В.И.Электрические печи сопротивления: учебное пособие. Екатеринбург : УГТУ – УПИ.- 2010.-78 с.
38. Б.А.Сокунов, Л.С.Гробова. Электротермические установки: Учебное пособие Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ.- 2004. -122 с.
39. Егоров А.В Расчет мощности и параметров электропечей в черной металлургии М. Металлургия.- 1990.- 280 с.
40. Общемашиностроительные нормативы вспомогательного времени на термическую обработку металла в печах, ваннах и установках ТВЧ. Издательство: Экономика.- 1988.- 88с.
41. Справочник нормировщика/ А. В. Ахумов, Б. М. Генкин, Н. Ю. Иванов и др.; Под общ. ред. А. В. Ахумова. — Л.: Машиностроение.-1986. - 458 с.
42. Базовая система микроэлементных нормативов времени (БСМ-1). Методические и нормативные материалы Изд-во: Экономика. – 1989.-123 с.
43. Черпаков Б.И Технологическая оснастка Изд-во Академия. 2003- 288с
44. Корсаков В.С. Основы конструирования приспособлений. М.: Машиностроение.-1983.- 276 с
45. Мамаев В.С. Осипов Е.Г. Основы проектирования машиностроительных заводов М.: Машиностроение.- 1974.- 290 с.
46. Киселев Е.С. Проектирование механосборочных и вспомогательных цехов машиностроительных предприятий: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ.- 1999. -118 с.
47. Киселев Е.С., Богданов В.В. Выполнение технологических планировок механосборочных и вспомогательных цехов на ПЭВМ: Учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ.- 2001.–96 с.