

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

В.В. Савицкий

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Конспект лекций
для студентов специальности
7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Витебск
2026

УДК 621.365 (075.8)
ББК 31.292-5
С13

Рецензенты:

к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Теплоэнергетика» Жерносек С. В.;

директор Республиканского инновационного унитарного предприятия
«Научно-технологический парк Витебского государственного
технологического университета» Луцейкович В. И.

Одобрено кафедрой «Технологии машиностроения»
УО «ВГТУ», протокол № 6 от 17.02.2026.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 6 от 27.02.2026.

Савицкий, В. В.

С13 Электротехнологические установки : конспект лекций / сост.
В. В. Савицкий. – Витебск : УО «ВГТУ», 2026. – 260 с.
ISBN 978-985-481-809-2

В конспекте лекций рассмотрены темы, охватывающие основные понятия и определения дисциплины, электротехнологические процессы, основанные на преобразовании в рабочей зоне технологических установок энергии электрического тока, магнитного и электрического полей в тепловую, за счёт которых реализуются процессы резистивного нагрева, индукционный нагрев различных материалов, осуществляются электродуговые процессы плавки, плазменные и лазерные технологии, электрофизические и электрохимические методы обработки, электромеханические, электрокинетические, электростатические процессы, рассмотрено оборудование для осуществления перечисленных процессов.

Рассчитан на студентов специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника», может быть полезен инженерно-техническим работникам предприятий различного профиля.

УДК 621.365 (075.8)
ББК 31.292-5

ISBN 978-985-481-809-2

© УО «ВГТУ», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ	8
1.1 Электротермические установки и области их применения...	8
1.2 Теплопередача в электротермических установках.....	9
1.3 Материалы, применяемые в электротермических установках.	11
Глава 2. УСТАНОВКИ НАГРЕВА СОПРОТИВЛЕНИЕМ.....	14
2.1 Физическая сущность электрического сопротивления.....	14
2.2 Нагревательные элементы.....	15
2.3 Электрические печи сопротивления.....	19
2.4 Электрический расчет печи сопротивления.....	38
2.5 Способы измерения температуры в печах сопротивления.....	48
2.6 Автоматическое регулирование температурного режима.....	51
Глава 3. УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА.....	59
3.1. Физические основы индукционного нагрева.....	59
3.2 Классификация индукционных установок.....	63
3.3 Конструкции индукционных печей.....	65
3.4 Индукционные нагреватели (индукторы).....	69
3.5 Индукционные установки сквозного нагрева, расчёт и эксплуатация.....	83
3.6 Пример расчёта основных параметров индукционной установки сквозного нагрева.....	92
3.7 Режимы и оптимальная частота высокочастотного индукционного поверхностного нагрева.....	106
3.8 Диэлектрический нагрев.....	116
Глава 4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И СВОЙСТВА ДУГОВОГО РАЗРЯДА. ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ПЕЧИ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ.....	120
4.1 Общие сведения.....	120
4.2 Классификация и устройство дуговых электрических печей...	124
4.3 Технологии плавки стали в дуговых сталеплавильных печах прямого действия.....	128
4.4 Дуговые электрические печи косвенного действия.....	135
4.5 Электрооборудование дуговых сталеплавильных печей (ДСП).....	136
4.6 Электрические характеристики дуговых печей косвенного и прямого действия.....	140
4.7 Режимы работы дуговых сталеплавильных печей.....	143
4.8 Электромагнитное перемешивание стали в дуговых печах.....	146
4.9 Автоматизация управления режимом работы дуговой электрической печи.....	148

4.10 Дуговые печи постоянного тока.....	152
4.11 Применение дуговых электрических печей.....	154
Глава 5. ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ.....	158
5.1 Сущность процессов.....	158
5.2 Газы для резки.....	160
5.3 Оборудование для резки.....	163
5.4 Классификация электродуговых плазмотронов.....	165
5.5 Конструкции узлов плазмотронов.....	168
5.6 Конструкция плазмотрона для ручной резки	172
5.7 Применение плазменной обработки.....	175
5.8 Установки электронно-лучевого нагрева	176
5.9 Принципы работы лазеров и использование лазерных установок.....	182
Глава 6. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ.....	188
6.1 Характеристика процессов электроэрозионной обработки материалов.....	188
6.2 Сущность процессов электрохимической обработки.....	195
6.3 Источники питания установок для электрохимической обработки.....	200
6.4 Прикладные электрохимические технологии.....	203
Глава 7. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ.....	211
7.1 Электромеханическая обработка.....	211
7.2 Сущность магнито-импульсной обработки.....	213
7.3 Оборудование для магнито-импульсной обработки.....	216
7.4 Получение и использование ультразвука.....	221
7.5 Электрогидравлическая обработка.....	234
7.6 Устройство и работа электростатических установок.....	241
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	255

ВВЕДЕНИЕ

Электротехнология – наука, изучающая теорию и практику преобразования электрической энергии в тепловую, химическую, механическую и другие виды энергии, совмещенного с технологическим процессом в едином устройстве.

Разработки электротехнологических установок различного назначения как чисто исследовательских, так и имеющих промышленное применение начались в XIX веке. Это работы таких учёных как М. Депре (Франция, 1849 г.) – печь сопротивления и дуговая печь, Пишон (Франция, 1853 г.) – дуговая печь косвенного действия для металлургии, В. Сименс (Англия, 1879 г.) – дуговые печи прямого и косвенного действия, О. Хэвисайд (Англия, 1884 г.), Н. Г. Славянов (Россия, 1888 г.) – дуговая электросварка, С. Томпсон (Англия, 1891 г.), Ивинг (Англия, 1892 г.), С. Ферранти (Италия, 1887 г.) – теория и практика индукционного нагрева и плавки.

Дальнейшему развитию электротехнологии дали многочисленные работы по получению алюминия, в ходе которых разрабатывались различные типы электротехнологических установок (ЭТУ): гарниссажная печь Ч. С. Бадли (США, 1883 г.), резистивные рудовосстановительные печи прямого нагрева братьев А. и Е. Коулесс (США, 1884 г.), электролизные ванны П.Л.Т. Эру (Франция, 1886 г.) и Ч. М. Холл (США, 1886 г.). Однако эффективное развитие и применение электротехнологических установок стало возможным лишь с переходом от химических источников питания к источникам питания, основанным на законе электромагнитной индукции, т. е. с созданием мощных генераторов и увеличением производства электроэнергии (конец XIX – начало XX в.). С этого времени начали развиваться различные виды электротехнологических установок для осуществления разнообразных технологических процессов, в частности для получения и обработки качественных сталей, цветных и тугоплавких металлов, полупроводников, пластмасс и других материалов.

На создание электротехнологических установок сильное влияние оказали развитие автомобилестроения, а в дальнейшем, авиа- и ракетостроения, атомной промышленности и т. д.

Принципы работы электротермических установок основаны на возможных видах существования вещества. Как известно, вещества могут находиться в четырех агрегатных состояниях – твёрдом, жидком, газообразном и плазменном.

Твёрдое состояние характерно для проводников, полупроводников и диэлектриков, металлов и неметаллов, кристаллических и аморфных веществ.

В жидком состоянии находятся расплавы металлов, солей, щелочей, оксидов, диэлектрические минеральные и органические материалы, жидкие кристаллы.

Газообразное состояние приобретают сложные активные вещества.

Плазменное состояние образуют электропроводные среды, позволяющие проводить обменные реакции и транспортные процессы на ионном уровне, быть источником лучистой энергии и средством нагрева веществ.

В процессе преобразования электрическая энергия оказывает на вещества различное воздействие: тепловое, химическое, механическое, оптическое и их сочетание. Благодаря этому с веществом, находящимся в каждом из агрегатных состояний, можно совершать различные операции – изменять температуру, форму, структуру, состав, свойства в различных направлениях и т. д.

Такие операции группируют по результирующему действию электрического тока и магнитного поля, проявляющемуся в различных условиях. Эти условия реализуются в установках, разделённых на следующие группы.

1 Установки, основанные на тепловом действии тока. К ним относят бытовые нагревательные приборы, печи сопротивления прямого и косвенного действия, установки для нагрева жидкостей и газов – электрические котлы разных типов и калориферы. Установки электрошлакового переплава металлов и электрошлаковой сварки используют явление выделения тепловой энергии преимущественно в шлаке, заполняющем пространство между электродами. В установках контактной сварки электрическая энергия преобразуется в тепловую в переходном сопротивлении в точке контакта двух деталей.

В установках индукционного нагрева используется преобразование энергии переменного тока промышленной или повышенной частоты в энергию переменного магнитного поля, которая преобразуется вновь в электрическую, а затем в тепловую в нагреваемом теле. Этот способ применим для нагрева проводящих тел.

Для нагрева диэлектриков применяются установки, использующие высокочастотное электрическое поле, где преобразование электрической энергии в тепловую идет через процессы поляризации веществ.

Установки, принцип действия которых основан на нагреве электрической дугой, включают в себя электродуговые и рудно-термические печи для выплавки металлов, огнеупоров, получения фосфора и других материалов, а также вакуумно-дуговые печи для переплава и рафинирования металла. К этой группе относятся установки плазменной и плазмодуговой обработки металлов и

неметаллических материалов, которыми производят переплав металлов, нанесение защитных покрытий, наплавку и другие операции.

В установках электроэрозионной обработки тепловая энергия выделяется в канале разряда в жидкости при импульсном протекании тока большой силы в течение короткого промежутка времени.

2 Установки, основанные на электрохимическом действии тока. К ним относят электролизные ванны, заполняемые растворами или расплавами, установки для нанесения защитных и декоративных покрытий, а также установки для изготовления изделий методом гальванопластики, электрохимикомеханической обработки изделий в электролитах.

3 Электромеханические установки, в которых прохождение импульсного тока вызывает возникновение механических усилий в обрабатываемом материале, которые могут использоваться при реализации технологических процессов. К ним относят магнитоимпульсные, электромагнитные, электрогидравлические, ультразвуковые процессы и установки, осуществляющие технологический процесс путем создания в веществе механических колебаний высокой частоты, получаемых от ультразвуковых генераторов.

4 Электрокинетические установки, принцип действия которых основан на электронно-ионной технологии, включающей в себя электризацию частиц и формирование их движения в электрическом поле. К таким технологиям относят электрогазоочистку – выделение из газового (воздушного) потока твёрдых частиц или жидких компонентов, электросепарацию – разделение многокомпонентных систем на составные части, электроокраску – нанесение твёрдых или жидких покрытий на изделия и другие процессы.

Глава 1. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

1.1 Электротермические установки и области их применения

Начало развития электротехнологии принято отсчитывать от работ академика В. В. Петрова, который впервые исследовал электрическую дугу и указал на её возможные области применения – для нагрева, плавки и восстановления из окислов металлов, а также для электролиза воды.

Принято разделять электротехнологические процессы и соответствующие им установки на следующие классы:

- электротермические процессы и установки (электрическая энергия преобразуется в теплоту, используемую в технологических процессах);

- электросварочные процессы и оборудование (используется практически все тот же принцип нагрева, что и в электротермических установках);

- электрофизические процессы и установки (использование различных физических эффектов для механической обработки, разделения и улавливания частиц и т. п.);

- электрохимические процессы и установки (для получения различных веществ, размерной обработки, гальванотехники и электролиза).

Электротермические установки используют различные физические механизмы преобразования электрической энергии в тепловую. Соответственно выделяются следующие виды нагрева:

- резистивный (нагрев сопротивлением);
- электродуговой;
- индукционный (нагрев проводников в электромагнитном поле);
- диэлектрический (нагрев диэлектриков в электромагнитном поле);
- плазменный (нагрев потоком ионизированного газа – плазмы);
- электронно-лучевой;
- фотонный (нагрев с использованием лазера).

Нагрев сопротивлением происходит за счет выделения теплоты в проводящем материале при протекании по нему электрического тока. Этот вид нагрева основан на законе Джоуля-Ленца и применяется в установках прямого и косвенного действия.

Дуговой нагрев материала осуществляется за счет теплоты, поступающей в него из опорных пятен дуги.

Индукционный нагрев основан на преобразовании энергии электромагнитного поля в тепловую посредством наведения в

нагреваемом теле вихревых токов и тепловыделения в нем по закону Джоуля-Ленца.

Диэлектрический нагрев помещенных в высокочастотное электрическое поле непроводящих материалов и полупроводников происходит за счет сквозных токов проводимости и смещения при поляризации.

Электронно- и ионно-лучевой нагрев осуществляется, когда тепловая энергия выделяется при столкновении быстро движущихся электронов или ионов, ускоренных электрическим полем, с поверхностью нагреваемого объекта.

Плазменный нагрев основан на нагреве газа за счет пропускания его через дуговой разряд или высокочастотное электромагнитное или электрическое поле.

Лазерный нагрев происходит за счёт нагрева поверхности объектов при поглощении ими высококонцентрированных потоков световой энергии, полученных в лазерах – оптических квантовых генераторах.

1.2 Теплопередача в электротермических установках

Основные параметры электротермических установок (мощность, коэффициент полезного действия, удельный расход электроэнергии) определяют в результате расчета теплоты. Теплообмен определяется законами теплопередачи. Процесс теплообмена является сложным, поэтому в инженерных расчетах его подразделяют на более простые составляющие – теплопроводность, конвекцию и излучение (лучистый теплообмен).

Теплопроводность – это передача теплоты внутри твердого тела или неподвижной жидкости (газа) от областей с более высокой температурой к областям с более низкой температурой.

Она больше у плотных тел, например, металлов, и меньше у пористых, например, пенопласта.

Тепловой поток (Вт) через однослойную плоскую стенку при установившемся режиме определяется по формуле Фурье:

$$Q = (t_1 - t_2) / (lF\lambda), \quad (1.1)$$

где t_1 и t_2 – температуры поверхностей стенки, К; l – её толщина, м; F – площадь проводящей стенки, м²; λ – коэффициент теплопроводности, зависящий от природы вещества и температуры, Вт/(м·К).

Для большинства применяемых в печестроении материалов

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta t_{cp}), \quad (1.2)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при 273 К; β – температурный коэффициент; $t_{cp} = 0,5 (t_1 + t_2)$ – средняя температура стенки, К.

Конвекция – теплопередача в жидкостях и газах, при которой перемещаются отдельные частицы и отдельные элементы объема вещества, переносящие присущий им запас тепловой энергии. Перенос теплоты вместе с переносом массы вещества называют *конвективным теплообменом*.

Тепловой поток конвективного теплообмена определяют на основании закона Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha_k (t_c - t_r) F, \quad (1.3)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К); t_c – температура стенки; t_r – температура окружающей среды; F – поверхность конвективного теплообмена, м².

По закону Ньютона-Рихмана, тепловой поток Q прямо пропорционален поверхности омывания, режиму движения теплоносителя и разности температур стенки и газа или жидкости.

Коэффициент теплоотдачи α_k представляет собой количество теплоты, передаваемой в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью и омывающей жидкостью в 1 К.

Формула (1.3) может быть применена при естественной и вынужденной конвекциях. Так, для плоских вертикальных стенок в условиях естественной конвекции коэффициент теплоотдачи для диапазона температур $\Delta t = t_c - t_r = 288 - 358 \text{ K}$ определяется выражением

$$\alpha_k = 3,45(t_c - t_r)^{0,13}, \quad (1.4)$$

а для $\Delta t = 358 - 423 \text{ K}$

$$\alpha_k = 2,05(t_c - t_r)^{0,25}, \quad (1.5)$$

При вынужденной конвекции коэффициент теплоотдачи в первую очередь зависит от скорости движения омывающей среды.

Излучение – передача теплоты в невидимой (инфракрасной) и видимой частях спектра. При передаче теплоты излучением энергия передается в форме электромагнитных волн. Для передачи тепловой энергии наиболее существенными являются тепловое излучение с

длиной волны 0,4–400 мкм. При излучении нагретого тела в неограниченное пространство (при односторонней теплопередаче) лучистый тепловой поток (Вт/м^2)

$$Q = c_s \varepsilon (T/100)^4, \quad (1.6)$$

где c_s – постоянный коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε – степень черноты тела, численно равная его поглощающей способности (для абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$); T – абсолютная температура, К.

Рассмотренные виды теплопереноса во многих случаях осуществляются совместно. Например, в потоках жидкостей и газов наблюдается теплопроводно-конвективный перенос теплоты. В потоках высокотемпературных газов имеет место радиационно-конвективный перенос энергии и т. д.

1.3 Материалы, применяемые в электротермических установках

При изготовлении электротермических установок (ЭТУ) применяется ряд специфических материалов, предназначенных для работы при высоких температурах. В их числе применяют огнеупорные и теплоизоляционные материалы для изоляции нагреваемых тел от окружающей среды и жаропрочные материалы, идущие на изготовление нагревателей и элементов конструкций печей.

Роль огнеупоров в экономии электроэнергии очень высока. Потери теплоты через стенки агрегата составляют 15–25 % и могут быть значительно снижены применением огнеупорной и высокоогнеупорной теплоизоляции.

Огнеупорные материалы.

Огнеупорными называют материалы, используемые для сооружения различных печей и аппаратов, работающих в условиях высокотемпературного нагрева (выше 1200 К).

По специфическим условиям работы они должны удовлетворять следующим требованиям.

1 Огнеупорность – это способность без деформации и оплавления противостоять воздействию высоких температур. В зависимости от степени огнеупорности их подразделяют на три класса: огнеупорные (огнеупорностью 1580–1770 К); высокоогнеупорные (1770–2000 К включительно); высшей огнеупорности (выше 2000 К).

Материалы с огнеупорностью ниже 1580 К называют теплоизоляционными.

2 Механическая прочность. Максимальной рабочей температурой огнеупорного материала принята температура, при которой начинается деформация материала от сжимающей нагрузки 20 кПа.

3 Термическая устойчивость – это способность материала без разрушения выдерживать резкие колебания температур.

4 Химическая нейтральность – способность не разрушаться путем химической эрозии.

5 Малая электропроводность. Огнеупорный материал в электрических печах часто одновременно является и электроизоляционным материалом.

6 Малая теплопроводность – способствует снижению тепловых потерь через стенки электрической печи без чрезмерного увеличения их толщины. Наиболее полно изложенным требованиям удовлетворяют огнеупорные материалы, изготовляемые на основе кремнезема SiO_2 (2000 К), глинозема Al_2O_3 (2300 К), оксида магния MgO (2600 К).

Массовыми огнеупорами для электроплавильных печей являются динас (2000 К), магнезит (2570 К), хромомagneзит, доломит и шамот (2000 К). Для печей сопротивления основным огнеупорным материалом является шамот, представляющий собой глубоко обожженную огнеупорную глину.

Теплоизоляционные материалы.

Должны обладать малой теплопроводностью при достаточной огнеупорности. Поэтому теплоизоляционные материалы – рыхлые, легкие, сильно пористые изделия или крупнозернистые порошки.

Наибольшее распространение в качестве теплоизоляционных материалов получили диатомит, шлаковые и минеральные ваты, пеностекло, зонолит, а также комбинированные материалы на основе асбеста.

Диатомит – осадочная горная порода; по химическому составу – почти чистый кремнезем (SiO_2), используется для стен электропечей в виде насыпной изоляции.

Шлаковые и минеральные ваты получают из топочных и доменных шлаков.

Стекловата – волокнистый минеральный теплоизоляционный материал, разновидность минеральной ваты. Минеральная вата (в зависимости от вида исходного сырья) может иметь различную структуру волокнистости, заданную технологически: горизонтально-слоистую, вертикально-слоистую, гофрированную или пространственную, что расширяет возможности её применения в различных конструкциях. Максимальная температура её применения 700–800 К.

Пеностекло – теплоизоляционный материал, представляющий собой вспененную стекломассу. Максимальная рабочая температура 900–1000 К.

Зонолит – представляет собой сыпучий материал в виде вспученных зерен характерного серебристого или золотистого оттенка, получаемый из разновидности слюды – вермикулита, которая выдерживает температуру до 1400 К.

Асбест – волокнистый материал с максимальной рабочей температурой 900 К. Признан канцерогеном первой категории по классификации МАИР (Международное агентство по изучению рака). Существует два основных вида асбестов – хризотил-асбест и амфиболовый асбест. Последний из перечисленных видов асбеста запрещено использовать в странах Евросоюза, в которых ранее этот вид асбеста широко использовался. В настоящее время в мировой промышленности используется хризотил-асбест. Хризотил входит в состав более чем трёх тысяч изделий в самых различных областях техники.

Жаропрочные материалы.

Жаропрочность – свойство материала сохранять высокую механическую прочность при высоких температурах. Жароупорность – устойчивость к химическим реакциям при высоких температурах.

Основные жаропрочные материалы – сплавы железа со специальными легирующими добавками. Легирующими материалами служат хром, алюминий, никель. Добавки хрома и алюминия придают сплавам способность противостоять высокотемпературной коррозии. Никель улучшает обрабатываемость материала, повышает его механическую прочность при работе в условиях высокой температуры.

Жаропрочные материалы подразделяют на жаростойкие и жароупорные. Основной легирующей добавкой в первой группе сплавов служит хром. Эти сплавы хорошо противостоят окислению при высоких температурах. Увеличение процентного содержания хрома в стали повышает его жаростойкость.

Для высокотемпературных электропечей в качестве жароупорных материалов применяют молибден, ниобий, вольфрам (работающие в защитных газах – аргоне, азоте, водороде), высокоогнеупорную керамику, карбиды и бориды некоторых материалов.

Глава 2. УСТАНОВКИ НАГРЕВА СОПРОТИВЛЕНИЕМ

2.1 Физическая сущность электрического сопротивления

Электрический ток – это направленное движение положительных или отрицательных электрических зарядов под действием электрического поля. Он может обеспечиваться движением только электронов, как это имеет место в вакууме при эмиссии электронов накаливаемым катодом, металлах и материалах, проявляющих свойство сверхпроводимости. Вещества, обладающие электронной проводимостью, называют *проводниками первого рода*. Проводящие среды, в которых прохождение тока обеспечивается движением частиц вещества – ионов, называют *проводниками второго рода*. К ним относятся электролиты-растворы и расплавы. Плазма имеет смешанную проводимость.

В соответствии с электронной теорией у металлов, которые являются кристаллическими веществами, ядра атомов находятся в узлах кристаллических решеток, а пространство между ними заполнено электронами (электронный газ). Число свободных электронов в металле очень велико. Так, для меди это число составляет приблизительно 10^{29} /м³.

Проводники второго рода – электролиты-растворы или расплавы кислот солей, щелочей, оксидов и плазма, имеют два вида электропроводности – электронную и ионную. При постоянном токе у растворов и расплавов наблюдается преимущественно ионная проводимость в соответствии с законом Фарадея. Доля электронного тока в этом случае невелика. При переменном токе появляется существенная доля электронного тока, увеличивающаяся с повышением частоты тока.

Количество выделяющейся в проводнике теплоты при прохождении по нему электрического тока зависит от сопротивления проводника, электрического тока в цепи, времени его прохождения и определяется законом Ленца-Джоуля:

$$Q = I^2 R \eta, \quad (2.1)$$

где I – ток, А; R – сопротивление, Ом; η – время, с.

Если выразить R через удельное сопротивление проводника, учесть его геометрические размеры l – длину, м, и S – площадь сечения, м², то выделяющаяся в проводнике мощность

$$P = U^2 S / (\rho l), \quad (2.2)$$

где S – площадь сечения, m^2 ; l – длина проводника, м.

Применение электрической энергии для нагрева имеет ряд достоинств:

- существенное снижение загрязнения окружающей среды;
- получение строго заданных значений температур, в том числе и превосходящих уровни, достигаемые при сжигании любых видов топлива;
- создание сосредоточенных интенсивных тепловых потоков;
- достижение заданных полей температур в нагреваемом пространстве;
- контроль и точное регулирование длительности выделения энергии;
- гибкость в управлении потоками энергии;
- возможность нагрева материалов изделий в газовых средах и вакууме;
- выделение тепловой энергии непосредственно в нагреваемом веществе.

2.2 Нагревательные элементы

Выбор материала и конструкции нагревательного элемента определяется особенностями технологического процесса и конструкции установки.

Материалы, используемые при изготовлении нагревателей, должны обладать рядом специфических свойств: высоким удельным электрическим сопротивлением; достаточной жаростойкостью (окалиностойкостью); достаточной жаропрочностью (т. е. механической прочностью при высоких температурах); малым температурным коэффициентом удельного сопротивления; постоянством электрических свойств в процессе длительного срока его службы (отсутствием старения), обрабатываемостью (для изготовления нагревательных элементов заданной конструкции).

По температурным пределам работы нагревательные элементы подразделяют на три группы:

- *низкотемпературные* – нагрев до 500–700 К и преимущественно конвективный способ теплообмена;
- *среднетемпературные* – нагрев до 900–1300 К с теплообменом конвекцией, теплопроводностью и излучением;
- *высокотемпературные* – нагрев до 2500–3300 К с преимущественно радиационным способом теплопередачи.

Для изготовления нагревателей с рабочей температурой до 1500 К наиболее распространенными материалами являются нихромы (сплавы

никеля и хрома), фехрали (хромоалюминиевые сплавы), а также хромоникелевые жаропрочные стали.

Нихромы, например, Х20Н80-Н, образуют на поверхности защитную пленку из окиси хрома. Температура плавления этой пленки выше, чем самого сплава; пленка не растрескивается при нагреве и охлаждении. Эти сплавы имеют хорошие механические свойства как при низких, так и при высоких температурах, они пластичны, хорошо обрабатываются, свариваются.

Хромоникелевые сплавы имеют удовлетворительные электротехнические свойства, не стареют, немагнитны. Основной их недостаток – высокая стоимость и дефицитность материалов, в первую очередь никеля. Поэтому были созданы железо-хромо-алюминиевые (тройные) сплавы, содержащие железо, хром и до 5 % алюминия. Эти сплавы могут быть более жаростойкими, чем хромоникелевые, т. е. могут работать при температуре до 1670 К (например, сплав Х23Ю5Т). Однако эти сплавы достаточно хрупки и непрочны, особенно после пребывания при температуре, большей 1275 К. Поэтому нагреватель после работы в печи нельзя вынуть и отремонтировать. Данные сплавы магнитны, могут ржаветь во влажной атмосфере при нормальной температуре. Они имеют низкое сопротивление ползучести, что должно быть учтено при конструировании из них нагревателей. Недостатком этих сплавов также является их взаимодействие с шамотной футеровкой и оксидами железа. В местах соприкосновения этих сплавов с футеровкой при температуре эксплуатации выше 1275 К футеровка должна быть выполнена из высокоглиноземистого кирпича или покрыта специальной высокоглиноземистой обмазкой. Во время эксплуатации эти нагреватели существенно удлиняются, что также должно быть учтено при конструировании, т. е. необходимо предусматривать возможность их удлинения.

Представителями этих сплавов являются Х15Ю5 (температура применения около 1070 К); Х23Ю5 (1470 К); Х27Ю5Т (1570 К) и Х23Ю5Т (1670 К).

Разработаны сплавы типа Х15Н60Ю3 и Х27Н70Ю3 с добавлением 3 % алюминия, что значительно улучшило жаростойкость сплава, а наличие никеля практически исключило имеющиеся у железо-хромо-алюминиевых сплавов недостатки.

Сплавы Х15Н60Ю3 и Х27Н60Ю3 не взаимодействуют с шамотом и оксидами железа, достаточно хорошо обрабатываются, механически прочны, не хрупки.

Нагревательные элементы большинства промышленных печей выполняются из ленты или проволоки (рис. 2.1). Обычно для изготовления нагревателей промышленных печей применяется проволока диаметром от 3 до 7 мм.

Соотношения между шагом спирали и её диаметром и диаметром проволоки выбирают таким образом, чтобы облегчить размещение нагревателей в печи, обеспечить достаточную их жесткость, и не затруднить теплоотдачу от них к изделиям. Чем больше диаметр спирали и чем гуще её шаг, тем легче разместить в печи нагреватели, но с увеличением диаметра уменьшается прочность спирали, увеличивается склонность витков лечь друг на друга. С другой стороны, с увеличением густоты намотки увеличивается экранирующее действие обращенной к изделиям части витков на остальные и, следовательно, ухудшается использование поверхности.

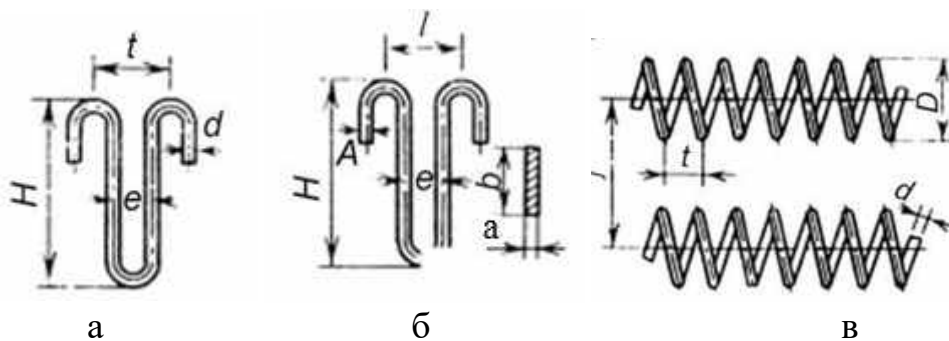


Рисунок 2.1 – Проволочные и ленточные нагреватели электрических печей сопротивления:

а – проволочный зигзагообразный; б – ленточный; в – спиральный;
 a – толщина ленты; b – ширина ленты; l – шаг зигзага ленты; H – высота зигзага; e – расстояние между зигзагами; j – расстояние между осями спиралей; D – диаметр спирали; d – диаметр проволоки; t – шаг спирали

Практикой установлены рекомендуемые соотношения между диаметром проволоки, шагом и диаметром спирали для проволоки диаметром от 3 до 7 мм. Эти соотношения для нихрома следующие: $t > 2d$, $D = (6-8)d$. Для менее прочных железохромоалюминиевых сплавов соотношение будет следующим: $D = (4-6)d$.

Ленточные нагреватели выполняются в виде зигзагов различных размеров и крепятся на металлических (из жароупорной стали или нихрома) или керамических крючках. Чем гуще ленточные зигзагообразные нагреватели, тем более длинный нагреватель можно разместить в печи, но тем больше взаимное экранирование витков, тем хуже используется поверхность ленты. Поэтому установились принятые размеры ленточных зигзагообразных нагревателей, обеспечивающие достаточную их прочность и малое взаимное экранирование. Наиболее употребительное отношение ширины ленты к её толщине равно 10.

Для низкотемпературного нагрева широко применяют трубчатые электронагреватели – ТЭНы, конструкция одного из которых показана на рисунке 2.2. В качестве наполнителя применяется плавящийся

периклаз. По сравнению с открытыми электронагревателями ТЭНы более электробезопасны, могут работать в воде, жидких углеводородах, жидком металле, расплавах солей, оксидов и других средах. ТЭНы стойки к вибрациям и механическим нагрузкам. Мощность ТЭНов составляет от 100 Вт до 15 кВт, рабочее напряжение 36–380 В, рабочая температура 400–1000 К. Срок службы ТЭНов составляет 10–40 тыс. ч.

ТЭНы для бытовых приборов выпускают в соответствии с ГОСТ 19108, при изготовлении ТЭНов, которые используются в промышленных установках, руководствуются ГОСТ 13268.

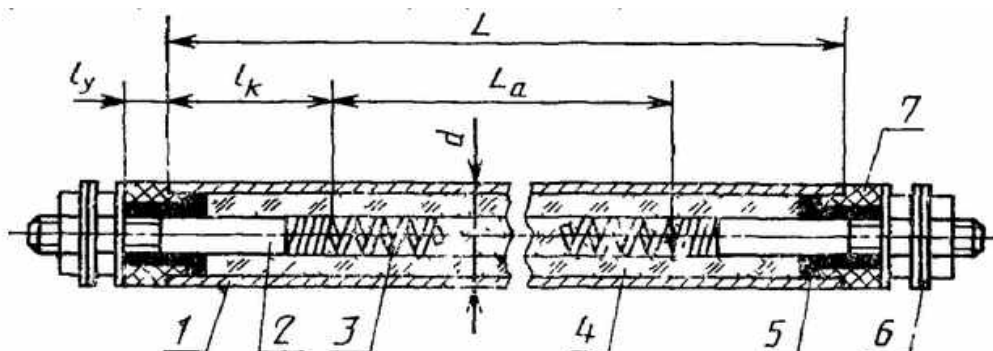


Рисунок 2.2 – Трубчатый электронагреватель:

1 – оболочка; 2 – контактный стержень; 3 – нагревательный элемент; 4 – наполнитель; 5 – герметизирующий материал; 6 – контактные гайки и шайбы; 7 – изолятор; L – развернутая длина трубки; L_a – активная длина; l_k – номинальная длина контактных стержней ТЭН в заделке; d – диаметр уплотненного ТЭН, l_y – длина пути утечки тока

Для высокотемпературных печей с максимальной рабочей температурой до 1700 К применяются нагревательные элементы из карборунда (карбид кремния SiC), получаемые спеканием кремнезема и угля при температуре 1900–2000 К. Конструкция таких нагревателей показана на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Карбидокремниевые электронагреватели

Карбидкремниевые изделия в зависимости от типа связки выпускаются следующих марок:

КК – карбидкремниевые изделия на кремнеземистой связке;

ККУ – карбидкремниевые изделия на кремнеземистой связке улучшенные;

КА – карбидкремниевые изделия на алюмосиликатной связке;

КАУ – карбидкремниевые изделия на алюмосиликатной связке улучшенные;

КН – карбидкремниевые изделия на нитридной связке.

В электрических печах сопротивления с номинальной температурой 1970 К применяют нагреватели, изготовленные из дисилицида молибдена (MoSi_2) и хромита лантана (LaCrO_3).

Для высокотемпературных установок (с максимальной рабочей температурой 2300 К и выше) нагреватели изготавливают из тугоплавких металлов, угля или графита.

При изготовлении нагревательных элементов из тугоплавких материалов применяют молибден, тантал, вольфрам в виде проволоки, ленты, стержней и листов различных сечений.

Графитовые электронагреватели применяются в установках с рабочей температурой 1800–2700 К.

2.3 Электрические печи сопротивления

Электрические печи сопротивления (ЭПС) применяются для технологических операций в машиностроении, металлургии, лёгкой и химической промышленности, строительстве, коммунальном и сельском хозяйстве. Разнообразие материалов, обрабатываемых в ЭПС, и видов технологических процессов привело к большому разнообразию конструкций ЭПС, выпуску их малыми сериями и даже в индивидуальном порядке.

Печь сопротивления представляет собой футерованную камеру, где тепло выделяется в нагревателе.

При технологических процессах, проводимых в ЭПС, используется только нагрев посредством электричества. В ряде случаев используется возможность нагрева в вакууме или защитных газах. Поэтому далее рассматриваются общие принципы построения печей, а также схемы электроснабжения и принципы автоматизации без детального рассмотрения конструкций.

Электрические печи сопротивления по способу превращения электрической энергии в тепловую разделяются на печи *косвенного действия и установки прямого нагрева*.

В ЭПС косвенного действия электрическая энергия превращается в тепловую в специальных нагревателях, а затем передается в рабочее пространство посредством теплопроводности, конвекции и излучения. В ЭПС прямого действия нагреваемое тело включается непосредственно в электрическую цепь. Нагревательные элементы в печах косвенного действия и нагреваемые тела, включаемые в цепь ЭПС прямого действия, могут быть проводниками первого и второго родов.

По уровню достигаемых температур ЭПС можно расположить в следующем порядке: *низкотемпературные* (900–1000 К), *среднетемпературные* (1000–1600 К) и *высокотемпературные* (выше 1600 К).

У низкотемпературных ЭПС процессы теплообмена идут со значительной или даже преобладающей ролью конвекции. Низкотемпературные печи часто называют конвекционными печами. Для интенсификации процесса теплопередачи низкотемпературные печи обычно снабжают вентилятором, и нагреватель иногда размещается в отдельной камере. Эта камера связана с основной камерой каналами для циркуляции воздуха.

В средне- и высокотемпературных печах теплообмен внутри печи осуществляется в основном излучением, а доля конвективного теплообмена незначительна. Печи с преобладающим лучистым теплообменом иногда называют радиационными.

Среднетемпературные печи имеют верхнюю температурную границу 1600 К, определяемую возможностью применения для нагревательных элементов специальных сплавов.

Технологическое применение этих печей весьма обширно. В них осуществляют процессы закалки, нормализации, отжига, термохимическую обработку черных металлов, нагрев под обработку давлением чёрных и цветных металлов и т. п.

Среди ЭПС непрерывного действия различают *конвейерные, толкательные, рольганговые, карусельные, с шагающим подом, пульсирующим подом, барабанные, протяжные*.

В печах с контролируемой атмосферой применяются инертные газы, а также специальные газовые смеси, назначение которых – термохимическая обработка поверхности изделий – азотирование, цементация и нитроцементация, проводимые с целью повышения поверхностной прочности и износостойчивости деталей.

По способу обработки изделий ЭПС разделяют на *печи периодического действия* (садочные печи) и *печи непрерывного действия* (методические).

В первом случае изделие или партию изделий (садку) помещают в камеру печи и изменяют температуру внутри камеры в соответствии с

графиком обработки. Затем изделие извлекают, загружают новое, цикл повторяется.

Для печи периодического действия характерно неизменное положение нагреваемого тела (садки) в течение всего времени пребывания в печи. Печь может работать круглосуточно (тогда циклы непрерывно следуют друг за другом) или с перерывами – в одну или две смены.

Во втором случае в рабочем пространстве печи создают несколько температурных зон в соответствии с требуемым графиком обработки изделия. Обрабатываемое изделие перемещается с заданной скоростью от загрузочного окна к разгрузочному. При такой организации процесса возможно движение изделий непрерывным потоком. Такие печи используют в условиях серийного производства. Автоматизация технологического процесса в таких печах предполагает обеспечение автоматического перемещения изделия с заданной скоростью внутри печи, автоматическую подачу необработанных изделий и уборку обработанных, а также автоматическую стабилизацию температуры в температурных зонах печи.

Далее представлены конструкции электропечей сопротивления периодического действия.

Колпаковая печь – печь периодического действия с открытым снизу подъемным нагревательным – печь периодического действия с открытым снизу подъемным нагревательным колпаком и неподвижным стендом (рис. 2.4).

Процесс в печи осуществляется следующим образом. Нагреваемые детали (садка) с помощью подъемно-транспортных устройств помещаются на стенд. Поверх них сначала устанавливается жаропрочный колпак – муфель, а затем основной колпак камеры печи, выполненной из металлического каркаса с огнеупорной футеровкой. Нагревательные элементы расположены по боковым стенкам колпака и в кладке стенда. Питание нагревательных элементов осуществляется с помощью гибких кабелей и штепсельных разъемов.

По окончании нагрева электропитание колпака отключается и он переносится на соседний стенд, где уже установлена очередная загрузка для нагрева. Остывание садки происходит на стенде под жароупорным муфелем, что обеспечивает необходимую скорость остывания.

В колпаковых печах при каждом цикле теряется теплота, запасенная в муфеле и кладке стенда, что составляет 10–15 % от теплоты, запасенной в кладке колпака.

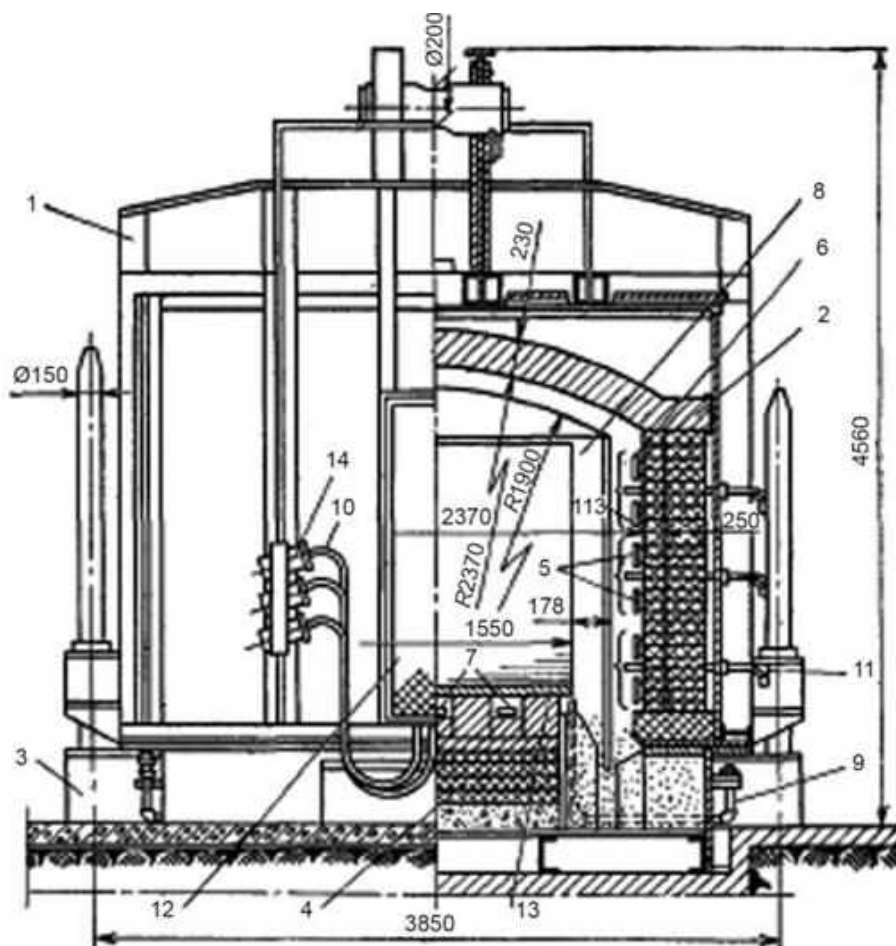


Рисунок 2.4 – Колпаковая печь сопротивления периодического действия:

- 1 – каркас колпака; 2 – футеровка колпака; 3 – каркас стенда;
 4 – футеровка стенда; 5, 6 – нагреватели колпака; 7 – нагреватели стенда; 8 – муфель; 9 – газопровод; 10 – гибкий токопровод;
 11 – термопара; 12 – коробка выводов; 13 – подовая плита;
 14 – электрический разъемный контакт

Мощность колпаковых печей достигает нескольких сотен киловатт. Благодаря тому, что колпак и муфель могут быть герметизированы, нагрев и остывание садки можно проводить в защитной атмосфере.

Камерная электропечь – печь периодического действия с камерой нагрева, загрузка и разгрузка садки которой производится в горизонтальном направлении. Камерная печь состоит из прямоугольной камеры с огнеупорной футеровкой и теплоизоляцией, перекрытой сводом и помещенной в металлический кожух (рис. 2.5).

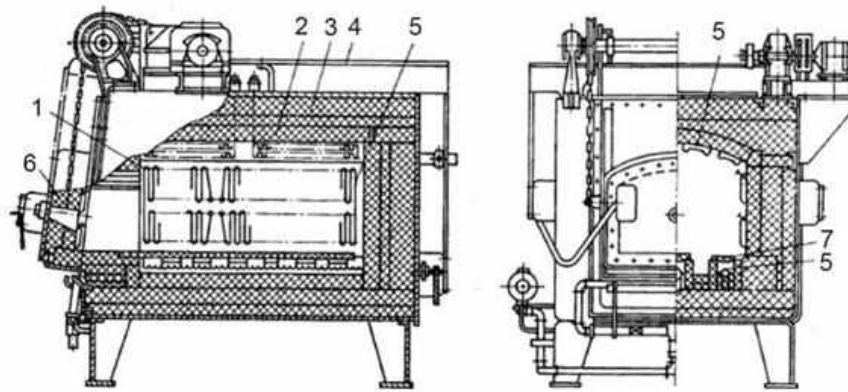


Рисунок 2.5 – Камерная электропечь:

1 – рабочая камера; 2 – огнеупорный слой футеровки; 3 – теплоизоляционный слой футеровки; 4 – кожух; 5 – нагревательные элементы; 6 – футерованная дверца; 7 – подовая плита

Печь загружают и выгружают через закрываемое дверцей отверстие в передней части.

В поду камерной печи обычно имеется жароупорная плита, на которой расположены нагреватели. В печах при температуре до 1000 К теплообмен обеспечивается за счет излучения или вынужденной конвекции, обеспечиваемой замкнутой циркуляцией печной атмосферы.

Шахтная печь (рис. 2.6) представляет собой круглую, квадратную или прямоугольную шахту. Корпус печи заглублен в землю и перекрывается сверху крышкой с затвором и электроприводом. Нагревательные элементы в ней установлены обычно по боковым стенкам.

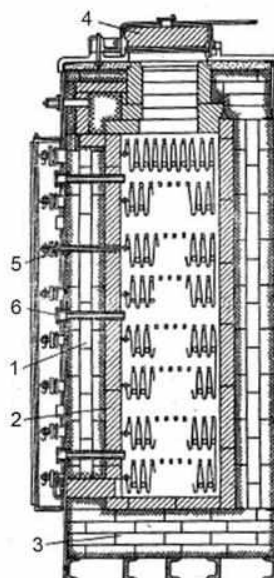


Рисунок 2.6 – Шахтная печь:

1 – нагреватели; 2 – огнеупорная кладка; 3 – теплоизоляция; 4 – крышка печи; 5 – вывод нагревателя; 6 – термопара

Элеваторная электропечь представляет собой печь периодического действия с открытой снизу неподвижной камерой нагрева и с опускающимся подом (рис. 2.7).

Данный вид ЭПС периодического действия представляет собой цилиндрическую или прямоугольную камеру, установленную на колоннах на высоте 3–4 м над уровнем пола цеха.

Под печи поднимается и опускается гидравлическим или электромеханическим подъёмником, который установлен под камерой нагрева. Нагреваемые изделия – садку, нагружают на тележку, затем с помощью лебёдки продвигают под печь и поднимают подъёмником, вдвигая в камеру.

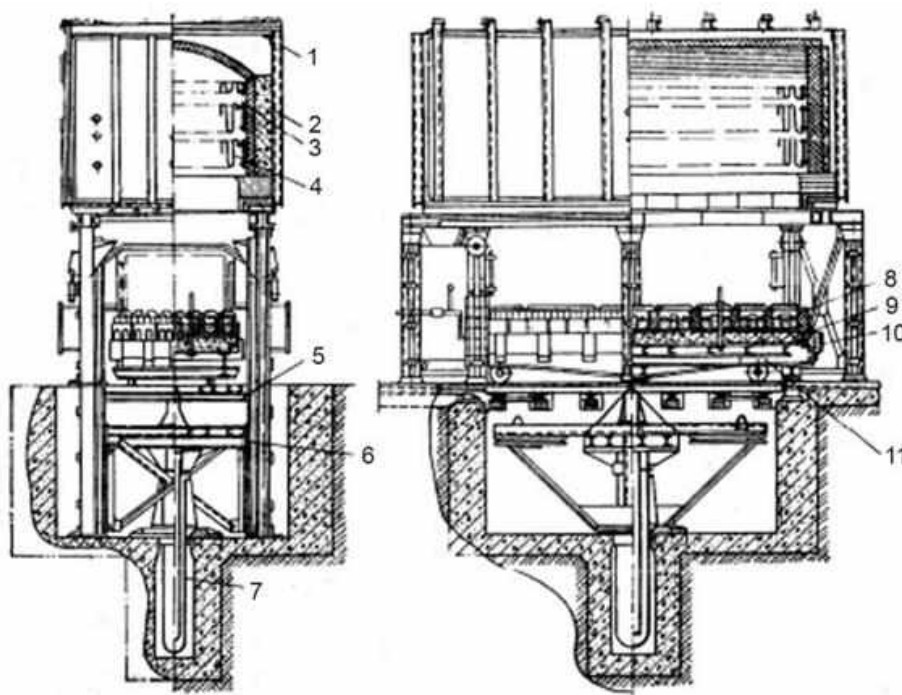


Рисунок 2.7 – Элеваторная электропечь:

1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – боковые нагреватели; 4 – торцовые нагреватели; 5 – платформа с рельсовым путем; 6 – платформа плунжера; 7 – плунжер; 8 – подовые нагреватели; 9 – футеровка тележки; 10 – песочный затвор; 11 – тележка

По окончании технологического процесса под опускается и изделие извлекается.

Элеваторные печи служат для отжига, эмалирования, цементации, обжига керамических изделий, спекания и металлизации деталей.

Печи комплектуются многоступенчатыми трансформаторами.

В низкотемпературных печах нагреватели расположены на стенках. В высокотемпературных печах – на стенках и в поду.

Существуют также *электрические печи-ванны*, нагрев в которых осуществляется жидкими теплоносителями (маслом, щелочами,

расплавами солей). Эти печи применяют для термической обработки ответственных длинномерных и тонкостенных металлических изделий в индивидуальном и мелкосерийном производстве.

Электрическая печь-ванна имеет вид шахтной печи со встроенной в рабочее пространство ванной или тиглем. Электродпечи-ванны бывают с внешним обогревом, в которых нагреватели расположены на внутренней поверхности огнеупорной кладки; с внутренним обогревом трубчатыми погруженными в теплоноситель электронагревателями; с внутренним обогревом электродными группами (однофазными и трехфазными) – в этом случае ток протекает в теплоносителе между электродами.

Особенно широко распространены электродные соляные ванны. В них одновременно обеспечивается быстрый, равномерный и безокислительный нагрев изделий. Подбором состава солей можно также проводить и термохимическую обработку (цементацию, азотирование, борирование и т. п.).

На рисунке 2.8 изображена серийно выпускающаяся электродная ванна с рабочей температурой до 1570 К.

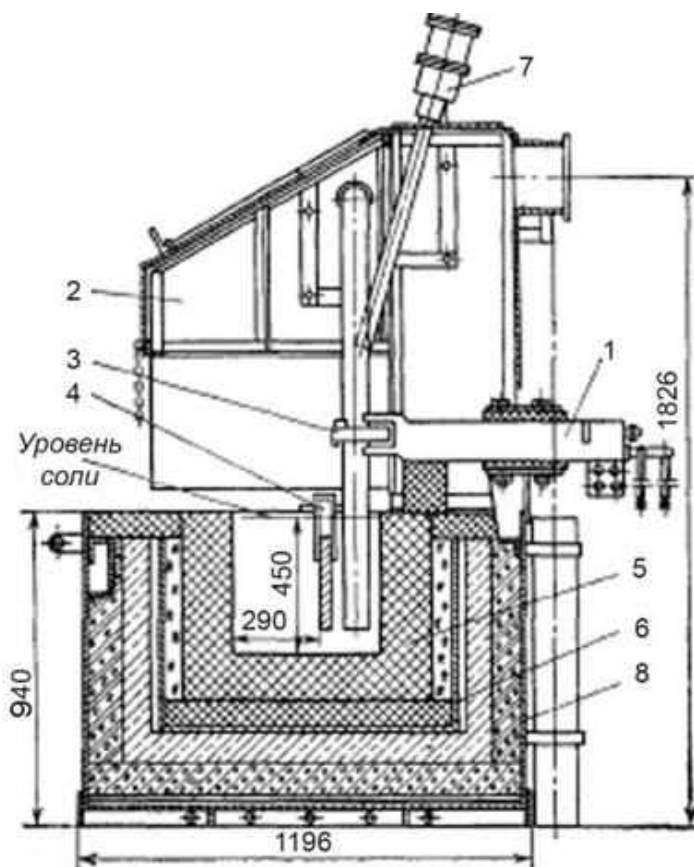


Рисунок 2.8 – Электродная соляная ванна:

- 1 – токопровод; 2 – зонд; 3 – электродная группа; 4 – перегородка;
5 – футеровка; 6 – внутренний кожух; 7 – пирометр; 8 – наружный кожух

Ванна прямоугольной формы выложена огнеупорным шамотным кирпичом в промежуточном металлическом кожухе-тигле, вместе с которым она может легко извлекаться из печи и заменяться новой. Промежуточный кожух служит также для предохранения тепловой изоляции от проникновения расплавленных солей.

В ванне вдоль одной из сторон помещены три цилиндрических стальных электрода, к которым через электрододержатели и шинопровод подведено напряжение от вторичных обмоток понижающего трансформатора, устанавливаемого непосредственно около печи. Трансформаторы ванн имеют переключатели ступеней напряжения, позволяющие регулировать подводимое к электродам напряжение в пределах от 6 до 18 В.

Электродные соляные ванны предназначены для безокислительного нагрева изделий до температуры, не превышающей 1570 К, и применяются главным образом для термообработки режущего и ударного инструмента.

При установившемся технологическом процессе массового и крупносерийного производства изделий для увеличения производительности предпочтительно применять непрерывно действующие или методические печи. В зависимости от требований технологического процесса в таких печах, кроме нагрева изделий, до заданных температур можно производить выдержку при этой же температуре, а также их охлаждение. В таком случае печи выполняются состоящими из нескольких зон, протяженность которых зависит от конкретных условий проведения технологического процесса.

Часто печи непрерывного действия объединяют в один полностью механизированный и автоматизированный агрегат, состоящий из нескольких печей. В частности, такая линия может включать в себя закалочную и отпускную печи, закалочный бак, моечную машину и сушилку.

В таком агрегате изделие вначале нагревается в закалочной ЭПС, затем поступает в закалочный бак, откуда попадает в моечную машину, где смывается закалочная жидкость (масло), высушивается в сушильной ЭПС и попадает в отпускную ЭПС.

Входящие в агрегат установки должны иметь одинаковую производительность, так как производительность агрегата в целом определяется той входящей в его состав установкой, которая имеет самую малую производительность.

Такие автоматизированные агрегаты могут входить в состав поточных и автоматических линий.

Электропечь непрерывного действия, как правило, имеет несколько зон с самостоятельным регулированием температуры, что дает возможность создавать различные температурные режимы. Длина зоны обычно равна 1,5–2 м, а в тех случаях, когда не требуется

обеспечивать заданный график нагрева, длина зоны может быть увеличена до 2,5–3 м, и, наоборот, когда необходимо точно выдержать заданную кривую нагрева изделий, длину зоны следует уменьшить до 0,8–1,2 м.

В случае необходимости печи непрерывного действия могут работать с контролируруемыми атмосферами и комплектоваться камерами охлаждения. При этом с загрузочной и разгрузочной сторон устанавливаются так называемые шлюзовые камеры или со стороны разгрузки устанавливается специальный разгрузочный лоток, входящий в рабочую среду закалочного бака, тем самым образуя гидравлический затвор.

Электропечь непрерывного действия с рабочей температурой до 970К часто оборудуют вентиляторами. Нагреватели в электропечах устанавливают на своде, поду и боковых (реже торцовых) стенках.

Конструкции печей непрерывного действия различаются в основном механизмами перемещения нагреваемых изделий в рабочем пространстве.

Конвейерные электропечи (рис. 2.9) являются наиболее распространенным типом ЭПС непрерывного действия. Они применяются в основном для термообработки мелких и средних по габаритам и массе изделий крупносерийного и массового производства, например, колец подшипников.

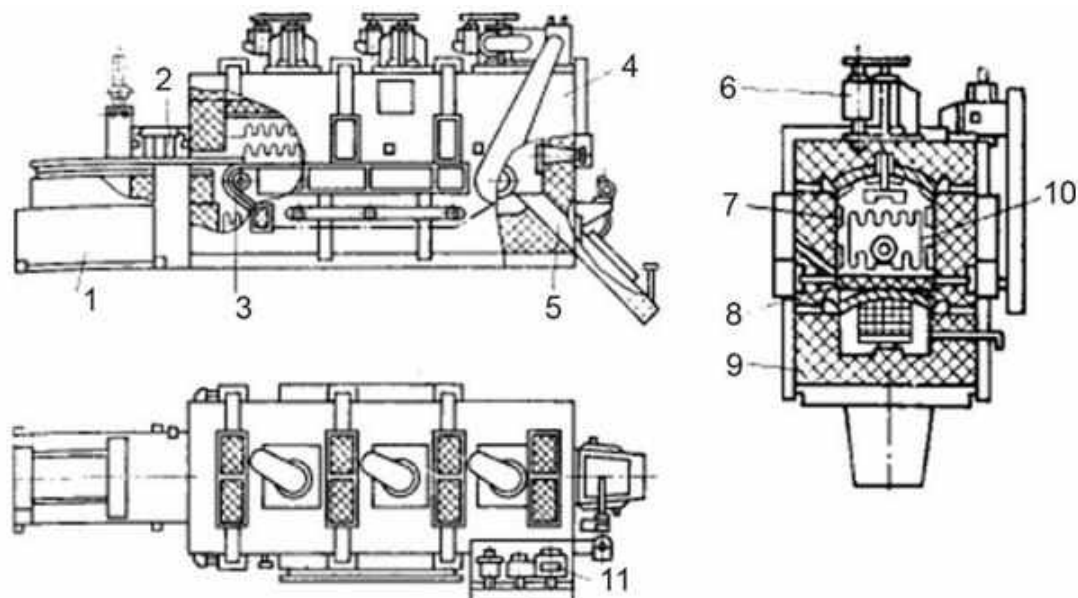


Рисунок 2.9 – Горизонтальная конвейерная электропечь с рабочей температурой 970 К:

- 1 – загрузочное приспособление; 2 – форкамера со шторками;
 3 – конвейерная лента; 4 – кожух; 5 – лоток; 6 – вентилятор;
 7 – боковые нагреватели; 8 – подовые нагреватели; 9 – футеровка;
 10 – торцовые нагреватели; 11 – привод конвейера

Под печи представляет собой конвейер – полотно, натянутое между двумя валами, которые приводятся в движение специальными двигателями. Нагреваемые изделия укладываются на конвейер и передвигаются через рабочее пространство печи. Конвейерная лента может быть выполнена плетёной из нихромовой сетки, штампованных пластин и соединяющих их прутков, а также – для тяжелых нагреваемых изделий – из штампованных или литых цепных звеньев.

Конвейер размещается целиком в камере печи и находится постоянно в нагретом состоянии. Валы конвейера работают в очень тяжелых условиях и требуют водяного охлаждения. Поэтому часто концы конвейера выносят за пределы печи. В этом случае значительно облегчаются условия работы валов, но возрастают потери теплоты в связи с остыванием конвейера у разгрузочных и загрузочных концов. Нагреватели в конвейерных печах чаще всего размещаются на своде или в поду под верхней частью ленты конвейера, реже – на боковых стенках.

Конвейерные нагревательные печи в основном применяются для нагрева сравнительно мелких деталей до температуры около 1200 К.

Для нагрева и мелких, и крупных изделий до температуры 1430 К могут быть использованы *толкательные электропечи* (рис. 2.10).

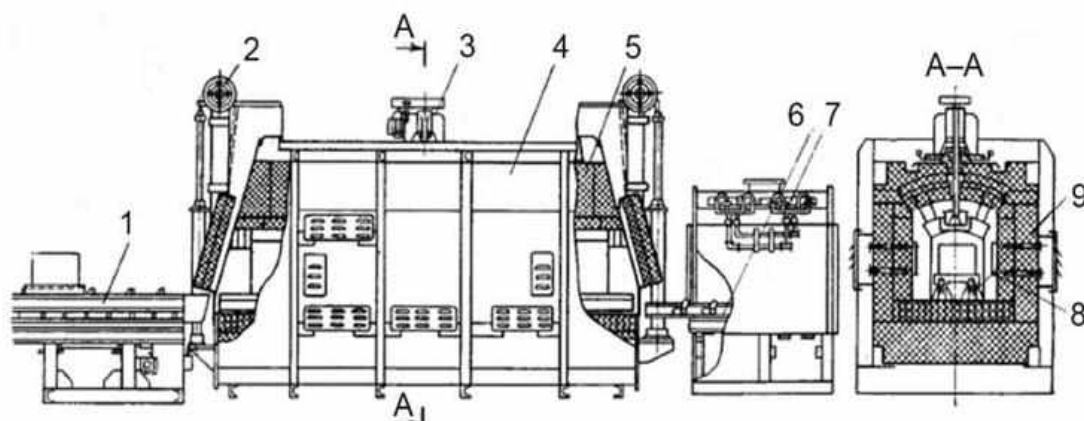


Рисунок 2.10 – Толкательная электропечь с камерой охлаждения:
 1 – толкатель; 2 – дверца с механизмом подъёма; 3 – вентилятор;
 4 – кожух; 5 – футеровка; 6 – таскатель; 7 – камера охлаждения;
 8 – нагреватели; 9 – рельсовый путь

На поду этих печей установлены жароупорные направляющие в виде труб, рельсов или роликового пода, вдоль которых перемещаются поддоны (садки) с нагреваемыми изделиями. Находящийся на загрузочном торце печи толкатель вдвигает в электропечь с загрузочного стола очередной поддон с изделиями, и, так как поддоны расположены вплотную друг к другу, то в движение приходят все ранее загруженные в печь поддоны, образуя так называемый поезд.

После подхода к разгрузочному концу печи поддон либо сам скатывается по наклонному рольгангу, либо захватывается таскателем и направляется им на разгрузочный стол.

Основными преимуществами толкательных печей являются достаточно хорошая герметичность, относительная простота, отсутствие транспортирующих механизмов в зоне высоких температур.

Недостаток данных печей – это наличие массивных поддонов, что ограничивает длину электропечей до 10–12 м из-за невозможности перемещения поезда поддонов большей длины. Кроме того, на нагрев поддонов затрачивается до 25 % полезной теплоты. Определенная трудность имеется также в возврате поддонов от разгрузочного конца печи к загрузочному. Кроме этого, поддоны обладают ограниченной стойкостью, которая исчисляется несколькими месяцами, и стоимость поддонов существенно удорожает себестоимость выполняемых операций термообработки.

В ряде случаев при нагреве крупных изделий правильной формы удаётся укладывать изделия вплотную, непосредственно на направляющие и тем самым обойтись без поддонов, что исключает недостатки, имеющиеся в ЭПС с использованием поддонов.

В большинстве современных толкательных печей загрузку и выгрузку поддонов, а также открывание дверец производят с помощью гидравлических приводов, возможно применение электромеханического привода.

Герметизацию загрузочного торца печей обеспечивает специальная загрузочная камера, оборудованная подъемным колпаком, в который поддоны подают снизу загрузочным столом, а также боковой заслонкой с эксцентриковыми зажимами или специальным загрузочным механизмом и пламенной завесой, включаемой в момент загрузки.

В связи с тем, что толкательные печи легко могут быть герметизированы, они широко применяются для цементации стальных изделий.

Используются также *муфельные и безмуфельные толкательные печи*. Безмуфельные ЭПС бывают с закрытыми и открытыми нагревателями. Наличие муфеля и связанный с этим повышенный расход дорогостоящих дефицитных никельсодержащих жароупорных сталей являются недостатками муфельных толкательных печей. Кроме того, эти печи не могут иметь температуру выше 1220 К. Эти же недостатки имеют безмуфельные ЭПС с закрытыми нагревателями.

Однако муфельные и безмуфельные толкательные печи обладают достоинствами, заключающимися в большей надежности нагревателей, а также в возможности быстрой замены нагревателей без охлаждения печей.

Безмуфельные печи с открытыми нагревателями могут обеспечивать температуру до 1320 К, что значительно повышает их

производительность. Однако осаждение сажи на футеровке и нагревателях резко сокращает срок службы нагревателей, в связи с чем подобные печи не получили широкого применения.

На основе толкательных печи могут быть созданы агрегаты, в которых можно проводить ряд последовательных термических и химико-термических процессов. Толкатели этих печи приспособлены для передачи поддонов с изделиями на толкатель следующей печи.

В России и странах СНГ созданы серии толкательных электропечей для работы в «воздушной атмосфере» на температуры 620, 1020, 1170 и 1370 К, а также серия толкательных печей для цементации при температуре 1220 К.

Рольганговые электропечи, передвижение изделий в которых осуществляется рольганговым подом (рис. 2.11), являются наиболее универсальными среди печей непрерывного действия. В рольганговых печах могут быть обработаны разнообразные по форме и массе изделия. Увеличение длины электропечи не сказывается на надёжности её работы.

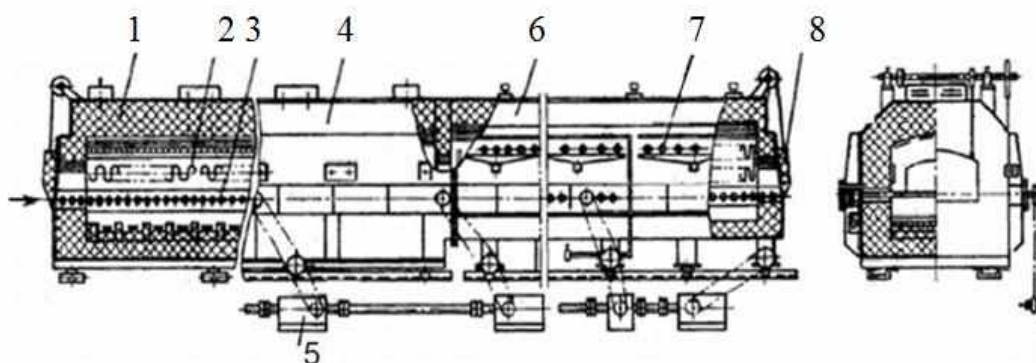


Рисунок 2.11 – Рольганговая электропечь:

1 – футеровка; 2 – нагреватель; 3 – рольганг; 4 – кожух; 5 – привод рольганга; 6, 7 – камера охлаждения; 8 – дверца

Для перемещения по электропечи изделия загружаются непосредственно на рольганг или в специальные жароупорные поддоны, которые помещаются на рольганг. Рольганговые ЭПС могут комплектоваться загрузочным столом или загрузочным механизмом, камерой загрузки, камерой охлаждения, закалочным баком, разгрузочным столом или разгрузочным механизмом, разгрузочной камерой, кантователем, транспортером возврата.

Для проведения ремонта эти печи имеют съёмные своды. При использовании рольганговых печей для работы с контролируемыми атмосферами ролики должны быть герметичными, в случае необходимости они охлаждаются водой. Движение роликов, как правило, осуществляется общим наружным приводом.

В карусельных электропечах транспортирующим узлом служит под, выполненный в виде кольца. Под вращается, перемещая изделия в печном пространстве.

Карусельные электропечи используются для низкотемпературного отпуска стальных изделий (до 520 К), для закалки мелких стальных изделий (до 1120 К), для нагрева под закалку перед штамповкой (до 1420 К) и для нагрева под прокатку в металлургии (до 1520 К). Эти ЭПС возможно применять на температуры до 1570 К при значительных массах загрузки благодаря тому, что механизмы перемещения находятся вне зоны высоких температур. Подина также, как и рабочая камера, может быть керамической и практически не иметь металлических деталей, ограничивающих температуру применения.

В карусельных печах можно нагревать изделия сложной конфигурации без поддонов, что не всегда возможно в других печах непрерывного действия.

Карусельные печи могут быть приспособлены для работы с защитной атмосферой. В этом случае оконные проемы печи оборудуются пламенными завесами и шторками.

Недостатком этого вида печей являются трудности, связанные с механизацией загрузки и выгрузки обрабатываемых изделий, так как загрузочный и разгрузочный проемы находятся рядом. По этой же причине эти печи неудобно использовать в поточных линиях.

Карусельные печи для сравнительно низких температур имеют под, выполненный в виде металлоконструкции, расположенной внутри печного пространства. Для легких грузов под имеет одну опору, вал которой выводится из печного пространства и приводится во вращение приводом, как правило, с применением системы зубчатых передач.

В карусельных печах для закалки мелких изделий вращающийся под выполняется с ковшами. Одна сторона ковша прикрепляется на шарнире к вращающейся конструкции пода, другая скользит по кольцеобразной неподвижной направляющей. Против разгрузочного лотка печи неподвижная направляющая обрывается и ковш опрокидывается, а изделия, находящиеся в нем, высыпаются в закалочный бак. При более высоких температурах и тяжелых грузках внутри печного пространства располагается огнеупорная часть пода, а его металлоконструкция выносится из зоны высоких температур; опорой пода служат ролики. Обрабатываемые изделия помещаются непосредственно на огнеупорную часть пода.

Для загрузки и выгрузки изделий карусельные печи могут иметь один проём, если охлаждение нагретых обрабатываемых изделий при их разгрузке не сказывается на их качестве (например, при отпуске и отжиге), а также могут иметь два проёма с огнеупорной перегородкой между ними, если печи предназначены, например, для закалки или нагрева под штамповку, прессование или прокатку. Вращение пода

может быть непрерывным или прерывистым. Если на вращающемся поду расположены нагревательные элементы, то электропитание к ним подводится через скользящие контакты. На рисунке 2.12 представлена карусельная электропечь с защитной атмосферой. Она предназначена для нагрева под штамповку заготовок из титановых жаропрочных сплавов и конструкционных сталей в защитной атмосфере. Данная печь состоит из цилиндрического кожуха, футерованного огнеупорными и теплоизоляционными материалами. В футерованном кожухе выполнены загрузочный и разгрузочный проемы, которые перекрываются заслонками механизма подъема. На кожухе устанавливается футерованная крышка, которая крепится к кожуху болтами. Заготовки через загрузочный проём подаются автоматически с помощью роботизированного технологического комплекса (РТК) на позиции футерованного пода, вращающегося на опорных роликах, установленных на раме. Вращение пода осуществляется электромеханическим приводом. Нагрев заготовок производится с помощью зигзагообразных проволочных нагревателей. При подъеме заслонок включается подача природного газа через газопровод и загорается пламенная завеса. При опускании заслонки подача природного газа прекращается.

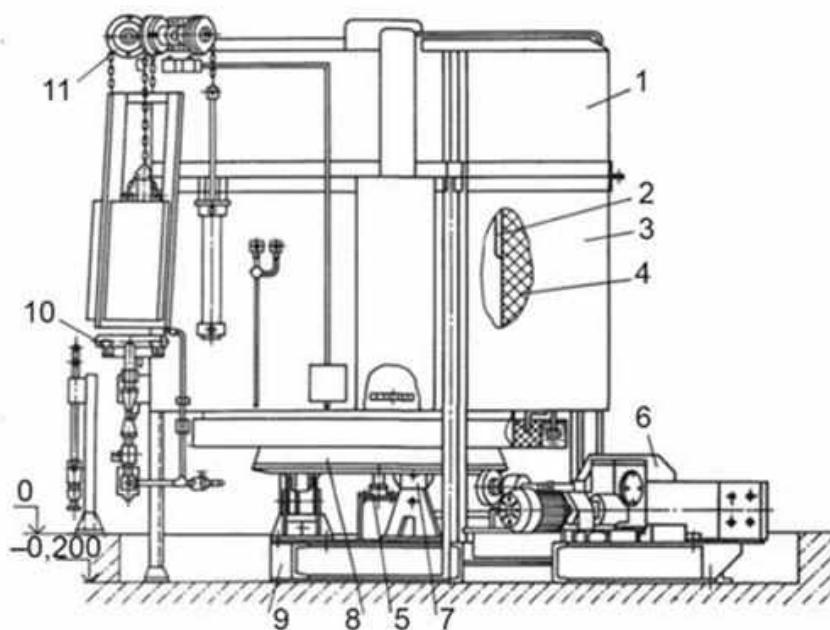


Рисунок 2.12 – Карусельная электропечь с защитной атмосферой:
 1 – футерованная крышка; 2 – зигзагообразные проволочные нагреватели; 3 – цилиндрический кожух; 4 – футерованные огнеупорные и теплоизоляционные материалы; 5 – газопровод;
 6 – электромеханический привод; 7 – опорные ролики;
 8 – футерованный под; 9 – рама; 10 – газопровод; 11 – механизм подъёма

Барабанные электропечи предназначены в основном для обработки изделий с максимальным размером до 80 мм, а также для нагрева порошкообразных материалов.

Перемещение нагреваемых изделий или порошка через электропечь осуществляется во вращающемся барабане-муфеле. Внутри муфеля находятся непрерывные ребра, расположенные по винтовой линии с определенным шагом по всей длине. В этом случае при каждом обороте муфеля обрабатываемые изделия перемещаются на один виток. Возможен барабан и без рёбер для передвижения изделий. В этом случае необходимо расположить барабан наклонно под углом 1–5° в сторону разгрузки.

Преимущества барабанных печей, в сравнении с другими печами непрерывного действия, состоят в том, что они имеют сравнительно высокие технико-экономические показатели. Из-за отсутствия затрат теплоты на нагрев вспомогательных транспортных средств, легко встраиваются в автоматические и поточные линии, не требуют каких-либо дополнительных транспортных приспособлений, легко герметизируются и, тем самым, приспособлены для использования их с контролируемыми атмосферами. В этих печах обеспечивается высокое качество термообработки, так как благодаря непрерывному перемешиванию все детали находятся в одинаковых температурных условиях.

Недостатками этих печей являются сравнительно низкая производительность, обусловленная невозможностью обеспечения полного заполнения барабана, а также ограниченная длина барабана. Кроме того, в этих ЭПС имеется повышенный расход дорогих дефицитных жароупорных сталей.

Нагреваемые в барабанных печах изделия не должны быть тонкостенными и сложной формы, так как при транспортировке изделий через печь на них могут появиться забоины и вмятины. Эти печи наиболее целесообразно применять в условиях массового и крупносерийного производства (например, при термообработке шариков, роликов, гаек, колец, осей и т. д.).

Максимальная рабочая температура барабанных печей составляет 1000 °С, она ограничена работоспособностью металлического муфеля. Барабанные ЭПС, как правило, имеют съёмные своды. При использовании этих печей с контролируемыми атмосферами применяются герметичные загрузочные и разгрузочные устройства. В этом случае муфели имеют центральную трубу, к которой примыкают витки рёбер, что обеспечивает проход газа через все витки муфеля. Имеются печи, в печном пространстве которых расположены два муфеля. Барабанные печи используются в поточных линиях для комплексной обработки изделий. Так, широкое применение нашли закалочно-отпускные и цементационно-закалочно-отпускные агрегаты.

В России и странах СНГ производятся барабанные печи для термической и химико-термической обработки деталей, а также для нагрева сыпучих материалов на температуры от 200 до 1000 °С, мощностью от 10 до 500 кВт, диаметром рабочего пространства от 400 до 1600 мм и длиной муфеля от 1,2 до 10 м.

Протяжные электропечи (рис. 2.13) предназначены для нагрева проволоки, ленты, тонкого листа, труб большой протяжённости. В процессе обработки нагреваемый металл непрерывно протягивается через печь с помощью размоточно-намоточных механизмов.

Преимуществом протяжных ЭПС является высокая равномерность нагрева и, как следствие этого, высокое качество обработки в сравнении с нагревом в бухтах или рулонах. Недостатком этих ЭПС является их сравнительно большая длина.

Протяжные ЭПС бывают горизонтальными и вертикальными. В целях получения более высокой производительности электропечей и сокращения их длины ЭПС делаются многорядными, т. е. через одну печную камеру протягивается одновременно несколько рядов проволоки, ленты или труб. Для увеличения рядности ЭПС выполняются многоэтажными – с печными камерами, расположенными одна над другой. Кроме того, используется также многократное прохождение (многоходность) проволоки или ленты через одну или несколько рядом стоящих ЭПС.

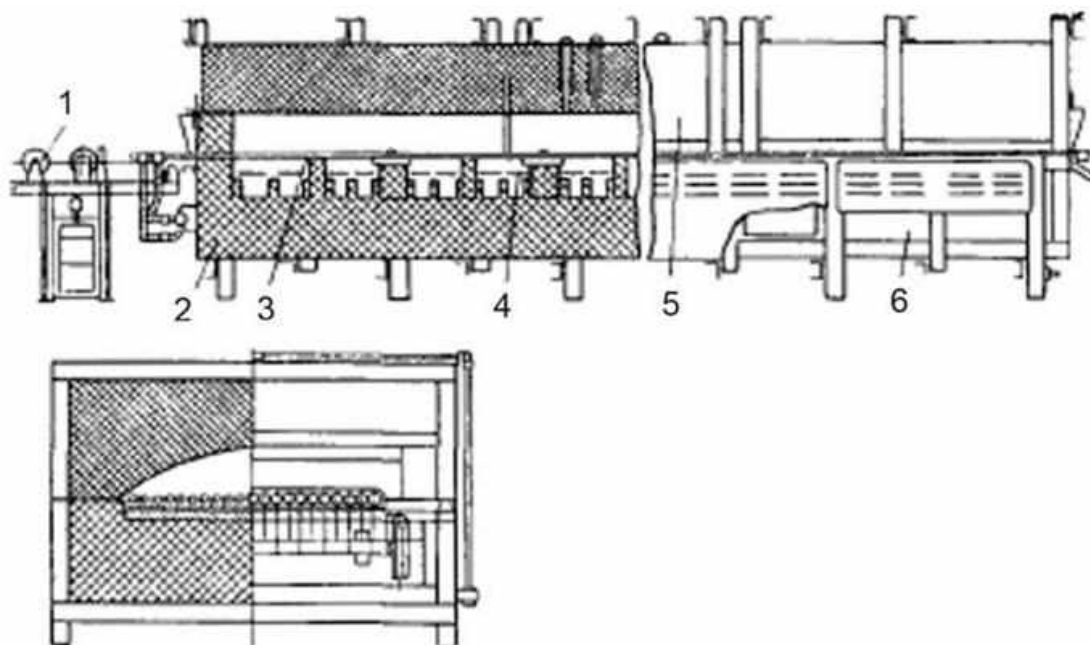


Рисунок 2.13 – Протяжная электропечь для термообработки проволоки:
1 – ролики; 2 – футеровка; 3 – муфель; 4 – нагреватели; 5 – крышка;
6 – кожух электропечи

Кроме термообработки проволоки, ленты и других изделий из чёрных и цветных металлов протяжные печи широко применяются для сушки и полимеризации лаков или пластмасс. Особым видом протяжных ЭПС являются башенные печи, которые применяются для термообработки при большей производительности сравнительно с горизонтальными печами. Скорость движения ленты в таких ЭПС достигает 10 м/с при ширине ленты до 1 м. Для исключения остаточных деформаций в ленте диаметр ролика, который огибает лента, должен быть в 800–1000 раз больше толщины ленты в холодном состоянии и в 600–700 раз – в горячем. Тем самым ограничивается толщина обрабатываемой ленты (в реальных печах она не превышает 2 мм).

Для обеспечения нормального прохождения проволоки, ленты или труб через горизонтальную протяжную печь на практике часто используют направляющие трубы (в случае обработки проволоки или труб) или муфели (в случае обработки ленты). Направляющие трубы или муфели расположены в печном пространстве, и через них протягиваются обрабатываемые изделия.

Наличие направляющих труб и муфелей облегчает использование протяжных ЭПС с контролируемыми атмосферами.

В России и странах СНГ серийно выпускается ряд протяжных электропечей: для термообработки проволоки – горизонтальные печи на температуры 1220, 1420 и 1570 К мощностью от 100 до 500 кВт и длиной до 20 м, в которых обрабатывается проволока диаметром от 0,2 до 6 мм (одновременно нагревается до 24-х проволок); для термообработки ленты – горизонтальные ЭПС на 920, 1220, 1420 и 1570 К мощностью до 400 кВт и длиной до 25 м, в которых обрабатывается лента толщиной от 0,1 до 5 мм; для эмалирования медной и алюминиевой проволок и лент – вертикальные печи на температуру до 870 К мощностью до 130 кВт, в которых эмалируются проволока диаметром от 0,02 до 3,5 мм и ленты сечением до 500 мм² (одновременно нагревается до 28 проволок, каждая проволока проходит через печь до 10 раз).

Главным преимуществом *туннельных печей* (рис. 2.14) является то, что их металлоконструкции (ходовая часть тележек и рельсы) отделены футеровкой тележки от рабочей камеры печи (зоны наибольших температур). Кроме того, эти печи могут иметь достаточно большую производительность.

Недостатком этих печей является наличие футерованных тележек, которые обладают большой массой и, соответственно, требуют больших затрат на их нагрев, а для возврата тележек требуются специальные механизмы и площади. Кроме того, частый нагрев и охлаждение тележек приводят к растрескиванию их футеровки и преждевременному выходу из строя.

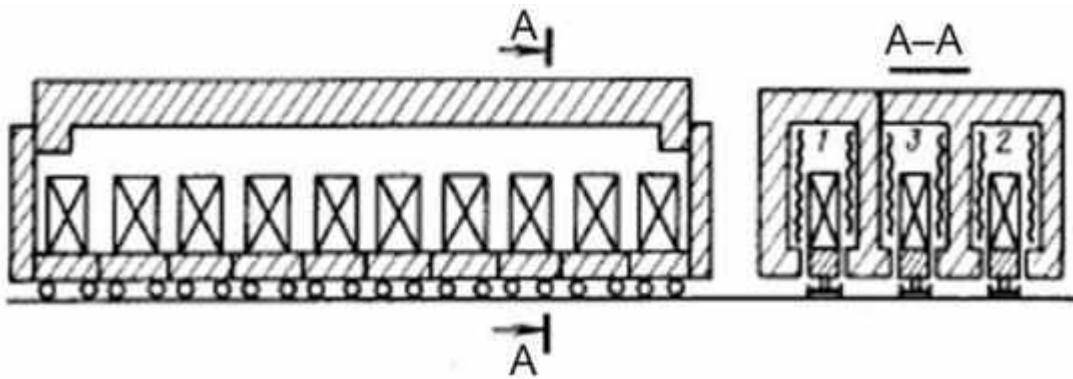


Рисунок 2.14 – Схема туннельной электропечи

Туннельные печи бывают *однорядными* и *многорядными*. Применяются, в основном, в огнеупорной промышленности для обжига керамики при температуре до 1570 К, в отдельных случаях используются для сушки сварочных электродов при температуре до 570 К. Для улучшения технико-экономических показателей этих печей используется рекуперация теплоты. Так, в трехрядных печах в крайних рядах загрузки перемещаются в направлении, противоположном движению в центральном ряду. Начальная стадия нагрева загрузки происходит в крайних рядах, конечная – в центральном. В этом случае часть теплоты от изделий, находящихся в центральном ряду, передается изделиям, находящимся в крайних рядах. При этом одновременно упрощается передача тележек от выхода их из электропечи ко входу. Темп перемещения тележек в крайних рядах в два раза меньше, чем в центральном.

С развитием новых областей техники и созданием для их нужд новых материалов с заданными свойствами резко возросло применение *высокотемпературных печей сопротивления*. Их выполняют вакуумными и с нейтральными (инертными) газовыми средами.

В высокотемпературных печах сопротивления, в основном, выполняются следующие технологические процессы:

- спекание изделий из тугоплавких и химически активных материалов;
- термическая обработка тугоплавких металлов и сплавов;
- осуществляется получение монокристаллов и их термическая обработка;
- плавка и рафинирование тугоплавких металлов и сплавов.

Основные конструктивные отличия высокотемпературных печей от обычных состоят в следующем:

- герметичное исполнение кожуха печи, рассчитанного на атмосферное давление (для вакуумных печей) и на давление, значительно превышающее атмосферное (1–5 МПа), – для печей вакуумно-компрессорных, работающих с нейтральными газами;

– конструкция нагревателей основывается на применении тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама, тантала) и графита; питание нагревателей осуществляется пониженным напряжением (из-за опасности пробоя) от специальных понижающих трансформаторов с регулированием вторичного напряжения;

– кладка печи для облегчения откачки из нее газов выполняется из легко дегазируемых материалов или роль тепловой изоляции выполняют системы металлических экранов;

– наличие вместо обычных проемов и уплотнений вакуумных затворов и вакуумных уплотнений;

– наличие системы откачки, состоящей из вакуумных насосов, трубопроводов, вентилях, затворов.

Вакуумные печи периодического действия изготавливают серийно и индивидуально; по типу конструкций они разделяются на *камерные, шахтные, колпаковые и элеваторные*.

На рисунке 2.15 изображена вакуумная шахтная печь сопротивления на рабочую температуру до 2270 К с нагревателем из молибденового листа и экранной тепловой изоляцией.

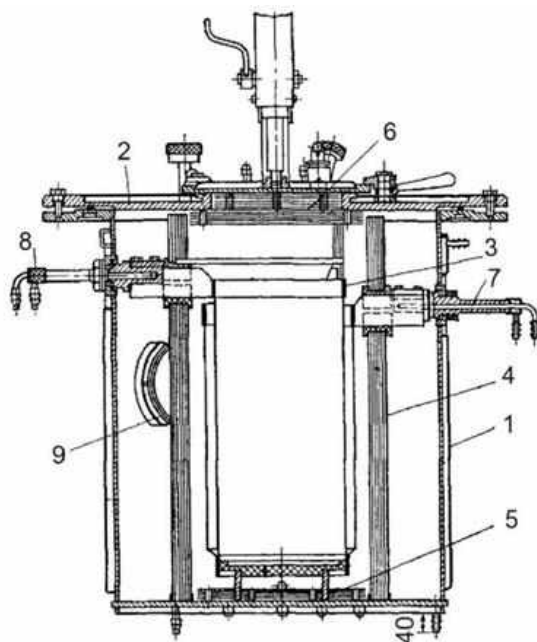


Рисунок 2.15 – Высокотемпературная электропечь с экранной теплоизоляцией:

1 – водоохлаждаемый кожух печи; 2 – крышка; 3 – нагреватель;
4, 5, 6 – экраны; 7, 8 – выходы нагревателя, 9 – патрубок

Вакуумные высокотемпературные печи непрерывного действия выполняются в виде таких конструктивных типов, которые позволяют осуществлять перемещение изделий механизмами, расположенными вне рабочего пространства печи.

В наибольшей степени подходят для работы в условиях вакуума и высоких температур толкательные печи (рис. 2.16) и печи с выдвигным подом. Применяются также туннельные печи (с перемещающимися вдоль печной камеры футерованными тележками) и протяжные – для термообработки проволоки и ленты, снабженные динамическими уплотнениями.

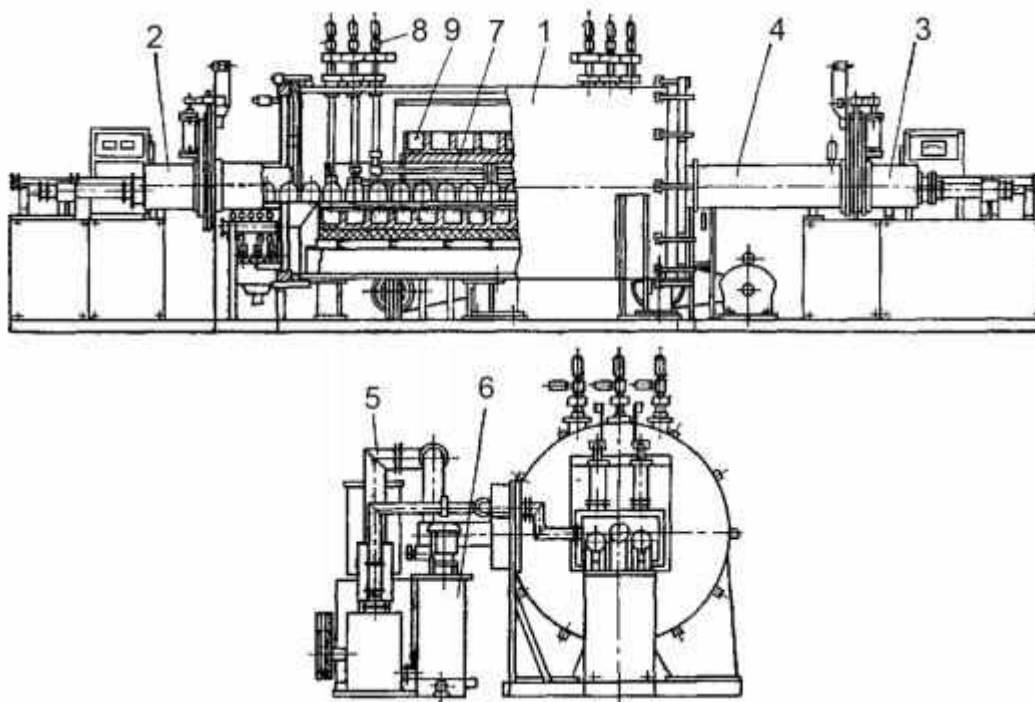


Рисунок 2.16 – Вакуумная толкательная электропечь:

- 1 – нагревательная камера; 2 – камера загрузки; 3 – камера выгрузки;
- 4 – камера охлаждения; 5 – вакуумная маслонапорная установка гидропривода; 6 – маслонапорная установка гидропривода;
- 7 – графитовые нагреватели; 8 – выходы нагревателей; 9 – футеровка

2.4 Электрический расчёт печи сопротивления

Цель электрического расчёта заключается в определении размеров (сечения и длины) нагревателей (по фазам) в соответствии с требуемым сопротивлением для выделения необходимой мощности, а также от условий теплообмена между нагревателями и нагреваемыми изделиями.

Обычно в качестве исходных данных для расчета нагревателей электрических печей выступают мощность, которую должны обеспечивать нагреватели, максимальная температура, которая требуется для осуществления соответствующего технологического процесса (отпуска, закалки деталей, спекания порошковых материалов и

т. д.), и размеры рабочего пространства электрической печи. Если мощность печи не задана, её можно определить по эмпирическому правилу.

В ходе расчета нагревателей требуется получить диаметр и длину (для проволоки) или площадь сечения и длину (для ленты), которые необходимы для изготовления нагревателей. Необходимо также выбрать материал, из которого будут изготовлены нагреватели.

Пусть в качестве материала для нагревателей рассматривается хромоникелевый прецизионный сплав в виде проволоки с высоким электрическим сопротивлением нихром Х20Н80, который является одним из самых популярных материалов, применяемых при изготовлении нагревательных элементов.

Исходя их потребностей в тепловой обработке изделий, рассчитывают полезный объём камеры внутри печи. В качестве примера взяты следующие размеры внутреннего пространства печи: высота $h = 490$ мм, ширина $b = 350$ мм и глубина $l = 350$ мм.

Для заданных размеров объём равен

$$V = h \cdot d \cdot l = 490 \cdot 350 \cdot 350 = 60 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 = 60 \text{ л.}$$

Далее необходимо определить мощность, которую должна выдавать печь. Мощность измеряется в Ваттах (Вт) и определяется по эмпирическому правилу: для электрической печи объемом 10–50 литров удельная мощность составляет 100 Вт/л (Ватт на литр объёма), объемом 100–500 литров – 50–70 Вт/л. Возьмём для рассматриваемой печи удельную мощность 100 Вт/л. Таким образом, мощность нагревателя электрической печи должна составлять $P = 100 \cdot 60 = 6000 \text{ Вт} = 6 \text{ кВт}$.

При мощности 5–10 кВт нагреватели изготавливают, обычно, однофазными. При больших мощностях для равномерной загрузки сети нагреватели делают трёхфазными.

Затем нужно найти силу тока, проходящего через нагреватель $I = P / U$, где P – мощность нагревателя, U – напряжение на нагревателе (между его концами), и сопротивление нагревателя $R = U / I$.

Здесь может быть два варианта подключения к питающей электрической сети:

- к бытовой сети однофазного тока, для которой $U = 220 \text{ В}$;
- к промышленной сети трехфазного тока – $U = 220 \text{ В}$ (между нулевым проводом и фазой) или $U = 380 \text{ В}$ (между двумя любыми фазами).

Пусть в первом случае питающее напряжение осуществляется от бытовой сети однофазного тока. Определяется сила тока, протекающая через нагреватель $I = P/U = 6000/220 = 27,3 \text{ А}$.

Затем определяют сопротивление нагревателя печи – $R = U/I = 220/27,3 = 8,06 \text{ Ом}$. Схема подключения такого нагревателя показана на рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Проволочный нагреватель в сети однофазного тока

После определения сопротивления нагревателя при выбранном подключении к электрической сети необходимо подобрать диаметр и длину проволоки.

При определении указанных выше параметров необходимо анализировать удельную поверхностную мощность нагревателя, т. е. мощность, которая выделяется с единицы площади его поверхности. Поверхностная мощность нагревателя зависит от температуры нагреваемого материала и от конструктивного выполнения нагревателей.

Выше определено сопротивление нагревателя. Для печи объёмом 60 литров при однофазном подключении это сопротивление составляет $R = 8,06 \text{ Ом}$. В качестве материала нагревателя используется проволока нихромовая Х20Н80 диаметром 1 мм. Чтобы получить требуемое сопротивление, необходимо определить длину нихромовой проволоки $l = R / \rho = 8,06 / 1,4 = 5,7 \text{ м}$, где ρ – номинальное значение электрического сопротивления 1 м проволоки по ГОСТ 12766.1–90 (Ом/м) [11]. Масса данного отрезка проволоки из нихрома составит $m = l \cdot \mu = 5,7 \cdot 0,007 = 0,0399 \text{ кг} = 40 \text{ г}$, где μ – масса 1 м проволоки. Далее необходимо определить площадь поверхности отрезка проволоки длиной 5,7 м: $S = l \cdot \pi \cdot d = 5,7 \cdot 3,14 \cdot 0,1 = 179 \text{ см}^2$, где l – длина проволоки (см), d – диаметр проволоки (см). Таким образом, с площади 179 см^2 должно выделяться 6 кВт мощности. Решая пропорцию, получают, что с 1 см^2 площади поверхности проволоки выделяется мощность $\beta = P/S = 6000/179 = 33,5 \text{ Вт}$, где β – поверхностная мощность нагревателя.

Однако полученная поверхностная мощность слишком велика, поскольку обеспечит температуру, при которой нагреватель расплавится. Вполне очевидно, что следует выбирать нагреватель с большим диаметром проволоки.

Для каждого материала в зависимости от требуемой температуры нагрева определяют *допустимое значение поверхностной мощности*. Это значение может определяться с помощью специальных таблиц или номограмм.

В данных расчётах используются таблицы.

Для *высокотемпературных печей* (при температуре более 700–800 °С) допустимая поверхностная мощность, Вт/м², равна $\beta_{дон} = \beta_{эф} \cdot \alpha$, где $\beta_{эф}$ – поверхностная мощность нагревателей в зависимости от

температуры тепловоспринимающей среды ($\text{Вт}/\text{м}^2$), α – коэффициент эффективности излучения. $\beta_{\text{эф}}$ выбирают по таблице 2.1, α – по таблице 2.2.

Если печь низкотемпературная (температура менее 200–300 °С), то допустимую поверхностную мощность можно считать равной $(4\text{--}6)\cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Таблица 2.1 – Эффективная удельная поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры тепловоспринимающей среды

Температура тепловоспринимающей поверхности °С	$\beta_{\text{эф}}$, $\text{Вт}/\text{см}^2$ при температуре нагревателя, °С											
	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
100	6,1	7,3	8,7	10,3	12,5	14,15	16,4	19,0	21,8	24,9	28,4	36,3
200	5,9	7,1	8,5	10,1	12,0	14,0	16,25	18,85	21,65	24,75	28,2	36,1
300	5,65	6,8	8,3	9,9	11,7	13,75	16,0	18,6	21,35	24,5	27,9	35,8
400	5,2	6,4	7,8	9,45	11,25	13,3	15,55	18,1	20,9	24,0	27,45	35,4
500	4,5	5,7	7,1	8,8	10,55	12,6	14,85	17,4	20,2	23,3	26,8	34,6
600	3,5	4,7	6,1	7,7	9,5	11,5	13,8	16,4	19,3	22,3	25,7	33,7
700	2	3,2	4,6	6,25	8,05	10,0	12,4	14,9	17,7	20,8	24,3	32,2
800	–	1,2	2,6	4,2	6,05	8,1	10,4	12,9	15,7	18,8	22,3	30,2
850	–	–	1,4	3,0	4,8	6,85	9,1	11,7	14,5	17,6	21,0	29,0
900	–	–	–	1,55	3,4	5,45	7,75	10,3	13	16,2	19,6	27,6
950	–	–	–	–	1,8	3,85	6,15	8,65	11,5	14,5	18,1	26,0
1000	–	–	–	–	–	2,05	4,3	6,85	9,7	12,75	16,25	24,2
1050	–	–	–	–	–	–	2,3	4,8	7,65	10,75	14,25	22,2
1100	–	–	–	–	–	–	–	2,55	5,35	8,5	12,0	19,8
1150	–	–	–	–	–	–	–	–	2,85	5,95	9,4	17,55
1200	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,15	6,55	14,55
1300	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7,95

Таблица 2.2 – Значение коэффициента эффективности излучения

Размещение нагревателей	Коэффициент α
Проволочные спирали, полузакрытые в пазах футеровки	0,16–0,24
Проволочные спирали на полочках в трубках	0,30–0,36
Проволочные зигзагообразные (стержневые) нагреватели	0,60–0,72
Ленточные зигзагообразные нагреватели	0,38–0,44
Ленточные профилированные (ободовые) нагреватели	0,56–0,7

Варианты размещения нагревателей, приведенные в таблице, поясняются на рисунках 2.18.

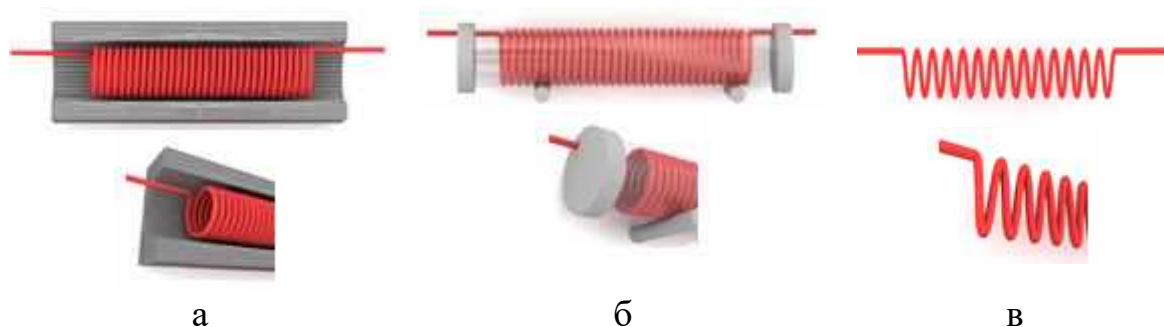


Рисунок 2.18 – Варианты размещения нагревателей:

- а – проволочные спирали, полузакрытые в пазах футеровки;
- б – проволочные спирали на полочках в трубках; в – зигзагообразные (стержневые) нагреватели

Предположим температура нагревателя при нормальной его работе равна 1000 °С и должна обеспечить нагрев заготовки до температуры 700 °С. По таблице 2.1 подбирают $\beta_{эф} = 8,05 \text{ Вт/см}^2$, $\alpha = 0,2$, $\beta_{доп} = \beta_{эф} \cdot \alpha = 8,05 \cdot 0,2 = 1,61 \text{ Вт/см}^2 = 1,61 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$.

После определения допустимой поверхностной мощности нагревателя находят его диаметр (для проволочных нагревателей) и длину, а для ленточных нагревателей – ширину и толщину, а также их длину.

Диаметр проволоки можно определить по следующей формуле:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho_t \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot \beta_{доп}}}, \quad (2.3)$$

где d – диаметр проволоки, (м); P – мощность нагревателя, (Вт); U – напряжение на концах нагревателя, (В); $\beta_{доп}$ – допустимая поверхностная мощность нагревателя, (Вт/м²) ρ_t – удельное сопротивление материала нагревателя при заданной температуре, (Ом·м). $\rho_t = \rho_{20} \cdot k$, где ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление материала нагревателя при 20 °С, (Ом·м), k – поправочный коэффициент для расчета изменения электрического сопротивления в зависимости от температуры [11].

Длину проволоки можно определить по следующей формуле:

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \beta_{доп}^2}}, \quad (2.4)$$

где l – длина проволоки, (м).

Используя приведенные формулы выбирают диаметр и длину проволоки из нихрома Х20Н80 для бытовой сети однофазного тока. Удельное электрическое сопротивление материала нагревателя составляет $\rho_t = \rho_{20} \cdot k = 1,13 \cdot 10^{-6} \cdot 1,025 = 1,15 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Для печи объемом 60 литров печи, подключенной к бытовой сети однофазного тока, из предыдущих этапов расчета известно, что мощность составляет $P = 6000$ Вт, напряжение на концах нагревателя – $U = 220$ В, допустимая поверхностная мощность нагревателя $\beta_{доп} = 1,6 \cdot 10^4$ Вт/м². Тогда расчётное значение диаметра равно

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 6000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 220^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00279 \text{ м} \approx 2,79 \text{ мм.}$$

Полученный размер необходимо округлить до ближайшего большего стандартного значения. Стандартные размеры для проволоки из нихрома и фехрали приведены в таблице 8 Приложения 2 [11]. В данном случае ближайшим большим стандартным размером является диаметр 2,8 мм. Таким образом, диаметр нагревателя $d = 2,8$ мм.

Длина нагревателя

$$l = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot \beta_{доп}^2}} = \sqrt[3]{\frac{6000 \cdot 220^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot (1,6 \cdot 10^4)^2}} \approx 42,81 \approx 43 \text{ м.}$$

Иногда требуется определить массу необходимого количества проволоки для изготовления нагревателя

$$m = l \cdot \mu, \quad (2.5)$$

где m – масса отрезка проволоки, (кг); l – длина проволоки, (м); μ – удельная масса (масса 1 метра проволоки), (кг/м).

В рассматриваемом случае масса нагревателя

$$m = 43 \cdot 0,052 = 2,3 \text{ кг.}$$

Данный расчет дает минимальный диаметр проволоки, при котором она может быть использована в качестве нагревателя при заданных условиях.

С точки зрения экономии материала такой расчет является оптимальным. При этом также может быть использована проволока большего диаметра, но тогда её количество возрастёт.

После выполнения расчётов проводят проверку их правильности.

Результаты расчета могут быть проверены следующим способом. Был получен диаметр проволоки 2,8 мм.

Тогда требуемая длина составит $l = R/(\rho \cdot k) = 8,06/(0,179 \cdot 1,025) = 43$ м, где l – длина проволоки, (м); R – сопротивление нагревателя, (Ом); ρ – номинальное значение электрического сопротивления 1 м проволоки, (Ом/м); k – поправочный коэффициент для расчета

изменения электрического сопротивления в зависимости от температуры.

Данное значение совпадает со значением, полученным в результате расчёта.

Далее необходимо проверить, не превысит ли поверхностная мощность выбранного нагревателя допустимую поверхностную мощность, которая была найдена: $\beta = P/S = 6000/(3,14 \cdot 4300 \cdot 0,28) = 1,59 \text{ Вт/см}^2$. Полученное значение $\beta = 1,59 \text{ Вт/см}^2$ не превышает $\beta_{\text{дон}} = 1,6 \text{ Вт/см}^2$.

Вывод: для нагревателя потребуется 43 метра нихромовой проволоки Х20Н80 диаметром 2,8 мм, что составляет 2,3 кг.

С помощью расчёта можно найти диаметр и длину проволоки, необходимой для изготовления нагревателей печи, подключенной к сети трёхфазного тока. Пусть нагреватели печи подключены по типу «Звезда», при котором нагреватель включается между фазой и нулём (рис. 2.19).

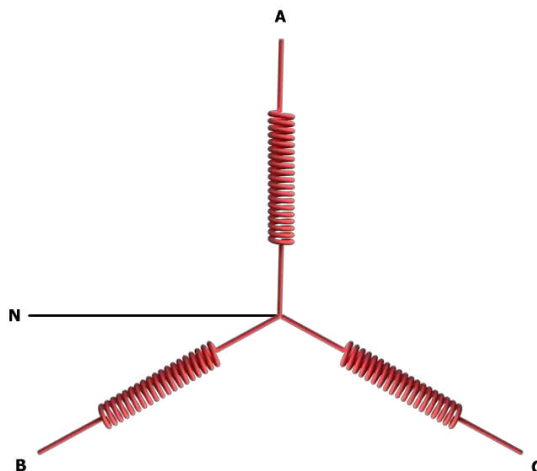


Рисунок 2.19 – Проволочный нагреватель в сети трёхфазного тока с подключением по схеме «Звезда»

Как описано выше, на каждый из трех нагревателей приходится по 2 кВт мощности. Необходимо определить диаметр, длину и массу одного нагревателя.

Для расчёта диаметра проволоки используют формулу (2.3), подставляя значения в которую получают

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 2000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 220^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00134 \text{ м} \approx 1,34 \text{ мм.}$$

Ближайшим бóльшим стандартным размером проволоки для изготовления нагревателя является диаметр 1,4 мм.

Длина одного нагревателя рассчитывается по формуле (2.4), подставляя значение длины в которую получают

$$l = \sqrt[3]{\frac{2000 \cdot 220^2}{4 \cdot \pi \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} (1,6 \cdot 10^4)}} \approx 29,69 \approx 30 \text{ м.}$$

Масса одного нагревателя $m = l \cdot \mu = 30 \cdot 0,013 = 0,39$ кг.

Проверка правильности расчёта состоит в определении потребной длины проволоки диаметром 1,4 мм, которая составит $l = R/(\rho \cdot k) = 24,2/(0,714 \cdot 1,025) = 33$ м. Данное значение практически совпадает со значением, полученным в результате предыдущего расчета. При этом поверхностная мощность составит $\beta = P/S = 2000/(3,14 \cdot 3000 \cdot 0,14) = 1,52$ Вт/см². Полученное значение меньше допустимого.

Для трёх нагревателей, подключенных по схеме «Звезда», потребуется $l = 3 \cdot 30 = 90$ м проволоки, что составляет по массе $m = 3 \cdot 0,39 = 1,2$ кг.

Возможен вариант подключения нагревателей печи в сеть трёхфазного тока по схеме «Треугольник» (рис. 2.20).

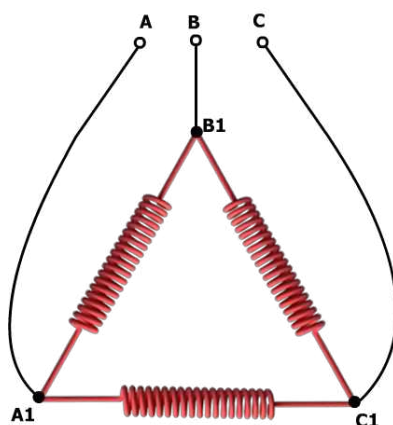


Рисунок 2.20 – Проволочный нагреватель в сети трёхфазного тока с подключением по схеме «Треугольник»

Учитывая значение напряжения на концах нагревателей при такой схеме подключения, определяют диаметр проволоки для изготовления каждого нагревателя

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 2000^2}{10^6 \cdot \pi^2 \cdot 380^2 \cdot 1,6 \cdot 10^4}} \approx 0,00093 \text{ м} \approx 0,93 \text{ мм.}$$

Ближайшим бóльшим стандартным размером является $\varnothing 0,95$ мм, который принимают в качестве диаметра нагревателя ($d = 0,95$ мм). При расчёте длины одного нагревателя получают $l = 43$ м. Масса одного нагревателя $m = l \cdot \mu = 43 \cdot 0,006 = 0,258$ кг.

Сравнение двух рассмотренных выше вариантов подключения нагревателей к сети трёхфазного тока показывает, что при

использовании схемы «Звезда» требуется проволока большего диаметра, чем для схемы подключения «Треугольник», чтобы обеспечить заданную мощность печи 6 кВт. При этом нихромовой проволоки при подключении по схеме «Звезда» потребуется меньшей длины, чем при подключении нагревателей по схеме «Треугольник», однако массы проволоки, наоборот, необходимо больше.

При расчёте ленточного нагревателя определяют толщину a , ширину ленты b (см. рис. 2.21) и длину ленточного нагревателя L (в м) в зависимости от способа его подключения к питающей сети.

При расчёте толщины ленты используют формулу

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_t \cdot 10^6 \cdot P^2}{2 \cdot m \cdot (m + 1) \cdot U^2 \cdot \beta_{\text{доп.}}}}, \quad (2.6)$$

где $m = b/a$ – кратность сторон сечения ленты, в соответствии с сортаментом выпускаемой ленты $m = (5-15)$, где b – ширина ленты, м; наиболее распространена лента с $m = 10$.

Рекомендуемый сортамент проволоки и лент:

– $b \times a \geq 0,01 \times 0,001$ м для нагревательных элементов с температурой t_H до 1000 °С;

– $b \times a \geq 0,02 \times 0,002$ м для нагревательных элементов с температурой t_H свыше 1000 °С.

Остальные обозначения соответствуют приведенным выше в формуле (2.3) для расчёта диаметра проволочного нагревателя.

Длина ленты L_ϕ при подключении нагревателя по схеме «Звезда» определяют по формуле

$$L_\phi = \frac{a \cdot b \cdot R_\phi}{\rho_t}, \quad (2.7)$$

где R_ϕ – расчётное электрическое сопротивление фазы ветви, Ом, которое может быть найдено из зависимости

$$R_\phi = \frac{U_\phi^2}{P_\phi}. \quad (2.8)$$

Затем выполняют проверку, опеределяя поверхностную мощность нагревателя (Вт/м²) и сравнивая её с допустимой

$$\beta = \frac{P_\phi \cdot 10^3}{2 \cdot (a + b) \cdot L_\phi}. \quad (2.9)$$

Если рассчитанное значение окажется меньше допустимого, расчёт выполнен верно.

При эксплуатации нагревателей основной задачей становится размещение нагревателей расчетной длины в ограниченном пространстве печи. Нихромовая и фехрелевая проволока подвергаются навивке в виде спиралей или сгибанию в форме зигзагов, лента чаще сгибается в форме зигзагов, что позволяет вместить большее количество материала (по длине) в рабочую камеру. Наиболее распространенным вариантом изготовления нагревателей является спираль.

Соотношения между шагом спирали и её диаметром и диаметром проволоки выбирают таким образом, чтобы облегчить размещение нагревателей в печи, обеспечить достаточную их жесткость, в максимально возможной степени исключить локальный перегрев витков самой спирали и в то же время не затруднить теплоотдачу от них к изделиям.

Чем больше диаметр спирали и чем меньше её шаг, тем легче разместить в печи нагреватели, но с увеличением диаметра уменьшается прочность спирали, увеличивается склонность её витков лечь друг на друга. С другой стороны, с увеличением частоты намотки увеличивается экранирующее действие обращенной к изделиям части витков на остальные и, следовательно, ухудшается использование её поверхности, а также могут возникнуть местные перегревы.

Практикой установлены рекомендуемые соотношения между диаметром проволоки (d), шагом (t) и диаметром спирали (D) для проволоки диаметром от 3 до 7 мм. Эти соотношения следующие: $t \geq 2d$ и $D = (7-10) \cdot d$ – для нихромовой проволоки и $D = (4-6) \cdot d$ – для менее прочных железохромоалюминиевых сплавов, таких как фехраль и т. п. Для более тонкой проволоки соотношение D и d , а также шаг проволоки t обычно берут бóльшими.

Геометрические размеры элементов электрических нагревателей в виде ленты принимаются в соответствии с приведенными ниже соотношениями (пояснения на рис. 2.21).

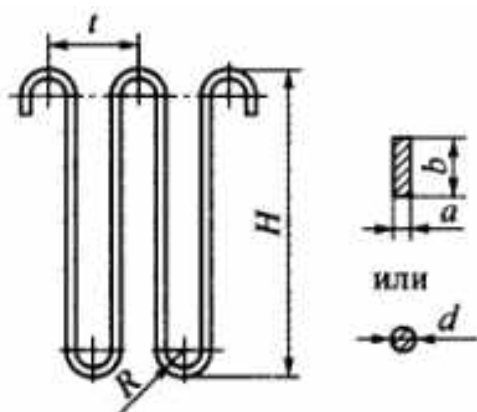


Рисунок 2.21 – Проволочный нагреватель в сети трёхфазного тока с подключением по схеме «Треугольник»

t – шаг спирали (зигзага), м; $t \geq (2-5) b$ – для ленточного зигзага;
 b – ширина ленты, м; R – радиус закругления зигзага, м; $R = (4-5) a$ – для ленточного; a – толщина ленты, м; H – высота зигзага, м

$H = 0,15-0,3$ – для хромалюминиевых сплавов;

$H = 0,2-0,4$ – для нихромов.

Таким образом, расчёт нагревателей не ограничивается выбором их размеров. Необходимо также определить материал, из которого должен быть сделан нагреватель, тип нагревателя (проволочный или ленточный), способ расположения нагревателей и другие особенности. Если нагреватель изготавливается в виде спирали, то необходимо определить количество витков и шаг между ними.

2.5 Способы измерения температуры в печах сопротивления

Для определения температуры используют косвенные методы, основанные на измерении таких физических величин, которые однозначно связаны с температурой и могут быть легко измерены.

Область измерения температуры в зависимости от её величины делится на две:

- термометрия с температурой 500–600 °С;
- пирометрия – для более высоких температур.

В соответствии с этим применяемые приборы называют термометрами и пирометрами.

Для измерения температуры используют:

- дилатометрический и биметаллический термометры;
- термометры сопротивления;
- термоэлектрические термометры и пирометры;
- пирометры излучения.

Принцип действия dilatометрических и биметаллических термометров основан на различии линейного расширения твердых тел, из которых изготовлены чувствительные элементы этих термометров. Если температурный интервал невелик, то зависимость длины твёрдого тела от температуры будет линейной.

В термометрах сопротивления используется зависимость электрического сопротивления чувствительного элемента от температуры. Комплект термометра сопротивления включает чувствительный элемент (датчик) и измерительное устройство, определяющее сопротивление датчика.

Измерительным устройством является разновидность омметра, который градуирован в градусах. Датчик представляет собой проволочный резистор, защищённый от воздействия окружающей среды газонепроницаемым кожухом. Материал для резистора должен обладать следующими свойствами:

- иметь высокий и, по возможности, постоянный температурный коэффициент сопротивления, этим обеспечивается чувствительность и линейность характеристики прибора;
- устойчивость физических и химических свойств в условиях нагрева;
- высокое удельное электрическое сопротивление, что позволяет сократить погрешность измерения, связанную с изменяющимся сопротивлением измерительных проводов.

Перечисленные требования оказываются настолько жёсткими, что им удовлетворяют медь (до 180 °С) и платина (до 650 °С).

В термоэлектрических термометрах или термоэлектрических преобразователях (ТП) используется зависимость величины термоЭДС, возникающей в месте спая двух разнородных металлов, от температуры. Комплект включает в себя чувствительный элемент (термопару), измерительное устройство, реагирующее на напряжение термопары, соединительные провода (рис. 2.22).

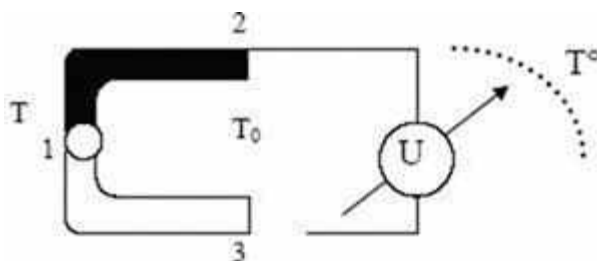


Рисунок 2.22 – Схема термоэлектрического преобразователя

Термопара состоит из двух разнородных термоэлектродов, спаянных в точке 1. Спай называют концом термопары. Он помещается в точку, температуру которой необходимо измерить. Точки 2, 3

называют холодным или свободным концом. Температура в них одинаковая (T°). ЭДС, вырабатываемая термопарой, не зависит от геометрических размеров и формы электродов, а также от материала соединительных проводов. ЭДС зависит только от температуры горячего и холодного конца и материала, из которого сделана термопара.

Зависимость ЭДС термопары от температуры, снятая при температуре свободного конца 0°C , называется градуировочной кривой. Данная кривая нелинейная. Для термопар различных типов градуировочные кривые стандартизированы. Так как в реальных условиях температура рабочего конца редко бывает, равна нулю, поэтому процесс измерения температуры посредством термоэлектрического пирометра требует введения поправки на температуру свободных концов. Для термоэлектродов термопар был разработан ряд материалов. Данные материалы должны отвечать следующим условиям:

- иметь высокую термоЭДС и, по возможности, линейную градуировочную кривую;
- обладать устойчивостью химических и физических свойств в условиях нагрева;
- обладать высокой электропроводностью. Выполнение данного требования позволяет сократить погрешность измерения, вызванную падением напряжения на изменяющемся внутреннем сопротивлении термопары;
- обладать малой инерционностью;
- должны производиться в больших количествах с неизменными физическими свойствами.

Конструкции и материалы для изготовления термопар весьма разнообразны и определяются физическими и химическими свойствами веществ, температуру которых необходимо измерять.

Термопары платиновой группы наиболее дорогие. Их используют при измерении температуры более 1000°C .

В пирометрах излучения используют зависимость величины и спектра излучения от температуры данного тела. Общий вид такого пирометра приведен на рисунке 2.23.

Применяют в тех случаях, когда непосредственный контакт датчика температуры и объекта измерения нежелателен или невозможен. Такие случаи встречаются при очень высокой температуре объекта измерения, при размещении объекта в агрессивной среде или при измерении температуры подвижных объектов.



Рисунок 2.23 – Общий вид пирометра излучения

Энергия, излучаемая данным телом, характеризуется коэффициентом лучеиспускания. Данный коэффициент характеризует оптические свойства тела. Наибольшей излучающей способностью, равной единице, обладает абсолютно чёрное тело.

Реальные объекты имеют различные коэффициенты лучеиспускания. Учесть всё многообразие данных коэффициентов при производстве пирометров не представляется возможным. Поэтому все пирометры излучения градуируются по излучению абсолютно черного тела.

При измерении температуры реального тела пирометры дают погрешность измерения, обусловленную отличием коэффициента лучеиспускания этих тел от единицы. Такая погрешность называется погрешностью на неполноту излучения.

Пирометры имеют три разновидности:

- радиационные;
- яркостные (оптические);
- цветовые.

2.6 Автоматическое регулирование температурного режима

Необходимая стабильность температуры зависит от назначения печи и может составлять 25–50 °С – при нагреве под ковку, штамповку, прокатку, 10–15 °С – при термообработке в общепромышленных печах, 2–3 °С – при термообработке в лабораторных печах, 0,5–1 °С – в прецизионных печах, связанных с производством полупроводниковых и оптических материалов. При использовании современных терморегуляторов зона их нечувствительности может быть сделана весьма малой и доведена до 0,1–0,2 °С. Однако действительные колебания температуры печи могут быть во много раз большими из-за

динамического запаздывания в системе «регулятор – печь». Основным источником этого запаздывания является инерция датчика – термопары, особенно если она снабжена двумя защитными чехлами: керамическим и металлическим. Чем больше это запаздывание, тем больше колебания температуры нагревателя превышают зону нечувствительности регулятора.

В электрических печах сопротивления в подавляющем большинстве случаев применяется простейший вид регулирования температуры – двухпозиционное регулирование, при котором исполнительный элемент системы регулирования – контактор имеет лишь два крайних положения: «Включено» и «Выключено».

Во включённом состоянии температура печи растёт, так как её мощность всегда выбирается с запасом, и соответствующая ей установившаяся температура значительно превосходит её рабочую температуру. В выключенном состоянии температура печи снижается по экспоненциальной кривой.

На рисунке 2.24 изображена простейшая схема двухпозиционного регулирования температуры печи сопротивления с позиционным элементом в виде контактора. Включение и выключение нагревательных элементов производится терморегулятором в зависимости от заданной температуры и температуры печи.

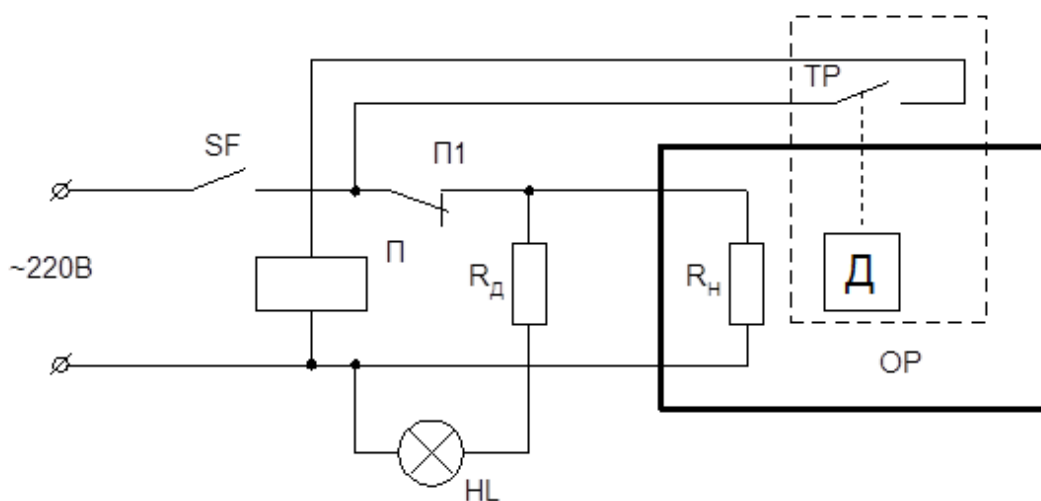


Рисунок 2.24 – Схема двухпозиционного регулирования температуры печей сопротивления:

SF – выключатель; П – пускатель; HL – лампа сигнальная;

R_д – сопротивление добавочное; R_н – нагреватель печи;

TP – терморегулятор; Д – датчик температуры; OP – объект регулирования

Для идеализированного случая, когда в системе «регулятор – печь» отсутствует динамическое запаздывание, работа двухпозиционного регулятора показана на рисунке 2.25, на котором в верхней части дана зависимость температуры печи от времени, а в нижней – соответствующее изменение её мощности.

При разогреве печи вначале её мощность будет постоянной и равной номинальной, поэтому её температура будет расти до точки 1, когда она достигнет значения $t_{зад} + \Delta t_1$, где $|\Delta t_1| + |\Delta t_2|$ – зона нечувствительности регулятора. В этот момент регулятор сработает, контактор отключит печь и её мощность упадёт до нуля.

Вследствие этого температура печи начнёт уменьшаться по кривой 1–2 до тех пор, пока не будет достигнута нижняя граница зоны нечувствительности $t_{зад} - \Delta t_2$. В этот момент произойдет новое включение печи, и её температура вновь начнёт увеличиваться.

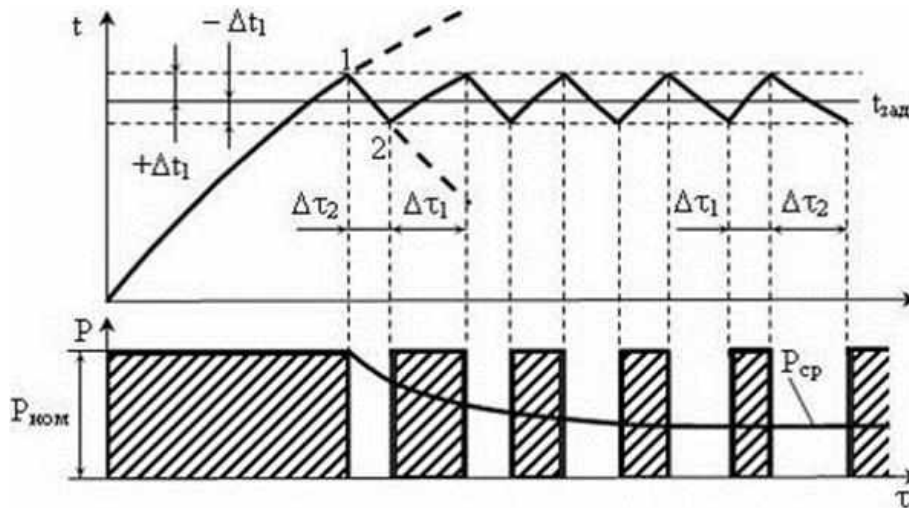


Рисунок 2.25 – Идеализированная схема работы двухпозиционного регулятора температуры

Функциональная схема системы автоматизированного регулирования температуры печи сопротивления представлена на рисунке 2.26.

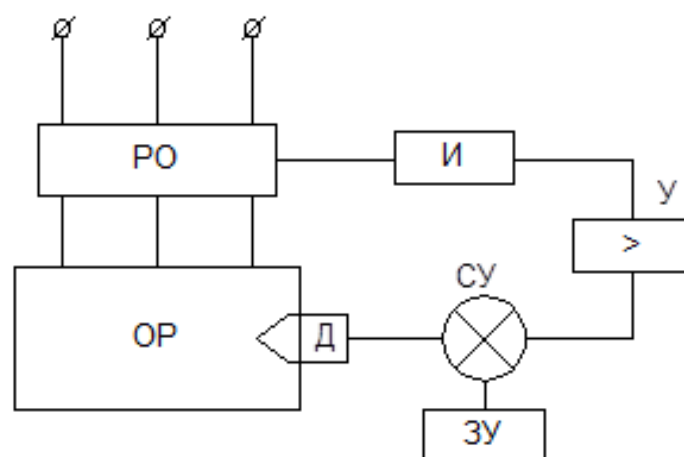


Рисунок 2.26 – Функциональная схема системы автоматического регулирования температуры печей сопротивления: ОР – объект регулирования; Д – датчик; СУ – сравнивающее устройство; ЗУ – задающее устройство; У – усилитель; И – исполнительный элемент; РО – регулирующий орган

Объектом регулирования является печь. Сигналы с датчика и задающего устройства подаются на сравнивающее устройство, сигнал ошибки с которого поступает на усилитель, исполнительный орган и регулирующий орган, изменяя подводимую к печи мощность и, следовательно, температуру таким образом, что сигнал ошибки с выхода сравнивающего устройства уменьшается, стремясь к нулю.

В момент достижения равновесия системы, сигнал ошибки на выходе сравнивающего устройства пренебрежительно мал и сигнал задающего устройства равен сигналу, поступающему с датчика, что соответствует достижению заданной температуры.

Если по каким-то причинам (например, открыли дверцу печи, положили заготовку для термообработки или для нагрева под штамповку) температура понизится (или по каким-либо причинам повысится), с выхода сравнивающего устройства сигнал ошибки будет положительным (отрицательным), обрабатывая этот сигнал, регулирующий орган будет увеличивать (уменьшать) подводимую к печи мощность до тех пор, пока температура на примет прежнего (заданного) значения.

В качестве исполнительного органа используют обычно маломощные электродвигатели, осуществляющие перемещения или переключения регулирующего органа. В позиционных печах сопротивления регулирующим органом является обычно контактор, осуществляющий переключение в силовой цепи печи. У регуляторов непрерывного действия в качестве регулирующего органа используются дроссели насыщения, тиристоры, игнитроны и т. д.

Наибольшее распространение в качестве усилителей получили электронные, полупроводниковые и магнитные усилители.

Для определения температуры используют dilatометрические термометры линейного расширения, манометрические термометры, термометры сопротивления, пирометры, а также различные термопары.

Достаточно широкое распространение получили системы регулирования температуры в электропечах на основе приборов компании ОВЕН, производящей средства автоматизации различного назначения.

В качестве регулирующего устройства в системе управления электропечью используется двухканальный программный ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ151, два канала которого регулируют температуру на нагревательных элементах. Исполнительным устройством служит блок управления симисторами и тиристорами (БУСТ), который обеспечивает точность автоматической регулировки мощности на нагревательных элементах печи методом фазового управления.

Для расширения входов и получения дополнительной возможности измерения температуры в самом изделии или в муфеле печи применяется модуль ввода ОВЕН МВА8. Обмен данными между регуляторами и модулем аналоговое о ввода осуществляется при помощи компьютера, для согласования интерфейсов RS-485/RS-232 используется преобразователь интерфейса ОВЕН АС3-М (рис. 2.27).

Разработанная система позволяет выполнять режим термообработки любой степени сложности. Смена уставок в системе регулирования температуры осуществляется автоматически по разработанной технологом программой. Программы технолога создают на компьютере верхнего уровня и заносят в каждый прибор ТРМ151.

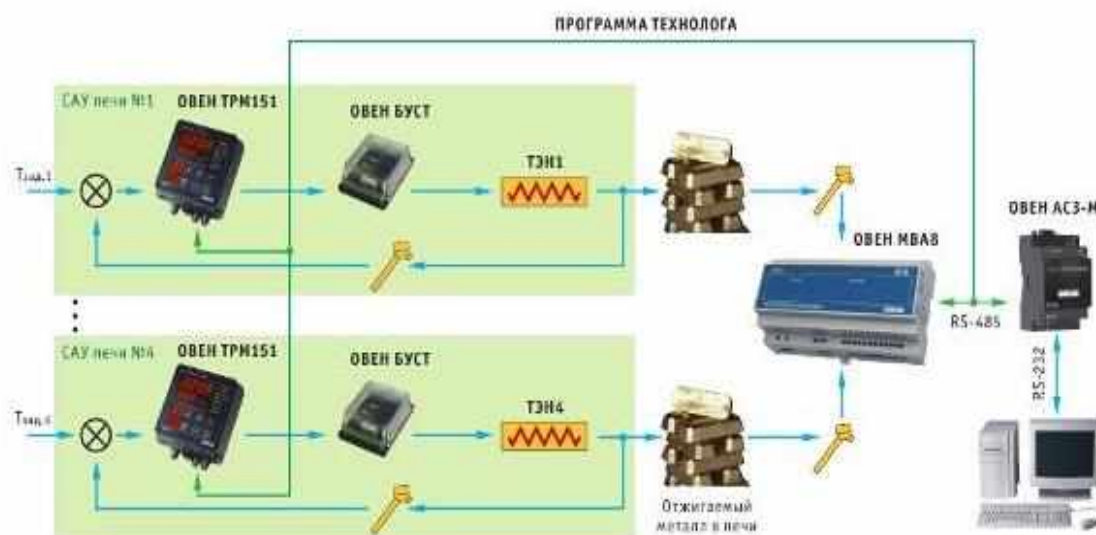


Рисунок 2.27 – Общая структурная схема системы автоматического управления (САУ) температурой для четырёх электропечей

Схема системы регулирования температуры в шахтной печи показана на рисунке 2.28.

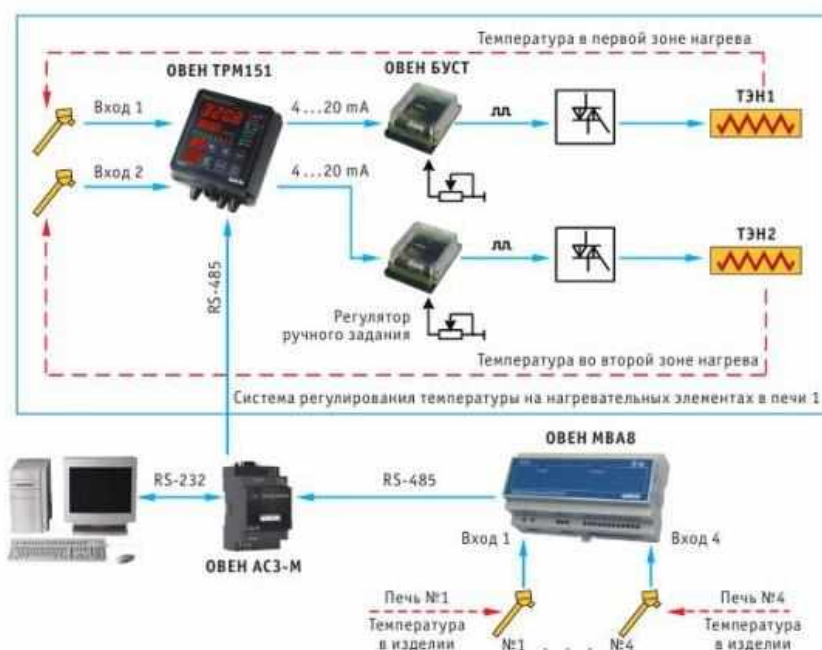


Рисунок 2.28 – Общая структурная схема системы автоматического управления (САУ) температуры для четырех электропечей

Система позволяет задавать скорость изменения температуры (увеличение или уменьшение до заданного значения) в каждой нагревательной зоне по индивидуальному графику, что обеспечивает равномерный нагрев изделия во всех точках. Возможен переход с одной программы на другую по достижении определенного значения любого из параметров температуры или времени. Сбор данных с каждой печи осуществляется и при помощи SCADA-системы OWEN PROCESS MANAGER.

Такая система регулирования температуры может быть реализована в любых электропечах с одной или двумя нагревательными зонами. Для системы требуется:

- программный двухканальный регулятор (например, ОВЕН ТРМ151);
- блок управления симисторами и тиристорами (ОВЕН БУСТ);
- преобразователь интерфейса (ОВЕН АС3-М);
- модуль аналогового ввода (ОВЕН МВА8);
- компьютер;
- датчики температуры, силовые симисторы.

Система управления увеличивает надёжность работы электропечей за счет замены аналоговых регуляторов и релейных исполнительных механизмов на микропроцессорные регулирующие

элементы и бесконтактные силовые ключи (симисторы). Количество внешних соединений и клеммных коробок при этом уменьшается в несколько раз.

Например, один ПИД-регулятор ТРМ151, модуль ввода ОВЕН МВА8 и компьютер заменяют три старых, но весьма дорогих двухпозиционных регулятора-самописца, при этом точность и возможности регулировки значительно увеличиваются за счёт применения ПИД-регуляторов с автоматической подстройкой коэффициентов.

Для более сложных систем с управлением тремя и более нагревательными зонами, а также работой вентиляторов и других исполнительных механизмов, наиболее приемлемой может стать система с управляющим устройством в виде программируемого логического контроллера (например, ОВЕН ПЛК).

Примером такого типа установок может служить самый распространённый в промышленности тип печей – камерная электрическая печь сопротивления, либо колпаковая электропечь. В этих печах, в зависимости от конструкции, могут быть три зоны нагрева. Для оптимального регулирования температуры в них необходимо иметь три независимых контура управления.

Система регулирует температуру в каждой зоне нагрева: в первой, во второй и в третьей зонах, используя, соответственно, первый, второй и третий каналы регулирования. Все контуры подчиняются главному контуру управления температуры в муфеле.

Контур подчинённого регулирования идентичны и состоят из регулятора температуры, программно реализованного в контроллере, исполнительного устройства (ОВЕН БУСТ и симисторов) и объекта управления, т. е. нагревательных элементов. Регулятор главного контура регулирования (рис. 2.29), так же как и регуляторы подчинённых контуров, программно реализован в контроллере ПЛК154.

Данные с каждого канала поступают сначала на контроллер, а затем на компьютер, где обрабатываются и хранятся при помощи SCADA-системы, приспособленной для работы с данным технологическим процессом и выбранным контроллером.

В разработанной системе помимо автоматического регулирования температуры возможно регулирование с помощью резисторов ручного управления. Ручное управление используется во время наладки или при возникновении аварийной ситуации.

Основными управляющими и контролирующими элементами системы управления камерной печи являются:

- программируемый логический контроллер;
- блоки управления симисторами и тиристорами;
- термодары ТХА (К) и силовые симисторы;
- компьютер.

Отличительной особенностью системы с использованием ПЛК является возможность визуализации на компьютере процесса регулирования температуры в выбранной электропечи.

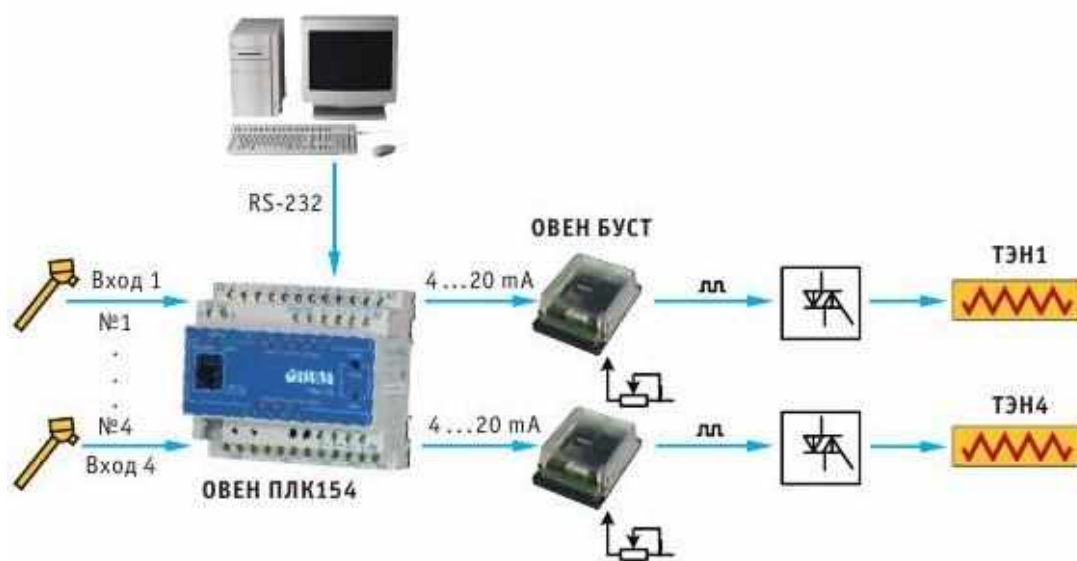


Рисунок 2.29 – Функциональная схема САУ электрической печи

Существует целый ряд приложений, позволяющих выбрать необходимое программное обеспечение для АСУ ТП. Такими возможностями обладает продукт Trace Mode, который совмещает программные стандарты с большинством средств промышленной автоматики от различных производителей, в том числе производства ОВЕН. Поэтому данный продукт подходит в качестве основного системного программного обеспечения при создании АСУ электрической печи.

АСУ реализуется с помощью программного обеспечения Trace Mode, которое имеет широкие функциональные возможности и удобную среду разработки, причём с ней бесплатно поставляются драйверы для выбранного контроллера, например, ОВЕН ПЛК.

Экранные формы контроля и регулирования значительно упрощают эксплуатацию печей и облегчают работу оператора. Их внешний вид и структура может быть выполнена индивидуально под каждый заданный технологический процесс и установку.

Внедрение предложенных выше решений позволяет повысить качество продукции, уменьшить количество брака, снизить расход сырья, сократить поломки и простои оборудования и тем самым увеличить объём выпуска продукции, а так же повысить производительность за счет улучшения условий труда обслуживающего персонала.

Глава 3. УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

3.1 Физические основы индукционного нагрева

Индукционный нагрев – метод бесконтактного нагрева электропроводящих материалов токами высокой частоты и большой величины.

Открытие электромагнитной индукции в 1831 году принадлежит Майклу Фарадею. При движении проводника в поле магнита в нём наводится ЭДС, так же как при движении магнита, силовые линии которого пересекают проводящий контур. Ток в контуре называют индукционным. На законе электромагнитной индукции основаны изобретения множества устройств, в том числе – генераторов и трансформаторов, вырабатывающих и распределяющих электрическую энергию, что является фундаментальной основой всей электротехнической промышленности.

В 1841 году Джеймс Джоуль (и независимо от него Эмиль Ленц) сформулировал количественную оценку теплового действия электрического тока: «Мощность тепла, выделяемого в единице объёма среды при протекании электрического тока, пропорциональна произведению плотности электрического тока на величину напряженности электрического поля» (закон Джоуля – Ленца).

Индукционный нагрев проводников первого и второго рода основан на поглощении ими электромагнитной энергии, возникновении наведенных вихревых токов, нагревающих тело по закону Джоуля – Ленца. Переменное магнитное поле создается индуктором, который по отношению к нагреваемому телу является первичной обмоткой трансформатора. Нагреваемое тело выполняет роль вторичной обмотки трансформатора, содержащей один короткозамкнутый виток. Конструктивно нагревательный индуктор представляет собой один или несколько витков проводника, в котором с помощью мощного генератора переменного тока создаются электрические колебания высокой частоты (от нескольких кГц до 5 МГц). Внутри витков помещают заготовку из электропроводящего материала.

При включении генератора вокруг индуктора возникает интенсивное электромагнитное излучение, которое поглощается заготовкой и разогревает её.

Магнитный поток между обмотками замыкается по воздуху (либо по вакууму, по защитному газу, по жидкости и т. д.).

Схема индукционного нагревателя и пример его использования для реализации закалки детали приведены на рисунке 3.1 а–б.

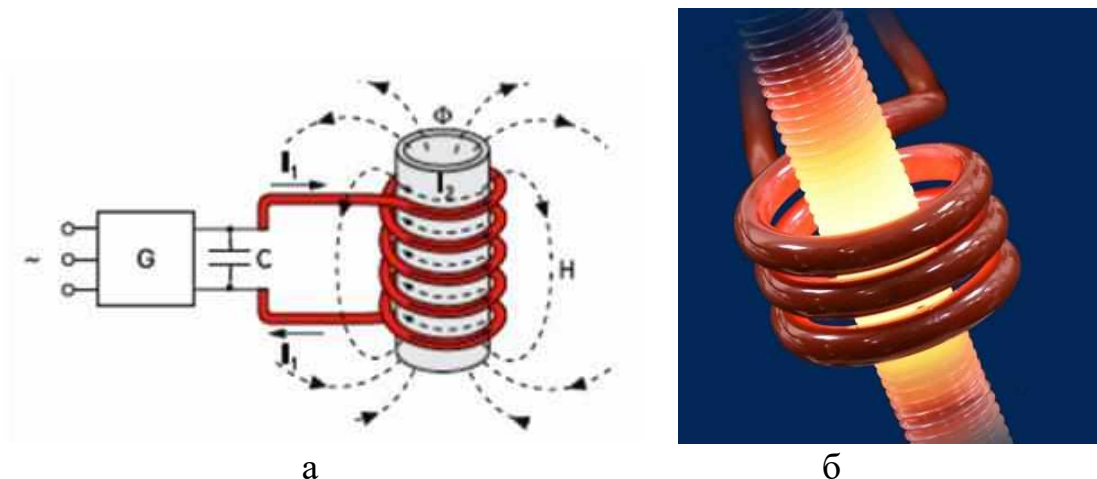


Рисунок 3.1 – Индукционный нагреватель:
а – схема установки; б – пример использования

Если обозначить магнитный поток, создаваемый полем, через Φ , то индуцируемая им электродвижущая сила E будет определяться уравнением

$$E = -w \cdot d\Phi/dt \cdot 10^{-8} \text{ В}, \quad (3.1)$$

где w – число витков катушки.

Эффективное значение электродвижущей силы (ЭДС) при частоте магнитного поля, равной f , и синусоидальной форме его определяется формулой

$$E = 4,44 \cdot w \cdot f \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ В}. \quad (3.2)$$

Если в катушку с числом витков w подать переменный ток и поместить в нее стальной предмет, то он будет пересекаться магнитным потоком и в нём будет наводиться ЭДС, обуславливающую так называемые вихревые токи. Эти токи циркулируют в металле и нагревают его. Количество энергии, поглощаемой нагреваемым телом, пропорционально квадратам частоты, магнитной индукции и объему заготовки, что следует из формулы

$$P_{вихр} = 1/2 \cdot \rho \cdot K^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot V \cdot 10^{-16} \text{ Вт}, \quad (3.3)$$

где ρ – удельное сопротивление стали, Ом·м; f – частота тока, Гц; B – магнитная индукция, Тл; V – объем заготовки, см³; K – коэффициент, зависящий от материала и размеров заготовки.

Благодаря намагничивающему действию самих вихревых токов, текущих по концентрическим окружностям изделия, магнитная индукция к середине цилиндра уменьшается. Максимум магнитной индукции смещается к периферии.

При больших частотах распределение магнитной индукции неравномерно по сечению и уменьшение ее к середине сказывается резче, чем при малых частотах.

Применение токов высокой частоты в значительной степени облегчает возможность концентрации передаваемой энергии в нагреваемый предмет. Определение «высокая частота» следует рассматривать не с точки зрения ее абсолютного значения, а в связи с размерами проводника и нагреваемого тела, с которым в данном конкретном случае связан ток. Так, например, если взять заготовку диаметром 20 мм, то частота машинного генератора 2500 Гц должна считаться для её нагрева низкой, а для диаметра 60 мм эта же частота будет считаться высокой.

Рассматривая нагрев заготовок индукционным способом, необходимо ознакомиться с некоторыми особенностями, связанными с прохождением токов высокой частоты по проводникам. К этим особенностям следует отнести поверхностный эффект, явление близости и кольцевой эффект.

При прохождении переменного тока распределение его по сечению проводника, особенно при большом сечении, будет неодинаково. Эта особенность проявляется тем больше, чем выше частота. Такое явление происходит потому, что внутри проводника возникает переменное магнитное поле, вызывающее, в свою очередь, противоэлектродвижущую силу. В результате ток не распределяется равномерно по поперечному сечению проводника, а как бы вытесняется к поверхности проводника и плотность тока будет разной для разных точек сечения. Чем выше частота, тем меньше будет плотность тока в центре сечения и тем большая часть тока будет протекать по сравнительно тонкому поверхностному слою. Отсюда это явление носит название поверхностного или скин-эффекта. Наличием поверхностного эффекта определяется глубина проникновения тока в металл. Ниже приведена следующая таблица расчетной глубины проникновения Δ .

Таблица 3.1 – Глубина проникновения тока в металл Δ при разной частоте тока (см)

Частота, Гц	Красная медь при 15 °С	Сталь 45 при 15 °С	Сталь 45 при 850 °С
50	1	0,22	9,14
2000	0,15	0,05	1,46
10000	0,07	0,02	0,65
300000	0,012	0,005	0,12

Поверхностный эффект в значительной степени увеличивает сопротивление проводника и вместо общепринятой зависимости сопротивления проводника от сечения, включающей его удельное

сопротивление, длину и сечение проводника, при этом общее сопротивление будет зависеть ещё от периметра и частоты импульсов.

Индукционный нагрев по своей природе является поверхностным и поток энергии на глубине Δ , меньше потока на поверхности в e раз и составляет $0,136 \cdot P_0$, где P_0 – поток энергии на поверхности.

В слое металла толщиной, равной глубине проникновения Δ , поглощается 86,4 % энергии, прошедшей через поверхность тела. Используя соотношения

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0, \quad (3.4)$$

и

$$\omega = 2\pi \cdot f, \quad (3.5)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость нагреваемого металла; μ_0 – магнитная постоянная, равная $0,4 \pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м, глубина проникновения будет составлять

$$\Delta_a = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (3.6)$$

Из приведенной формулы следует, глубина прогрева изделия увеличивается с ростом его удельного сопротивления и уменьшается с ростом частоты тока.

Приведенная формула позволяет определить необходимую частоту тока для нагрева тела на заданную глубину.

В индукционных нагревательных установках имеет место поверхностный эффект, эффект близости и катушечный эффект.

Если взять два проводника, обтекаемых током высокой частоты, и расположить их один около другого, то взаимное влияние полей от токов этих проводников – «явление близости» – будет обуславливать неравномерное распределение плотности тока в проводниках создавая как бы в одной части проводников дополнительное сопротивление. Направленность тока в проводниках играет в этом случае большую роль. На рисунке 3.2 показано примерное распределение плотности тока в двух рядом расположенных проводниках, при одинаковом направлении тока в обоих проводниках (б) и при разных направлениях тока в этих же проводниках (а). Эффект близости проявляется тем сильнее, чем ближе проводники будут находиться друг к другу и чем больше отношение толщины проводника к глубине проникновения.

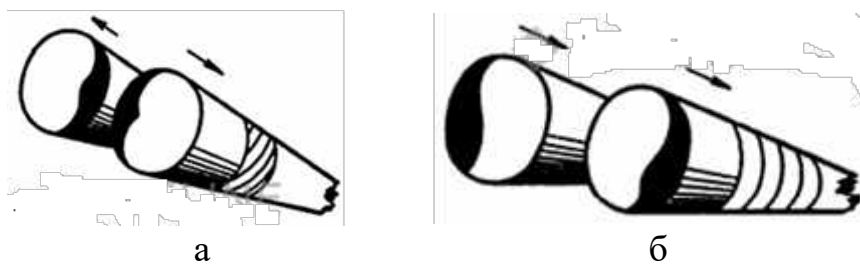


Рисунок 3.2 – Распределение плотности тока в проводниках, расположенных рядом:

а – ток разного направления в обоих проводниках; б – ток одинакового направления в обоих проводниках

Если проводник, обтекаемый токами высокой частоты, свернуть в кольцо или спираль, то плотность тока внутри кольца увеличивается, что также приводит к неравномерности распределения тока по сечению проводника. Свертывание проводника в кольцо увеличивает плотность тока на частях провода, расположенных ближе к центру кольца.

Это явление – кольцевой эффект – представляет не меньший практический интерес, чем явление близости, и поэтому его следует учитывать. В случае соленоидных индукторов для нагрева цилиндрических тел наличие кольцевого эффекта явно видно на приведенном выше рисунке.

3.2 Классификация индукционных установок

Индукционный нагрев обеспечивает следующие преимущества:

- передача электрической энергии непосредственно в нагреваемое тело позволяет осуществить прямой нагрев проводниковых материалов; при этом повышается скорость нагрева по сравнению с установками косвенного действия, в которых изделие нагревается только с поверхности;

- передача электрической энергии непосредственно в нагреваемое тело не требует контактных устройств, что удобно в условиях автоматизированного поточного производства, а также при использовании вакуумных и защитных средств;

- благодаря явлению поверхностного эффекта максимальная мощность выделяется в поверхностном слое нагреваемого изделия, поэтому индукционный нагрев при закалке обеспечивает быстрый нагрев поверхностного слоя изделия, что позволяет получить высокую твердость поверхности детали при относительно вязкой середине. Процесс поверхностной индукционной закалки быстрее и экономичнее других методов поверхностного упрочнения изделия;

– индукционный нагрев в большинстве случаев позволяет повысить производительность и улучшить условия труда;

– использование индукционного нагрева в плавильных печах обеспечивает электродинамические усилия, которые способствуют циркуляции расплава в общем объеме тигля; это ускоряет процесс плавки и позволяет получить металл со стабильными и однородными свойствами.

Индукционный нагрев широко применяется для выполнения:

- плавки металлов;
- термической и химико-термической обработки изделий;
- сквозного нагрева заготовок перед горячей обработкой давлением (при ковке, штамповке, прессовании);
- пайки и наплавки;
- сварки металла.

По назначению индукционные установки разделяют на плавильные печи, миксеры, нагревательные установки.

Индукционные установки можно классифицировать по частоте тока источника питания, по конструктивному исполнению, по режиму работы, по принципу действия.

По частоте тока источника питания индукционные установки делят на установки низкой (или промышленной) частоты (50 Гц), средней частоты (150–10000 Гц), высокой частоты (50–1000 кГц), сверхвысокой частоты (5–5000 МГц).

По конструкции индукционные установки бывают открытые, работающие при атмосферном давлении воздуха, и закрытые, в которых внутри плавильного пространства создаётся разрежение воздуха либо повышенное давление нейтрального газа (азота, аргона, водорода).

По режиму работы бывают индукционные установки периодического и непрерывного действия.

По принципу действия различают каналные и тигельные индукционные печи.

3.3 Конструкции индукционных печей

Печи указанных выше групп (по принципу действия) предназначены для плавки металлов и сплавов (плавильные печи), а также для поддержания постоянных условий при литье (в виде миксеров).

Канальные индукционные печи (с сердечником) используются для плавки металлов (медь, цинк, алюминий) и их сплавов. Схема индукционной печи с открытым каналом приведена на рисунке 3.3. Данная печь представляет собой трансформатор, обычно

промышленной частоты (50 Гц). Вторичной обмоткой трансформатора служит металл, заключённый в кольцевом канале из огнеупора. Основной магнитный поток Φ_0 наводит в металле канала ЭДС, которая создает ток, нагревающий металл. Из рисунка видно, что индукционная печь подобна трансформатору, работающему в режиме короткого замыкания.

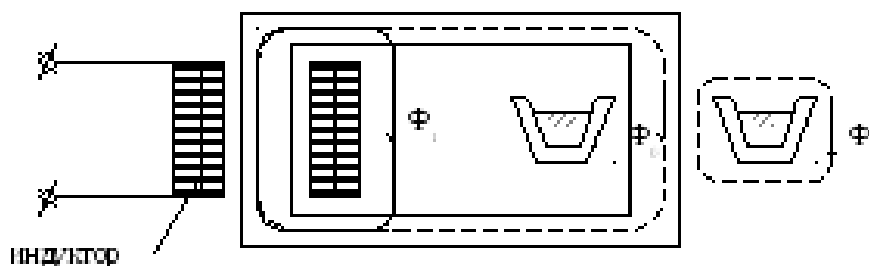


Рисунок 3.3 – Схема индукционной печи с открытым каналом

Особенности печи по сравнению с трансформатором заключается в совмещении вторичной обмотки с нагрузкой, в повышенном рассеянии магнитного потока, обусловленного наличием толстого слоя футеровки между первичной и вторичной обмотками, а также в малой высоте вторичной обмотки.

Наличие большого потока рассеяния (20–25 % основного потока), вызванного необходимостью футеровки печи, обуславливает низкий коэффициент мощности печи $\cos \varphi$.

Естественный коэффициент мощности канальной печи составляет 0,3–0,7. Для улучшения $\cos \varphi$ параллельно индуктору печи присоединяют конденсаторную батарею, реактивная мощность которой должна быть равна реактивной мощности печи. Компенсация естественного коэффициента мощности печи необходима для того, чтобы не нагружать сеть (или понижающий силовой трансформатор) реактивным током, значения которого в несколько раз превосходят активный ток.

На практике используют печи с закрытым каналом (рис. 3.4), имеющие большую производительность.

В представленной печи индуцируется ток и выделяется тепло в самом канале. Садка плавится в результате циркуляции металлов. При этом металл, перегретый в канале, перемещается в шихту, а холодный перемещается из шихты в канал.

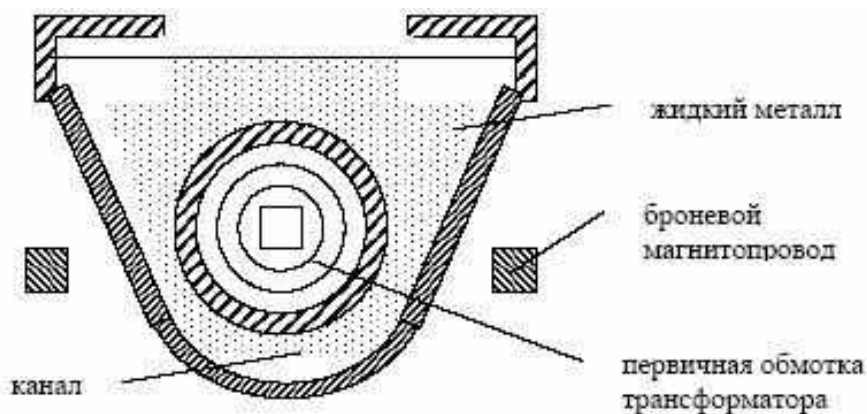


Рисунок 3.4 – Схема индукционной печи с закрытым каналом

Достоинствами такой печи являются:

- простота конструкции;
- малый угар металла;
- меньший удельный расход энергии.

Недостатки:

- необходимо оставлять часть металла в канале для того, чтобы впоследствии запустить печь при последующих плавках, при этом несливаемая часть металла в канале называется болотом;
- сложность перехода к плавке других металлов из-за наличия болота;
- малая стойкость и сложность изготовления подовой футеровки канальной печи, особенно при плавке металлов с высокой температурой плавления;
- низкий $\cos \varphi$ (0,3–0,6), обусловленный значительным рассеянием.

Канальная печь представляет собой футерованную ванну, снабженную одной или несколькими индукционными единицами.

Индукционная единица, заключенная в разъемный металлический кожух, представляет собой совокупность индуктора, магнитопровода и подового камня с плавильными каналами.

Индукционные единицы могут быть однофазными или трехфазными с каналами квадратного, овального или прямоугольного сечения. Иногда есть два параллельных канала на одну фазу. Индукционные единицы часто выполняют объёмными. При выходе из строя одной единицы ее мгновенно заменяют новой, заранее подготовленной, без остановки печи.

Индукторы канальных печей выполняют в виде продольной медной трубки, они имеют водяное охлаждение, канальная часть подового камня охлаждается от вентилятора или от централизованной воздушной системы. Загрузка шихты в печь осуществляется через проём и закрывается футерованной крышкой.

Слив металла в миксер осуществляется через сливной канал путём наклона печи с помощью механического или гидравлического механизма.

Миксер имеет меньшую мощность по сравнению с плавильной печью. Он приспособлен к загрузке жидким металлом через специальные отверстия и желоба и имеет раздаточную коробку для дозирования жидкого металла.

Работа индукционной тигельной печи (без сердечника) основана на поглощении электромагнитной энергии проводящей садки. Садка размещена внутри цилиндрической катушки, называемой индуктором (рис. 3.5).

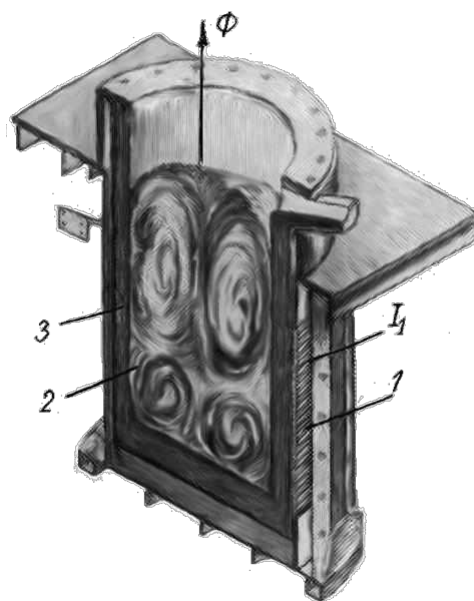


Рисунок 3.5 – Схема устройства индукционной тигельной печи:
1 – индуктор; 2 – металл; 3 – тигель (показаны траектории циркуляции жидкого металла в результате электродинамических явлений)

Промышленные индукционные тигельные печи имеют механизм загрузки-выгрузки и систему водяного охлаждения индуктора.

Тигель печи на время плавки закрывают футерованной крышкой. Иногда печь снабжают внешними магнитопроводами, снижающими активные потери в металлическом кожухе из-за рассеяния. С электрической точки зрения, индукционная тигельная печь представляет собой короткозамкнутый воздушный трансформатор, вторичной обмоткой которого является проводящая садка. Такое выполнение печи имеет определённые технологические преимущества.

Непосредственное выделение тепловой энергии проводящей садки повышает КПД установки, позволяет получать высокие температуры, необходимые для выплавки тугоплавких металлов.

Металл в тигле интенсивно перемешивается благодаря электродинамическому взаимодействию электромагнитного поля индуктора и вихревых токов в жидком металле. Это позволяет получить металл высокого качества.

Имеется возможность полностью изолировать тигель от окружающей среды и проводить плавку под вакуумом или специальной, необходимой по технологии атмосфере (инертные газы).

Эти преимущества в большей степени реализуются при выплавке чугунов. Однако построение печи в виде воздушного трансформатор имеет недостатки:

Эти трансформаторы более эффективны на высоких и повышенных частотах. Это вынуждает во многих случаях питать тигельные печи от источников питания, работающих в диапазоне от 500 до 10000 Гц.

Отсутствие стального сердечника приводит к резкому увеличению магнитного потока рассеяния; число магнитных силовых линий, сцепляемых с металлом в тигле, будет крайне мало. Это обстоятельство требует соответствующего увеличения частоты изменения (во времени) электромагнитного поля. Поэтому для эффективной работы индукционных тигельных печей приходится питать их токами повышенной, а в отдельных случаях и высокой частоты от соответствующих преобразователей тока. Подобные печи имеют очень низкий естественный коэффициент мощности ($\cos \varphi = 0,03-0,10$). Поэтому необходимо применять конденсаторы для компенсации реактивной (индуктивной) мощности.

В настоящее время имеется несколько типов индукционных тигельных печей, разработанных во ВНИИЭТО в виде соответствующих размерных рядов (по емкости) высокой, повышенной и промышленной частоты для плавки стали (тип ИСТ).

Деление индукционного нагрева по частотным диапазонам связано с техническими и технологическими соображениями. Физическая сущность и общие количественные закономерности для всех частот одинаковы и основываются на законах о поглощении проводящей средой энергии электромагнитного поля.

Частота оказывает существенное влияние на интенсивность и характер нагрева. При частоте 50 Гц и напряженности магнитного поля 3000–5000 А/м удельная мощность нагрева не превышает 10 Вт/см², а при высокочастотном (ВЧ) нагреве мощность достигает сотен и тысяч Вт/см². При этом развиваются температуры, достаточные для плавления самых тугоплавких металлов.

Однако, чем выше частота, тем меньше глубина проникновения токов в металл и, следовательно, тоньше нагреваемый слой, и, наоборот. На высоких частотах осуществляют поверхностный нагрев. Снижая частоту и увеличивая тем самым глубину проникновения тока, можно

осуществить глубинный или даже сквозной нагрев, одинаковый по всему сечению тела. Таким образом, выбирая частоту, можно получить необходимый по технологическим условиям характер нагрева и его интенсивность. Возможность нагрева изделий практически на любую толщину – одно из основных преимуществ индукционного нагрева, который широко используется для поверхностной закалки деталей и инструмента.

Поверхностное упрочнение после индукционного нагрева значительно повышает износостойкость изделий по сравнению с тепловой обработкой в печах сопротивления. Индукционный нагрев успешно применяется также для плавки, термической обработки, перед деформацией металлов и в других процессах.

3.4 Индукционные нагреватели (индукторы)

Индукционный нагреватель (индуктор) – это рабочий орган установки индукционного нагрева. Эффективность нагрева тем выше, чем ближе вид испускаемой индуктором электромагнитной волны к форме нагреваемой поверхности. Вид волны (плоская, цилиндрическая и пр.) определяется формой индуктора.

Конструктивное оформление индукторов зависит от формы нагреваемых тел, целей и условий нагрева (рис. 3.6). Простейший индуктор представляет собой изолированный проводник, помещенный внутрь металлической трубы, вытянутый или свернутый в спираль. При пропускании по проводнику тока промышленной частоты в ней наводятся вихревые токи.

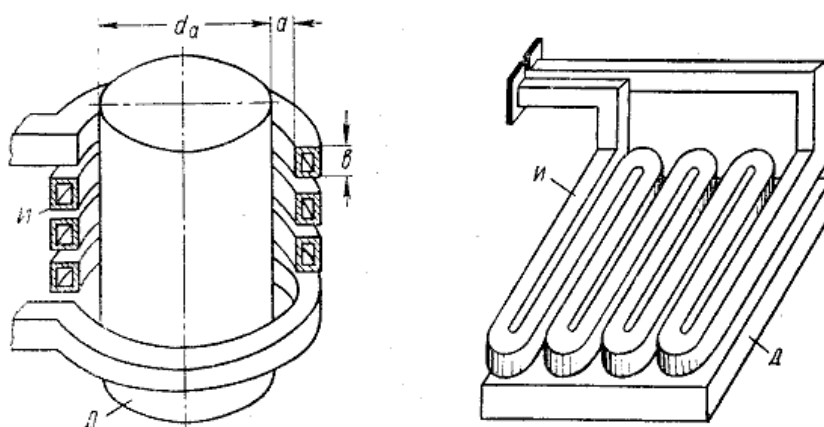


Рисунок 3.6 – Схемы исполнения индукторов:
 а – цилиндрический; б – петлевой;
 И – индуктор; Д – деталь

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

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

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

Нагрев заготовок определенного размера и формы часто можно осуществлять в индукторах различного типа. Так, например, мерные цилиндрические заготовки можно нагревать в круглых цилиндрических индукторах, в индукторах цилиндрических секционированных, т. е. разделенных на отдельные части, между которыми оставлены промежутки для размещения механизмов, транспортирующих заготовки, и индукторах щелевых.

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

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

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

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

В настоящее время разработано и построено большое число нагревателей различного типа.

Ниже приводится схематическое описание конструкции индукторов и механизмов для подачи заготовок для некоторых типов индукционных нагревателей, уже нашедших применение в промышленности.

Применяются два принципиально отличных способа транспортирования заготовок сквозь индуктор:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Методические индукционные нагреватели для мерных заготовок строятся в различных конструктивных модификациях для нагрева заготовок как в продольном, так и поперечном магнитном поле. На рисунке 3.7 приведена схема индукционного нагревателя с механическим толкателем.

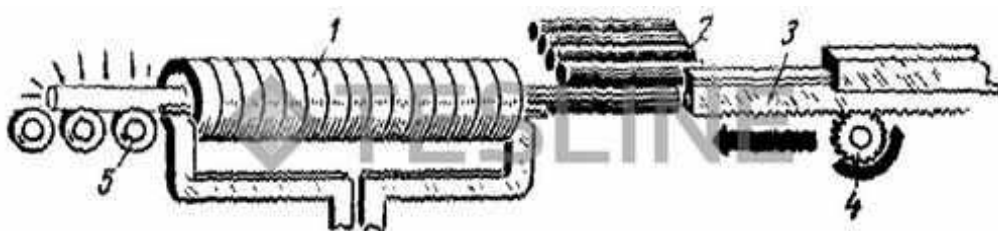


Рисунок 3.7 – Схема методического нагревателя с механическим толкателем:

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

В нагревателе с механическим толкателем заготовки, подлежащие нагреву укладываются на наклонный лоток. Толкатель, приводимый в движение электродвигателем посредством червячного редуктора, поочередно, через определенные интервалы времени, подаёт заготовки в индуктор.

При каждом ходе толкателя заготовки, лежащие в индукторе, сдвигаются на один шаг влево. У левого конца индуктора установлены ролики. Они приводятся во вращение вторым электромотором. Нагретая заготовка, выталкиваемая из индуктора, попадает на ролики, увлекается ими и сбрасывается на транспортер, передающий её для последующей обработки. Работой посредством схемы автоматического управления нагревателя управляет реле времени или фотопирометр.

В нагревателе с непрерывным движением заготовок (рис. 3.8) проталкивание последних осуществляется магнитными роликами, установленными перед индуктором. Каждый ролик состоит из двух дисков, на наружных диаметрах сняты фаски под углом 45° . Между дисками помещен постоянный магнит. Фаски на дисках образуют канавку для заготовок.

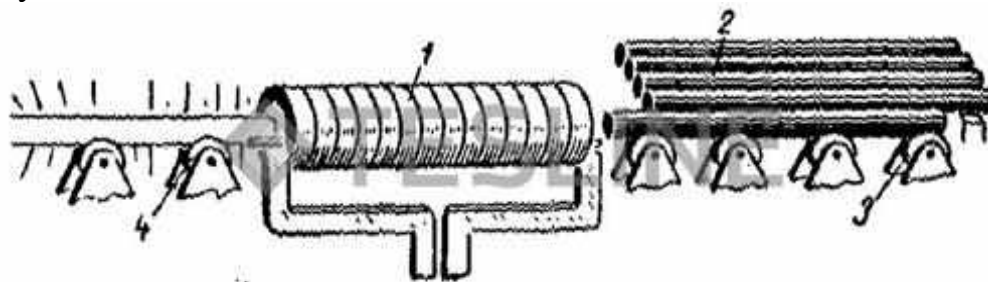


Рисунок 3.8 – Схема методического нагревателя с непрерывным движением заготовок:

1 – индуктор; 2 – заготовки, подлежащий нагреву; 3 – магнитные ролики; 4 – ролики, извлекающие заготовки из индуктора

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

Последние подают заготовки одну за другой непрерывным потоком в индуктор. Темп выдачи нагретых заготовок определяется скоростью их перемещения, т. е. числом оборотов магнитных роликов. Ролики на выходе из индуктора, удаленные от него на длину заготовки, имеют увеличенную окружную скорость. Таким образом, сокращается промежуток времени между моментами выхода заготовок из индуктора и подачи её в ковочный агрегат.

В нагревателе с цилиндрическим индуктором и шагающим механизмом (рис. 3.9) заготовки, подлежащие нагреву посредством вибрационного бункера или какого-либо иного устройства подаются по

одной на три направляющие, проходящие сквозь индуктор. Средняя из этих направляющих подвижная, а две крайние неподвижные. Подвижная направляющая приводится в возвратно-поступательное движение электродвигателем посредством червячного редуктора и кулачкового диска. При своем движении средняя направляющая приподнимает заготовки с крайних и перемещает их небольшими шагами вдоль индуктора.

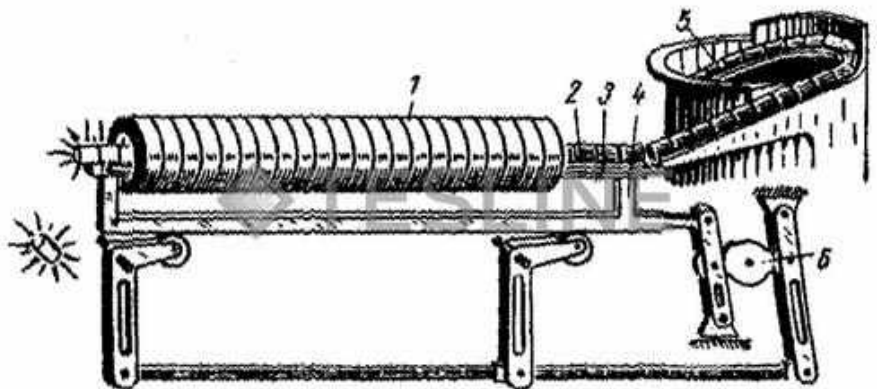


Рисунок 3.9 – Схема методического нагревателя с цилиндрическим индуктором и шагающим механизмом для транспортирования заготовок:

1 – индуктор; 2 – заготовки; 3 – неподвижные направляющие, для поддержания заготовок; 4 – подвижные направляющие для перемещения заготовок; 5 – вибрационный бункер подачи заготовок на направляющие 3 и 4; 6 – кулачковый вал привода направляющих 4

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

В нагревателях большой производительности при нагреве заготовок длиной больше 400 мм используются секционированные индукторы (рис. 3.10). Между секциями индуктора помещаются механизмы, поддерживающие и перемещающие заготовки. Шаг, с которым устанавливаются секции, должен быть несколько меньше половины длины заготовки. При этом каждая заготовка всегда будет опираться по меньшей мере в двух точках на механизмы, располагающиеся между секциями. Длина секции должна быть несколько меньше шага, чтобы в промежутках между секциями было достаточно места для расположения вышеуказанных механизмов.



Рисунок 3.10 – Схема нагревателя с секционированным индуктором и роликовым механизмом для транспортирования заготовок:

- 1 – секции индуктора; 2 – нажимные ролики; 3 – заготовки;
4 – ведущие ролики

В нагревателе карусельного типа с щелевым индуктором (рис. 3.11) заготовки укладываются на вращающийся стол. Поверхность стол футерована жаростойким, непроводящим материалом. Карусельный нагреватель может использоваться для нагрева коротких заготовок в небольшом диапазоне длин и диаметров.

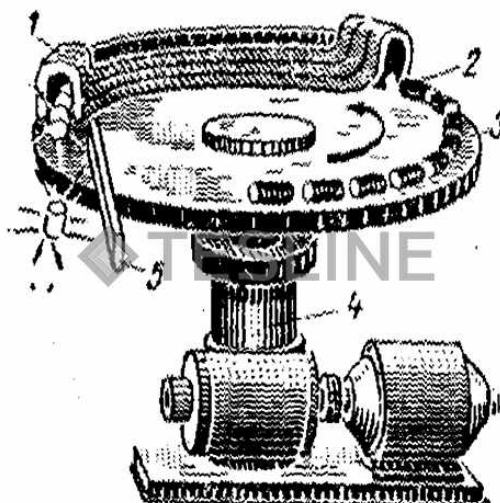


Рисунок 3.11 – Схема карусельного нагревателя с щелевым индуктором:

- 1 – индуктор; 2 – заготовки; 3 – вращающийся стол; 4 – механизм привода стола; 5 – отражатель для сброса заготовки

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

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

2) заготовки располагаются рядом, параллельно друг другу, в одной плоскости, подобно, например, карандашам в коробке. Длина

индуктора определяется суммой диаметров нагреваемых заготовок. Поперечное сечение индуктора имеет прямоугольную форму с закругленными углами. Размеры поперечного сечения определяются диаметром и длиной заготовки. Заготовки перемещаются в индукторе в направлении, перпендикулярном их оси.

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

На рисунке 3.12 показана схема нагревателя с индуктором, в котором заготовки расположены в процессе нагрева перпендикулярно магнитному полю. Индуктор установлен слегка наклонно.



Рисунок 3.12 – Схема нагревателя для нагрева цилиндрических заготовок в поперечном магнитном поле:

- 1 – толкатель подачи заготовки по одной в индуктор из магазина;
2 – магазин с заготовками; 3 – защелка; 4 – индуктор

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В периодических нагревателях заготовки могут поддерживаться как трубчатыми водоохлаждающими направляющими, проходящими внутри индуктора, так и водоохлаждаемыми опорами под концами заготовок.

Ниже приведены схемы нагревателей с подвижными и неподвижными индукторами.

В нагревателе на рисунке 3.13 индуктор установлен на подвижной каретке. Благодаря этому он может смещаться вдоль оси. Заготовка удерживается концами на неподвижных опорах. После окончания нагрева каретка с индуктором смещается в сторону, а заготовка остается на месте.

При смещенном индукторе нагретая заготовка легко может быть снята и заменена новой. Иногда в описанной схеме индуктор

устанавливается неподвижно, а опоры для заготовок закрепляются на подвижной каретке.

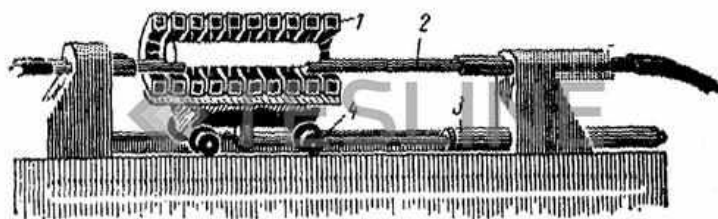


Рисунок 3.13 – Схема периодического нагревателя с подвижным индуктором:

1 – индуктор; 2 – опоры для заготовок, охлаждаемые водой;
3 – цилиндр, перемещающий каретку; 4 – каретка с индуктором

В нагревателе (рис. 3.14) два периодических индуктора, расположены вдоль общей оси. С обеих сторон от индукторов параллельно их оси проходят два приводных рольганга. Первый рольганг служит для подачи холодных заготовок к индукторам. Второй для передачи нагретых заготовок к ковочному агрегату.

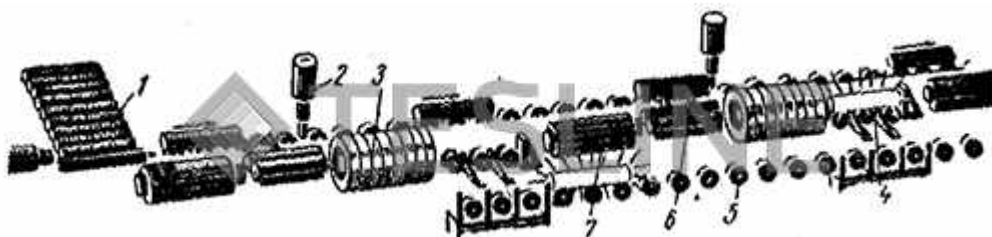


Рисунок 3.14 – Схема нагревателя с двумя периодическими индукторами:

1 – магазин; 2 – убирающийся упор; 3 – рольганг для подачи заготовок на площадки 6; 4 – механизмы выдачи нагретых заготовок;
5 – рольганг для транспортировки нагретых заготовок; 6 – площадка перед индуктором на несколько заготовок; 7 – толкатель

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

Перед каждым индуктором находится наклонная площадка на несколько заготовок и толкатель. С противоположной стороны по оси индуктора установлены ролики для удаления нагретых заготовок и рычажные механизмы для сбрасывания последних на второй продольный рольганг.

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

В карусельном нагревателе (рис. 3.15) шесть индукторов установлены вертикально на вращающемся барабане. Под индукторами на барабане закреплены подъемные столы. Через равные интервалы времени барабан поворачивается на одну шестую часть оборота.

В одном из шести положений, занимаемых каждым индуктором при поворотах барабана, стол под ним опускается. На стол устанавливается заготовка, подлежащая нагреву. Затем он поднимается и заготовки вводятся в индуктор.

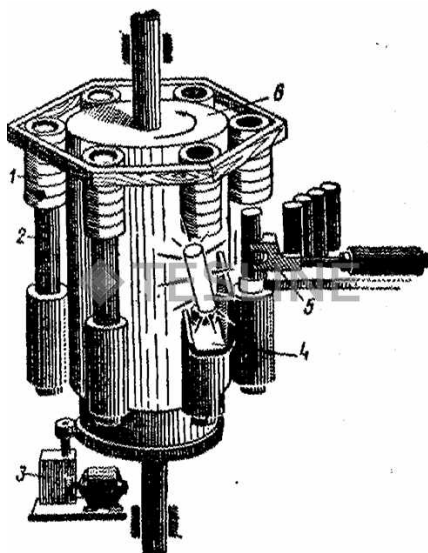


Рисунок 3.15 – Схема карусельного нагревателя с шестью периодическими индукторами:

- 1 – индуктор; 2 – подъемный стол; 3 – механизм привода стола;
4 – приемный жёлоб для нагретых заготовок; 5 – механизм установки заготовок на стол; 6 – поворотный стол с индукторами

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

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

При горизонтальном расположении индукторов они могут быть установлены на тележке (рис. 3.16).

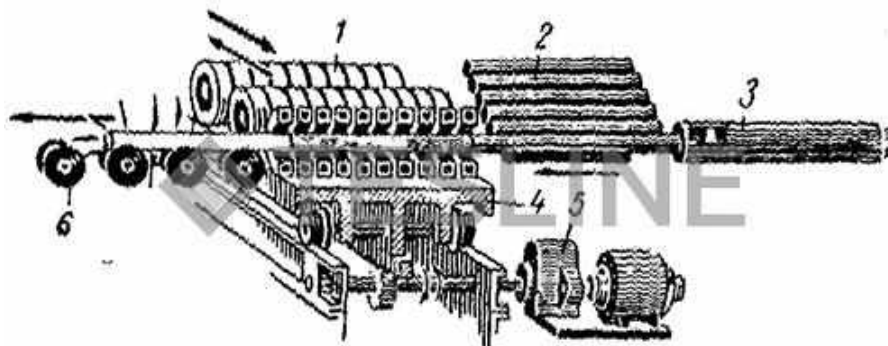


Рисунок 3.16 – Схема нагревателя с периодическими индукторами, установленными на каретке:

1 – индуктор; 2 – магазин с заготовками; 3 – пневматический цилиндр, подающий заготовки в индуктор; 4 – каретка с индукторами; 5 – механизм привода каретки; 6 – ролики для извлечения заготовок из индукторов

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

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

Часто при выполнении операций термической обработки или при необходимости выполнения ковочных операций на части длины заготовки производят нагрев концов заготовок. В этом случае могут быть применены некоторые из вышеописанных нагревателей, обычно используемых для нагрева заготовок по всей длине. Так, для этой цели могут быть использованы нагреватели, показанные на рисунках 3.13, 3.16. Они должны быть настроены таким образом, чтобы в индуктор входила не вся заготовка, а только конец её, подлежащий нагреву. Кроме того, имеются специальные нагреватели, предназначенные для нагрева концов заготовок.

Нагреватели с щелевыми индукторами (рис. 3.17) используются для нагрева концов заготовок во время их перемещения с помощью вращающегося барабана. Заготовки, подлежащие нагреву, находятся на наклонном лотке. Барабан вырезами, расположенными на его периферии, захватывает заготовки по одной с лотка и подает их концами в индуктор.

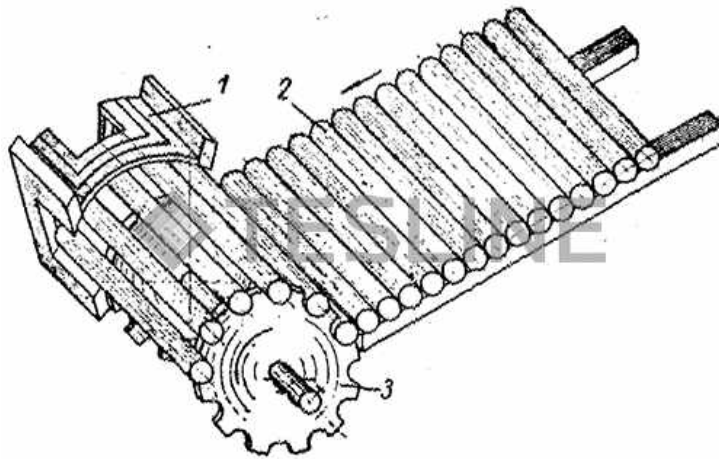


Рисунок 3.17 – Схема нагревателя концов заготовок со щелевым индуктором:

1 – индуктор; 2 – магазин с заготовками; 3 – поворотный барабан

При нагреве концов длиной более 300–500 мм КПД щелевых индукторов сильно падает, так как возрастают потери в перемычках на концах индуктора. При значительной длине нагреваемых концов суммарная длина перемычек может оказаться больше длины прямолинейных участков индуктора. Более рационально длинные концы нагревать в цилиндрических индукторах с прямоугольным, закругленным по концам, поперечным сечением (рис. 3.18).

Заготовки подаются вдоль оси толкателем в верхний конец наклонно установленного индуктора. В процессе нагрева они скатываются вниз по футеровке индуктора. В нижнем конце индуктора они выдаются из него выталкивателем.

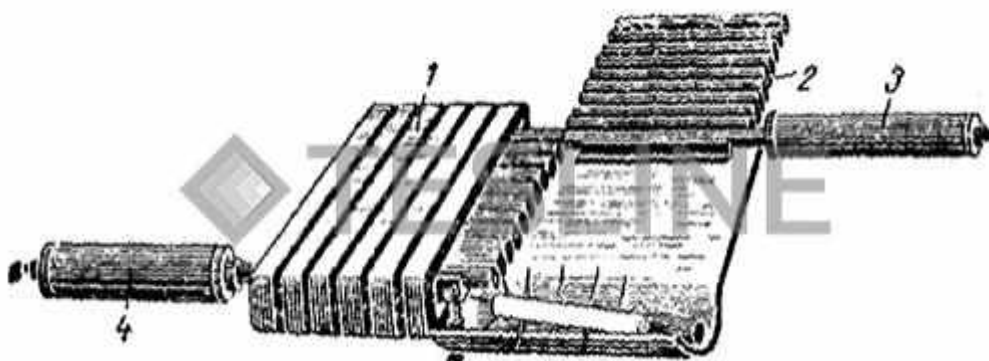


Рисунок 3.18 – Схема нагревателя для нагрева концов заготовок, длина которых в несколько раз больше их диаметра:

1 – индуктор; 2 – магазин с заготовками; 3 – толкатель заготовок в индуктор; 4 – выталкиватель заготовок

Для нагрева длинных концов успешно используются также нагреватели с щелевыми индукторами кольцевого типа. В этих нагревателях (рис. 3.19) индуктор образован двумя concentрическими спиральями из медных трубок, из которых одна находится в другой.

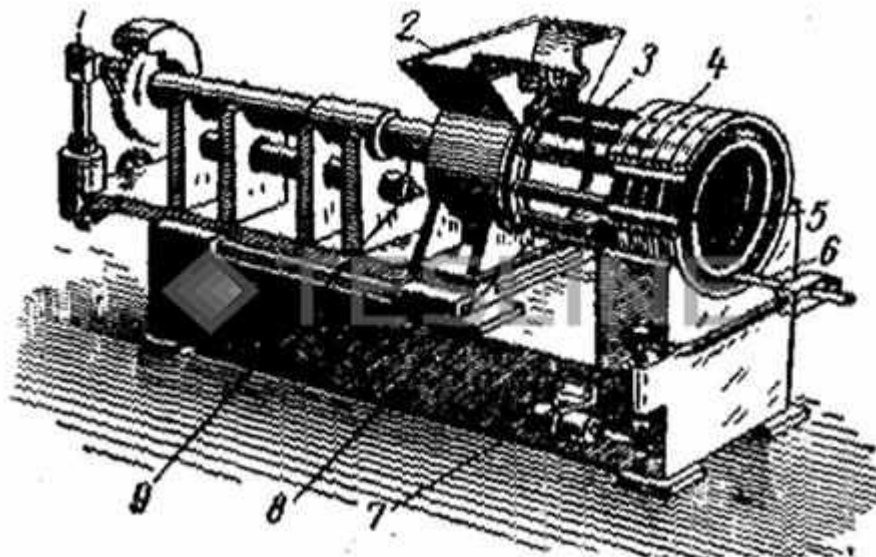


Рисунок 3.19 – Схема нагревателя для концов заготовок со щелевым кольцевым индуктором:

1 – механизм поворота барабана; 2 – магазин заготовок; 3 – барабан с пазами; 4 – индуктор; 5 – нагреваемые заготовки; 6 – извлекатель заготовок; 7 – цилиндр привода извлекателя; 8 – трубки, поддерживающие заготовки; 9 – толкатель

Спирали включаются таким образом, чтобы магнитные потоки, создаваемые токами в каждой из них, суммировались в пространстве между спиральями. Тогда при достаточно большом диаметре спиралей и небольшом зазоре между ними в этом зазоре создается равномерное магнитное поле. Сюда вводятся нагреваемые концы заготовок. Последние удерживаются в отверстиях вращающегося барабана, установленного concentрично индуктору. В некоторых случаях после нагрева конца заготовки и отрезки, полученных из конца поковки, оставшуюся часть необходимо снова нагреть для продолжения процессаковки. Так осуществляется, например, ковка подшипниковых колец, мелких шестерен и других изделий. При этом оставшаяся часть штанги, подлежащая повторному нагреву, на конце длиной 100–200 мм имеет довольно высокую температуру, а остальная её часть – холодная. При подаче такой заготовки в индуктор для повторного нагрева трудно добиться равномерной температуры по длине.

3.5 Индукционные установки сквозного нагрева, расчёт и эксплуатация

Особенностью индукционных установок сквозного нагрева для термообработки под пластическую деформацию (прессование, ковка, гибка и пр.), или для химико-термической обработки (закалка, отжиг и др.) является необходимость обеспечения прогрета загрузки по всему объёму с определенной допустимой неравномерностью при минимально возможном времени нагрева и высоких энергетических показателях.

При сквозном нагреве обычно применяют способ одновременного нагрева всех заготовок, когда индуктор охватывает всю поверхность детали, подлежащей термообработке, причем во всех точках загрузки нагрев происходит одновременно. Температура поверхности и её распределение по глубине зависит от времени нагрева и энергии, передаваемой в деталь за это время.

Малое время нагрева обеспечивают подведением к нагреваемой детали индукционно большой удельной мощности. Частоту тока индуктора при сквозном нагреве выбирают достаточно низкой, чтобы существенная часть заготовки (на глубину более 30 % её радиуса) нагревалась непосредственно током, созданным в поверхностном слое. Внутренний объём заготовки нагревается за счет теплопроводности.

Существует возможность дополнительного сокращения времени нагрева путем соответствующего изменения мощности, подводимой к нагреваемой детали в ходе нагрева. Так, например, на рисунке 3.20 приведены графики изменения температуры поверхности T_0 и центра T_c цилиндрической заготовки при обычном индукционном нагреве стальной заготовки, выполняемом при примерно постоянной во времени удельной мощности и при ускоренном нагреве (графики слева). В последнем случае в начальный период времени к заготовке подводится максимально возможная удельная мощность. Благодаря этому добиваются быстрого нагрева поверхностного слоя до заданной конечной температуры. Образовавшийся значительный перепад температур и соответственно большой тепловой поток между поверхностью и центром заготовки способствует быстрому прогреву внутренних слоев заготовки. В дальнейшем подводимую к заготовке мощность снижают таким образом, чтобы температура поверхности оставалась постоянной и равной заданной конечной величине.

Как следует из рисунка, благодаря управляемому изменению подводимой к заготовке мощности удастся значительно (в 2–3 раза) сократить время нагрева загрузки до конечной температуры при заданном перепаде температуры ΔT между поверхностью и центром заготовки.

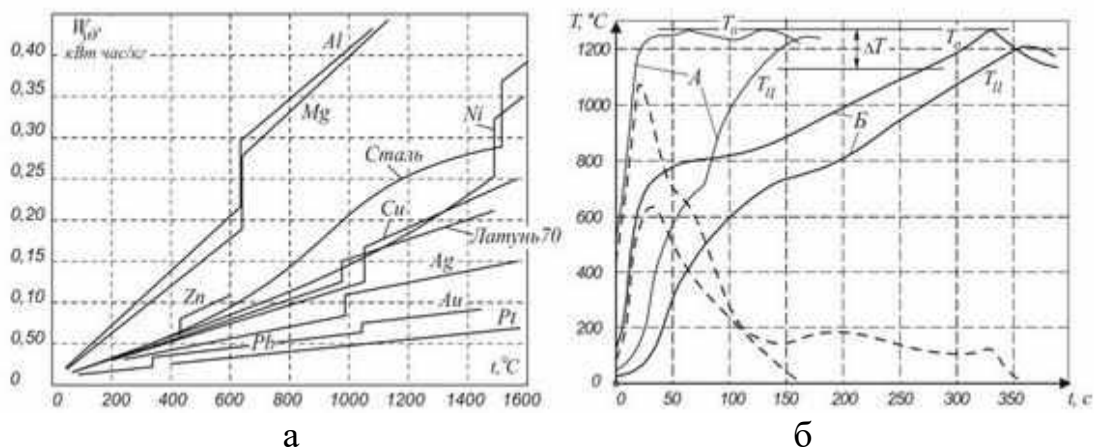


Рисунок 3.20 – Графики изменения мощности и температуры при сквозном нагреве для различных материалов:
 а – мощность, подводимая к заготовке; б – изменение температуры в цилиндрической заготовке

Если мощность, передаваемая в заготовку, превышает потери с её поверхности, и по истечении короткого времени, температура по всему сечению заготовки окажется в заданном интервале, нагрев прекращают, а заготовку выдают для выполнения последующих операций технологического процесса. После отключения установки при остывании заготовки температура поверхностного слоя вскоре становится ниже температуры центра. В отдельных случаях для сокращения времени нагрева и уменьшения удельного расхода энергии используют две различные частоты тока. Двухчастотный нагрев иногда применяют для создания равномерного распределения температуры в заготовке прямоугольного или более сложного поперечного сечения. При индукционном нагреве тепло генерируется непосредственно в нагреваемом объекте и скорость нагрева выше, чем в пламенных печах и печах сопротивления.

Практически общими методами расчёта установок индукционного нагрева для всех моделей являются электромагнитные и тепловые процессы. В некоторых случаях есть необходимость, кроме электромагнитных и тепловых процессов, исследовать электрические процессы в силовой электрической схеме электропитания. Математическую модель, позволяющую учитывать физические процессы в разных областях устройства, при сочетании разнородных подходов к построению отдельных модулей (подсистем) называют комбинированной моделью. Эта модель создается на базе различных расчетных методов – приближенных, аналитических и численных. Выбор метода зависит от конкретных условий и во многом определяет эффективность модели. Комбинированная модель может быть двухкомпонентной и состоять из трех основных частей (модулей):

тепловой; электромагнитной; информационно-логической, – или трехкомпонентной, в которой вместе с блоками двухкомпонентной модели используют модуль электрического расчёта. В тепловом, электромагнитном и электрическом модулях производят расчет соответствующих процессов. Информационно-логический модуль осуществляет ввод и вывод информации, а также взаимодействие остальных частей системы, определяемое конкретной структурой нагревателя и режимом его работы.

При исследовании индукционного нагрева рассматривают установившиеся электромагнитные и электрические и изменяющиеся тепловые процессы, поскольку основную роль играет стационарный режим работы установки. При моделировании нагревателя периодического действия весь процесс нагрева разделяют на временные интервалы. В пределах каждого интервала распределение источников тепла и физические свойства металла считают постоянными. По окончании расчёта в логическом модуле системы анализируется полученное температурное поле. Если конечные перепады температуры по радиусу или длине заготовки превышают заданные, изменяют число витков индуктора и его длину, после чего расчет повторяют, пока заданные перепады не будут достигнуты. Из решения электромагнитной задачи определяют источники тепла. Затем производят тепловой расчет одной из заготовок по мере продвижения её в индукторе, учитывая условия стационарной теплоотдачи с боковых сторон и теплообмена между торцевыми плоскостями заготовок. При передаче распределения источников тепла из модуля расчёта магнитного поля учитывают положение заготовки в заданном интервале времени. По окончании теплового расчета проверяют соответствие распределения температуры по радиусу выходной заготовки, требуемого по условиям технологии. В случае несоответствия предусматривают изменение мощности индуктора или скорости проталкивания слитков. После достижения заданного распределения по радиусу проверяется перепад температуры по длине выходной заготовки. Если необходимо, изменяют длину индуктора или положение заготовок в индукторе и расчёт повторяют. Когда требуемая равномерность нагрева заготовки на выходе достигнута, проверяют соответствие распределения температуры по длине столба заготовок, принятому в начале расчета. При значительных расхождениях распределение корректируется и расчёт повторяют. Предусмотрен расчёт температурного поля при транспортировке заготовки из нагревателя в пресс.

Разнообразие систем индукционного нагрева не позволяет использовать какой-либо один метод электромагнитных расчетов индукционных систем для всех случаев. В большинстве случаев методы расчёта являются приближенными. Все приближенные методы расчеты основаны на раздельном определении сопротивлений отдельных

участков системы с последующим приближенным учетом конечной длины индуктора и детали и их взаимного расположения. Некоторые из этих методов были предложены еще в 20–30-х годах применительно к индукционным плавильным печам. В большинстве случаев индукторы и нагреваемые детали представляют собой системы, имеющие неизменное по длине поперечное сечение той или иной формы. Сопротивления отдельных участков таких систем находят для плоскопараллельного поля (т. е. как для отрезков бесконечно длинной системы) и затем пересчитывают (приводят) к параметрам цепи индуктора. Ими являются: активное r_2 , внутреннее реактивное x_{2M} сопротивление детали и сопротивление x_S , обусловленное потоком в зазоре между индуктором и нагреваемой загрузкой. Активное r_1 и реактивное x_{1M} сопротивления индуктирующего провода рассчитывают отдельно и считают не зависящими от вида нагреваемых изделий. Основное различие многочисленных приближенных методов заключается в способе приведения сопротивлений детали и реактивности рассеяния x_S , обусловленной зазором, к току короткого индуктора. По этому признаку их можно разделить на следующие группы: методы, основанные на аналогии системы индуктор – деталь двум связанным контурам; метод поправочных коэффициентов; методы, использующие схемы замещения.

Электромагнитный расчет индуктивно-связанных контуров является разделом теории цепей, в котором зачастую подразумевается, что вторичный контур в виде тонкостенного соленоида замкнут на определенное сопротивление нагрузки. В результате оказывается, что сопротивление нагруженного индуктора вообще не зависит от внутреннего реактивного сопротивления x_{2M} , что приводит к значительной ошибке при относительно низких частотах. Расчет по методу связанных контуров приводит даже к качественно ошибочным результатам, так как при этом реактивное сопротивление нагруженного индуктора всегда меньше, чем пустого. Иногда наблюдается обратное, особенно при большой магнитной проницаемости и относительно низких частотах, когда заготовка начинает играть роль магнитопровода. Аналогия системы «индуктор–загрузка» и связанных контуров выполняется лишь для загрузки в виде тонкостенных труб или сплошных немагнитных тел при ярко выраженном поверхностном эффекте, обеспечивая близкое совпадение результатов расчета и опытов.

Значительное распространение получил метод поправочных коэффициентов. Метод дает во многих случаях результаты, близкие к опытным, но практически пригоден лишь для загрузки цилиндрической формы, для которой вычислены поправочные коэффициенты или известны характеристики взаимной индуктивности.

Метод, использующий схемы замещения основан на применении схем замещения системы «индуктор – нагрузка», и на аналогии внешнего поля нагруженного индуктора полю пустого индуктора. Интегральные параметры элементов определяют из рассмотрения магнитного сопротивления нагруженного индуктора. Расчёт даёт весьма точные результаты при переходе к бесконечной длине системы и пустому индуктору, и применим для деталей с любыми свойствами (магнитные, немагнитные, двухслойные), а также сложной нагрузки (пучок цилиндров, пластин, разрезанная труба и т. д.). Этот метод достаточно прост, поскольку для приведения сопротивлений необходим только хорошо известный поправочный коэффициент k_1 . Порядок расчета аналогичен для заготовки некругового сечения (овальной, прямоугольной). Расчет интегральных параметров коротких индукторов приближенными методами может привести к значительным ошибкам из-за сильной неоднородности электромагнитного поля в индукторе. Основываясь на вышесказанном, можно заключить, что разработка достоверных методов расчёта ЭМП приемлемой точности в системе «индуктор – нагрузка» является актуальной, поскольку указанная задача не в полной мере решена приближенными методами, отмеченными выше. Расчёт ЭМП в осесимметричных системах с переменным сечением или неоднородным по длине и радиусу свойствами целесообразно выполнять численным методом. Для этого все проводящие тела разбивают на отдельные кольца, являющиеся трубками тока. Наибольший интерес представляет применение этого метода для расчёта систем, имеющих переменные по длине параметры, таких, как нагреватели методического действия, для непрерывно-последовательного нагрева, а в некоторых случаях и для расчёта нагревателей периодического действия.

Перспективным методом исследования индукционных нагревателей является непосредственное численное решение дифференциальных уравнений с учётом конечной длины индуктора. Сравнительно легко это решение получают, если постоянное значение одной из координат описывает границу раздела сред. Расчет входных параметров индуктора производят через ЭДС, наведенную в витках индуктора полем всех токов в системе, то есть методом наведенных ЭДС. Решение дифференциального уравнения двухмерного электромагнитного поля получается в виде рядов или интегралов с бесконечными пределами. При этом вычисление суммы ряда или интеграла в общем виде, обычно, не представляется возможным. Однако применение ЭВМ позволяет составить необходимые таблицы и графики и сделать указанный метод пригодным для практических расчетов. Анализ электромагнитного поля становятся эффективными при реализации численных методов. Например, применение метода дискретизации свойств сред расчетная область, состоящая из кусочно-

неоднородных сред заменяется дискретным аналогом, в котором электрические и магнитные свойства сред, а также источники электромагнитного поля сосредоточены в бесконечно тонких слоях. Пространство между слоями заполнено средой относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости которой равны нулю. На основе граничных условий, полученных при наличии на границе раздела сред, слоя с физическими свойствами, строится итерационный процесс для определения напряженностей электрического и магнитного полей.

Для улучшения качества нагрева и повышения энергетических показателей индукционной установки решающим является выбор приемлемого режима работы нагревателя. Режим выбирают на основе анализа возможных температурно-временных характеристиках процесса нагрева. Указанные характеристики получают по результатам теплового расчета. При таких условиях, повышаются требования к точности расчета и проектирования нагревательных установок. Тепловой расчет должен учитывать ряд факторов, существенно влияющих на температурное поле в загрузке: изменение интенсивности магнитного поля по длине загрузки, наличие тепловых потерь с поверхности заготовки; зависимость теплофизических свойств материала загрузки от температуры; изменение мощности в процессе нагрева, возможность регулирования мощности при управлении скоростью нагрева и другие.

Методы расчета процесса индукционного нагрева основаны на решении дифференциальных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и теплового полей соответственно. Распределение температуры во времени описывается уравнением Фурье в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\alpha}{\lambda} \omega, \quad (3.7)$$

где T – температура в точке пространства с координатами r, j, z , достигшая значения за время t , соответственно – °С и с; α – температуропроводность материала в точке пространства с координатами ρ, φ, z , м²/с; λ – теплопроводность, Вт/(м·°С); $\omega = f(\rho, \varphi, z)$ – функция распределения плотности внутренних источников энергии в материале, Вт/м³.

Плотность внутренних источников тепла представляет собой удельную электромагнитную энергию, выделяющуюся в единицу времени в единице объема. В силу наличия поверхностного эффекта распределение внутренних источников резко неоднородное и зависит от электрофизических свойств материала заготовки, которые изменяются в процессе нагрева.

Инженерные методы расчета процесса нагрева основаны на аналитическом решении уравнения (3.7). При этом весь процесс нагрева разделен на интервалы, в каждом из которых физические свойства материала принимают неизменными. Считается, что точность аналитического решения определяется числом взятых интервалов линейности. Однако, на практике, при расчете нагрева ферромагнитной загрузки принимают один интервал линейности, а ферромагнитной загрузки – три: «холодный» режим; промежуточный режим, когда материал теряет свои магнитные свойства; «горячий» режим. Поскольку длина заготовки обычно всегда в несколько раз превышает её диаметр, считают, что температурное поле в заготовке одномерное и совпадает с полем цилиндра бесконечной длины. Существенным допущением при аналитическом решении является отсутствие теплоотдачи с поверхности загрузки, то есть на поверхности тепловой поток равен нулю.

Для интегрирования нелинейного уравнения теплопроводности различные авторы используют различные методы математической физики. Среди методов наиболее эффективны интегральные преобразования Лапласа, Фурье и Ханкеля, а также метод интегрирования по распределению источников тепла, основанный на применении функции Грина. Решения уравнения теплопроводности для безразмерных чисел подобия сведены в таблицы и широко используются для определения времени нагрева и необходимой полезной удельной мощности. Однако изучение опыта применения различных методов расчёта показывает, что инженерные методы позволяют получить приемлемую точность расчёта лишь для узкого класса устройств индукционного нагрева и для частных схем включения установок, например, для низкотемпературного нагрева ферромагнитной заготовки в индукторе периодического действия. Более точное решение нелинейного уравнения Фурье для широкого класса устройств получают численными методами. Весьма широкое распространение получило решение уравнений Максвелла и Фурье с помощью метода конечных разностей. Оно основано на замене дифференциальных уравнений разностными соотношениями. Учитывая высокую эффективность указанного метода в совместном анализе электромагнитных и тепловых процессов, можно применить его в комбинированной математической модели.

В ряде случаев следует использовать методы анализа электрических процессов в схемах силового питания установок индукционного нагрева. Для исследования электрических процессов в схемах индукционных установок используют известные, хорошо автоматизированные методы, наиболее эффективными из которых следует считать топологический анализ при помощи сигнальных графов и узловый анализ. При этом наилучшие результаты даёт метод

расширенных узловых уравнений (РУУ), в котором классическая система узловых уравнений расширена за счет компонентных уравнений ветвей схемы. Именно последний метод является предпочтительным, поскольку, несмотря на большую размерность систем уравнений, свободен от ограничений на типы элементов при формировании математических моделей схем. Он пригоден для анализа установившихся и переходных режимов электрических схем. Кроме того, метод РУУ относительно легко автоматизируется, а его дополнение вычислительными алгоритмами анализа нелинейных цепей, например, алгоритмом последовательных приближений или алгоритмом метода Ньютона – Рафсона, позволяет запрограммировать задачу и получить инструмент машинного моделирования режимов практически любых электрических схем.

Особенностью построения алгоритма расчёта схем замещения электротехнологических установок в переходном режиме с использованием специализированного программного обеспечения следует считать применение в анализе динамических режимов реактивностей дискретных резистивных схем замещения. Использование дискретных моделей индуктивностей и емкостей позволяет реализовать преимущества узлового анализа. Применение в качестве основного расчётного инструмента модифицированного метода узловых потенциалов приводит к формированию больших, слабо заполненных систем алгебраических уравнений. Для эффективного управления вычислительными ресурсами в таком случае прибегают к алгоритмам редукции разреженных матриц.

Повышения эффективности расчёта режимов схем добиваются при введении в программное обеспечение алгоритмов машинного формирования уравнений переменных состояния (УПС). Автоматизация этапов построения и решения уравнений метода переменных состояния позволяет расширить возможности анализа динамических режимов схем в фазовой области. Особенно существенно проявляются достоинства указанного метода при исследовании режимов цепей с нелинейными реактивностями. Это актуально, поскольку изменение индуктивности электротехнологической установки даже в небольшом диапазоне ($\pm 15\%$) может привести к неверным результатам. Для решения уравнений состояния запрограммирован алгоритм метода численного интегрирования УПС Адамса – Маултона, часто называемого неявным методом Эйлера. Для автоматического управления шагом численного интегрирования и обеспечения устойчивости в соответствии с рекомендациями предпочтение отдано неявным методам полиномиальной аппроксимации. Использование ПО анализа цепей, построенного на основе перечисленных методов и алгоритмов, позволяет эффективно рассчитать установившийся и переходный режимы индукционной установки по её схеме замещения.

На этапах решения электромагнитной и тепловой задач уточняются интегральные параметры элементов схемы, а также их характерные зависимости во времени.

Сложность решения уравнений и систем уравнений приводят к необходимости широкого использования компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения. Коммерческие программы анализа и моделирования полей получили широкое распространение. Среди них – ELCUT, ELTA, UNIVERSAL 2D, ANSYS и др. В основе всех продуктов лежат эффективные вычислительные алгоритмы и сверхмощный математический аппарат. Однако, сравнительный анализ возможностей применения перечисленного программного обеспечения к решению задачи анализа и моделирования режимов индукционных установок сквозного нагрева алюминиевых заготовок в продольном магнитном поле промышленной частоты показывает, что в каждой из систем удастся решить локальные исследовательские задачи. Определенные проблемы в применении коммерческих программ возникают не только на этапе «извлечения» результатов проведенного анализа, в приемлемых для дальнейшего использования форматах, но уже на этапах собственно постановки задачи. Это относится к построению моделей многослойных обмоточных структур, к особенностям корректного описания расчетных областей с магнитопроводом (даже при двумерной постановке). Значительные трудности возникают при построении моделей, учитывающих ослабление поля на стыке обмоток разных фаз.

При количественном определении интегральных резистивных и реактивных параметров схемы замещения установок индукционного нагрева в перечисленных программах возникают расхождения, достигающие значений 50–100 %. Особые затруднения вызывает специфическое условие взаимодействия ПО анализа полей с программами схемотехнического моделирования при построении относительно сложных схем силовых цепей УИН, учитывающих резонансные режимы и перенос мощности между фазами индукционной установки, а также перенос мощности в пределах секции одной фазы. Еще более громоздкой оказывается математическая модель созданная с применением для анализа уравнений цепей математического программного обеспечения MathCAD, MathLAB, Mathematica и др. Если для анализа полевых задач применение подобно программного обеспечения вполне оправдано, то при переходе в область анализа схемотехники установок индукционного нагрева, вследствие большого числа схемных решений и многообразия схемных моделей, формирование и решение уравнений локальных схем в таких программных системах теряет практический смысл.

Для исследования режимов схем индукционных установок возможно применение коммерческого программного обеспечения

схемотехнического моделирования, например, распространенных программных продуктов как бесплатных, так и поставляемых за определённую оплату: TinyCAD, sPlan, TurboCAD, MicroCAP, Electronic Work Bench и других для графических операционных систем. Следует заметить, что достоинства и привлекательность этих программ заключены не столько в эффективном математическом аппарате, сколько в наличии развитого интерфейса и библиотек моделей, пригодных для исследования разнообразных типовых устройств. В таких программах реализованы известные алгоритмы топологического анализа, методы уплотнения разреженных матриц, а также численные методы анализа нелинейностей и численный анализ во временной области. Необходимо заметить, что построение корректных схемных моделей сложных устройств для их включения в библиотеки моделей коммерческих программ и последующего использования, является здесь самым существенным ограничением.

3.6 Пример расчёта основных параметров индукционной установки сквозного нагрева

Основной задачей расчета электромагнитной системы для индукционного нагрева является определение входных параметров нагруженного индуктора: активного и реактивного сопротивлений, КПД, коэффициента мощности, тока, напряжения и числа витков по заданным геометрическим размерам (рис. 3.21), частоте тока, мощности и электрическим свойствам материала индуктора и детали.

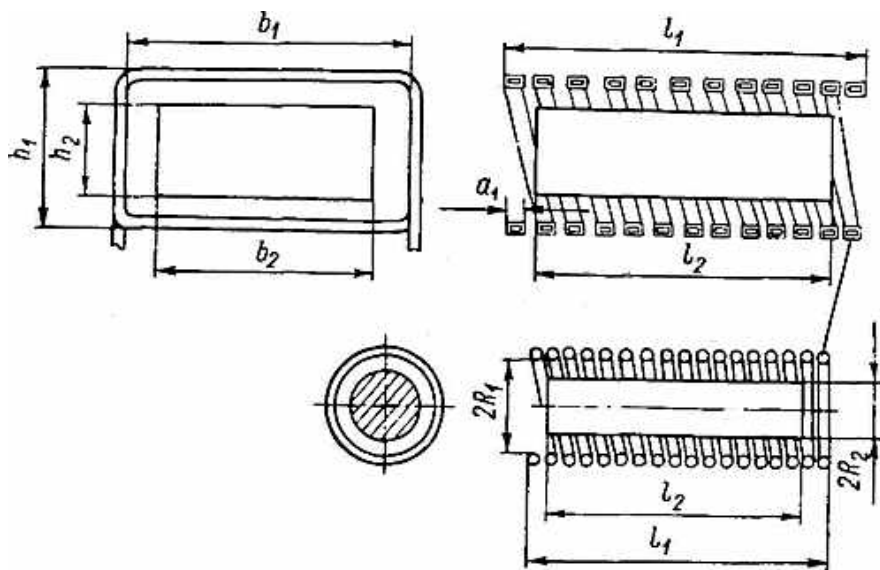


Рисунок 3.21 – Геометрические характеристики индуктора

Поскольку индуктор и деталь образуют систему с распределёнными параметрами, понятия сопротивлений не являются однозначно определенными, а обязательно относятся к схеме замещения, представляющей собой электрическую цепь, которой заменяется нагруженный индуктор. Каждое сопротивление характеризует активную или реактивную мощность в том или ином объеме реальной системы. В расчетах используется обычно два вида сопротивлений. Если разделить мощность в детали (P_a или P_p) на $(H_0l)^2$, получают сопротивления детали (r_2 и x_{2m}), приведенные к намагничивающему току на её поверхности ($I_n = H_0l$). Эти сопротивления иногда неточно называют собственными. Если вместо I_n взять ток индуктора I_u , получают приведенные к индуктору (или вносимые) сопротивления r_2' и x_{2m}' . Для активного сопротивления детали получают

$$r_2' = \frac{P_a}{I_u^2} = \frac{P_a}{(H_0l)^2} \left(\frac{H_0l}{I_n} \right)^2 = r_2 \left(\frac{H_0l}{I_n} \right)^2 = r_2 C. \quad (3.8)$$

В результате расчета нужно найти вносимые сопротивления r_2' и x_{2m}' . Сопротивления r_2 и x_{2m} определяют по формулам для активной и реактивной мощности детали P_a и P_p .

Величина C называется коэффициентом приведения параметров и характеризует длину системы. Коэффициент приведения всегда меньше единицы и лишь при большой длине системы ($l_1 \gg 2R_1$ и $l_1 = l_2$) стремится к ней.

Приведенные рассуждения справедливы лишь при условии, что магнитное поле на поверхности детали однородно ($H_0 = const$). Это допущение принимается при всех приближенных расчетах. Лишь в последнее время появились расчеты по методу наведенных э. д. с., в которых неоднородность поля учитывается заранее. Эти расчеты дают точные результаты, однако они разработаны только для простых индукционных систем.

Во всех приближенных методах сначала определяют величины r и x_{2m} , которые затем пересчитываются в r_2' и x_{2m}' , т. е. приводятся к току индуктора. Существующие методы отличаются только способами приведения сопротивлений детали. Из них наиболее распространены три метода – метод связанных контуров, поправочных коэффициентов и метод общего потока. При любом способе расчета предварительно определяют параметры пустого индуктора – r_1 и x_1 .

Сопротивления пустого индуктора если специально не оговорено, то принимается, что индуктор изготовлен в виде однослойной катушки из медной трубки. Для индукторов следует использовать только электротехническую медь марок М0 или М1, так как наличие нежелательных добавок, например, фосфора, резко увеличивает её

удельное сопротивление. При рабочей температуре (20–50) °С удельное сопротивление меди М1 можно считать равным $\rho = 0,0172 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Трубка индуктора обычно профилируется в виде прямоугольника. Принято считать, что в наружных индукторах основная часть тока протекает по стенке трубки, обращённой в сторону детали.

Тогда для индуктора длиной l_1 из w витков трубки с толщиной стенки τ_1 (см) активное сопротивление равно

$$r_1 = \frac{\rho_1 \Pi_3 w^2}{\Delta_1 l_1} k_{r_1}, \quad (3.9)$$

где Δ_1 – глубина проникновения тока в медь; Π_3 – эквивалентный периметр окна индуктора: для цилиндрического индуктора с внутренним радиусом R_1 – $\Pi_3 = 2 \pi R_1$, для прямоугольного индуктора с окном $h_1 \times b_1$ – $\Pi_3 = 2 (h_1 + b_1 + 2\Delta_1)$.

Коэффициент увеличения сопротивления k_{r_1} учитывает толщину стенки трубки и определяется по графику, приведенному на рисунке 3.22.

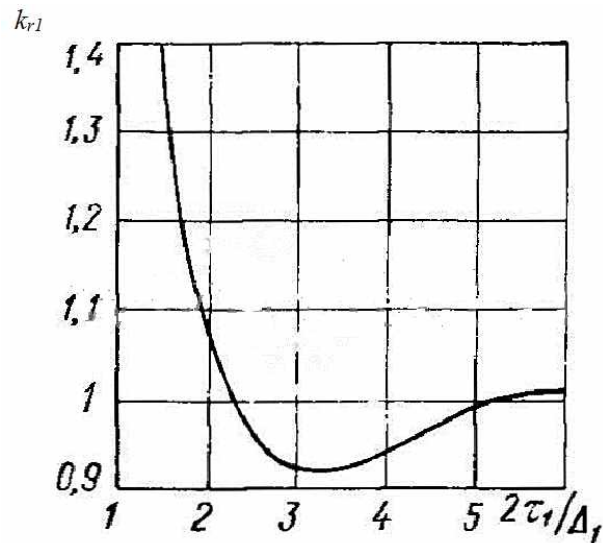


Рисунок 3.22 – График изменения коэффициента увеличения сопротивления

Его минимальная величина, равная 0,92, соответствует $\frac{\tau_1}{\Delta_1} = \frac{\pi}{2} \approx 1,6$.

Поскольку минимальному r_1 соответствуют минимальные потери тепла, толщину трубки следует брать в пределах $\tau_1 = (1,25-2,8) \Delta_1$ (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Оптимальная и предельная толщина трубки индуктора

Толщина трубки, мм	Частота тока, Гц					
	50	500	1000	2500	8000	70000
Предельная	12–28	3,7–8,4	2,9–6,5	1,8–4,0	1–2,3	0,35–0,8
Оптимальная	16	5	3,6	2,3	1,3	0,4

Для индукторов промышленной частоты изготавливают специальные неравностенные трубки, параметры которых приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Сложные профили токопроводов для индукторов промышленной частоты тока

Размер сечения, мм	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>d</i>
	16	22	8
	18	24	10
	20	26	12
	22	8	14
	24	30	16
	25	32	18
	28	34	20
	30	36	22
	32	38	24
	34	40	26
	36	42	28

Иногда для этой цели используют равностенные трубки толщиной $\tau_l = (3-4)$ мм. Поскольку на частоте 50 Гц $\Delta_l = 10$ мм и поверхностный эффект в проводе выражен слабо, для однослойных обмоток r_l (Ом) можно определять, как на постоянном токе

$$r_l = \frac{\rho_1 P_3 w}{S_0}, \quad (3.10)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения медного проводника.

В формуле для r_l на повышенной частоте обычно в знаменатель может вводиться величина g – коэффициент заполнения индуктора медью по длине. Однако изучение распределения плотности тока и потерь в проводниках в зависимости от формы трубки и зазора между витками показало, что r_l на повышенных частотах слабо зависит от g в обычно используемом диапазоне ($0,6 \leq g \leq 0,9$). Поэтому коэффициент g из формулы исключен. Форма проводника (прямоугольная или круглая трубка) также не дает существенных различий в r_l , однако прямоугольное сечение обеспечивает большую площадь окна для охлаждающей воды при том же коэффициенте g .

Расчётные формулы для цилиндрического индуктора:

$$r_1 = \frac{\rho_1 2\pi \left(R_1 + \frac{\Delta_1}{2}\right) w^2}{\Delta_1 l_1} k_{r1} \approx \frac{1,75 R_1 \sqrt{f} w^2}{l_1} k_{r1} 10^{-6} \text{ Ом.} \quad (3.11)$$

Аналогично для индуктора прямоугольного сечения высотой окна h_1 , шириной b_1 и длиной l_1

$$r_1 = \frac{2\rho_1 (b_1 + h_1) w^2}{\Delta_1 l_1} k_{r1} 10^{-8} \text{ Ом.} \quad (3.12)$$

Реактивное сопротивление индуктора определяется по формуле

$$x_1 = \omega \mu_0 \frac{S_1 w^2}{l_1} k_{x1} \text{ Ом,} \quad (3.13)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; S_1 – площадь окна индуктора, ограниченная эквивалентным периметром, см²; k_{x1} – поправочный коэффициент самоиндукции, зависящий от длины индуктора (рис. 3.23).

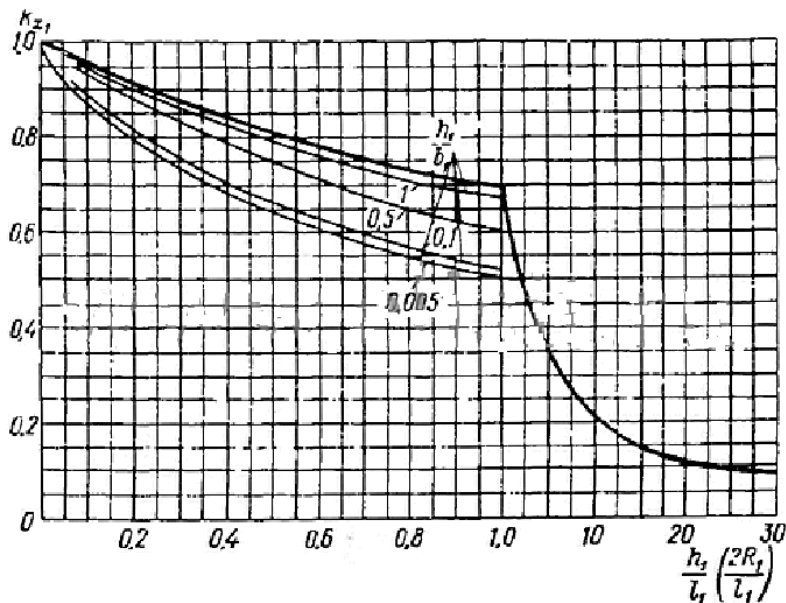


Рисунок 3.23 – Значения коэффициента самоиндукции k_{x1} для цилиндрических индукторов и индукторов прямоугольного сечения

Расчетная формула для цилиндрического индуктора

$$x_1 \approx 24,8 \cdot 10^{-8} \frac{f R_1^2 w^2}{l_1 + 0,9R_1^1} \text{ Ом.} \quad (3.14)$$

В формуле (3.14) принято

$$k_{x1} = f\left(\frac{R_1}{l_1}\right) \approx \frac{1}{1 + 0,9R_1/l_1}. \quad (3.15)$$

Для индуктора прямоугольного сечения

$$x_1 = \frac{7,9fb_1h_1k_{x1}}{l_1} 10^{-8} \text{ Ом}. \quad (3.16)$$

Вносимые сопротивления детали рассчитываются в соответствии со следующими основными методами расчёта.

Метод связанных контуров. Метод основан на аналогии индуктора и детали с двумя связанными катушками. Вторичная катушка, заменяющая деталь и имеющая один виток с радиусом R_2 и длиной l_2 , замкнута на сопротивление r_2 , определенное для отрезка длинного индуктора. Конечная длина индуктора и детали учитывается поправочными коэффициентами. Полное сопротивление индуктора

$$z_H = r_1 + r_2 k_{r2} w^2 + j(x_1 + x_{2M} k_{x2} w^2 + x_2 w^2) \text{ Ом}, \quad (3.17)$$

где k_{r2} и k_{x2} – поправочные коэффициенты активного и реактивного сопротивлений детали (рис. 3.24–3.25); x_{2M} – индуктивное сопротивление потоку внутри детали, которое может быть найдено из следующей зависимости

$$x_2 = \frac{\omega \mu_0 S_2}{l_2} k_{x2} \text{ Ом}, \quad (3.18)$$

где S_2 – площадь сечения детали по внешнему периметру.

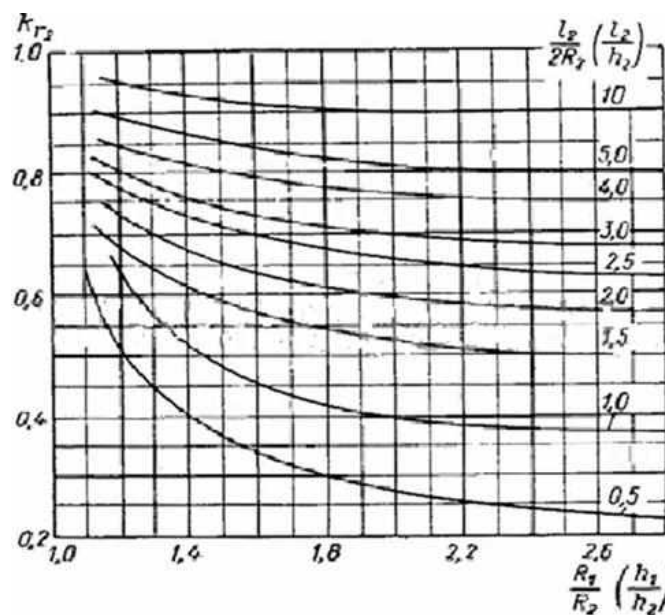


Рисунок 3.24 – Значения коэффициента k_{r2}

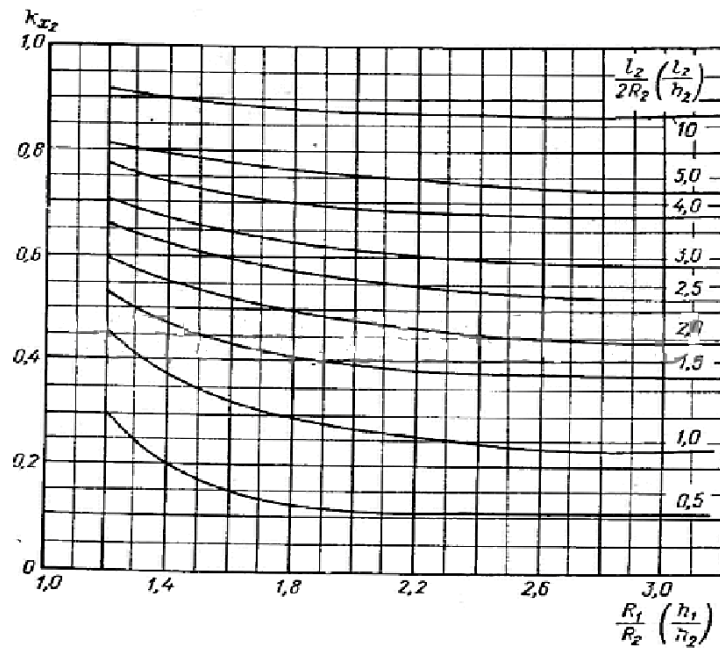


Рисунок 3.25 – Значения коэффициента k_{x2}

Для цилиндрических деталей

$$x_2 \approx 24,8 \cdot 10^{-8} \frac{f \cdot R_2^2}{l_2} k_{x2} \text{ Ом.} \quad (3.19)$$

Коэффициенты k_{r2} и k_{x2} зависят только от геометрических размеров индуктора и детали

$$k_{r2}(k_{x2}) = f \left(\frac{R_2}{R_1}; \frac{l_2}{2R_2} \right). \quad (3.20)$$

Зависимость (3.20) применима при $l_2 \approx l_1$. При нагреве прямоугольных тел вместо R_1 и R_2 следует брать $2h_1$ и $2h_2$. Метод не является универсальным, так как k_{r2} и k_{x2} не зависят от частоты тока и свойств нагреваемой детали. Однако является самым простым и может применяться для индукторов большой длины ($l_1 > 5R_1$).

Метод расчёта по общему потоку. Метод основан на составлении и расчете магнитной схемы замещения нагруженного индуктора. Допускается, что все его витки охвачены одним общим потоком. Участок прохождения магнитного потока по детали и по зазору вдоль её поверхности является полезным и рабочим, а участок внутри индуктора, но вне детали (при $l_1 > l_2$) и снаружи индуктора – участком замыкания потока. Сопротивления, обусловленные наличием зазора (x_s) и детали (r_2 и x_{2m}), рассчитываются как для отрезка длиной l_2 бесконечной системы (если $l_2 > l_1$, то условно считают $l_2 = -l_1$). Расчет

прост и универсален. Ошибка расчета обычно не превышает 8 % по x_H и 10–15 % по r_H .

Полное сопротивление индуктора равно

$$Z_H = r_1 + r_2 C w^2 + jC \left[\left(x_c + x_{2M} + \frac{r_2^2 + (x_s + x_{2M})^2}{x_0} \right) \right] w^2, \quad (3.21)$$

где x_0 – сопротивление обратного замыкания; C – коэффициент приведения параметров, определяемые из соотношений

$$x_0 = x_1 \frac{l_1}{l_1 - l_2 k_{x1}}, \quad (3.22)$$

$$C = \frac{x_0^2}{r_2^2 + (x_0 + x_s + x_{2M})^2}. \quad (3.23)$$

Формулы для расчета r_2 , x_{2M} , x_0 и x_s сведены в таблицу 13 [20].

Общий порядок электрического расчета индуктора следующий:

– по электрическим свойствам материалов определяют глубины проникновения нагрева;

– находят расчетные геометрические размеры индуктора и детали в каждом режиме в соответствии с расчётными формулами таблицы 13. В горячем режиме расчетные размеры детали равны истинным;

– по формулам таблицы 13 рассчитывают сопротивления r_2 , x_{2M} и x_s и вычисляют коэффициент C ;

– находят активное сопротивление пустого индуктора r_1 ;

– определяют сопротивления нагруженного индуктора, используя зависимости

$$Z_H = r_1 + r_2 C w^2, \quad (3.24)$$

$$x_H = C \left[x_s + x_{2M} + \frac{r_2^2 + (x_s + x_{2M})^2}{x_0} \right] w^2, \quad (3.25)$$

$$z_H = \sqrt{r_H^2 + x_H^2}. \quad (3.26)$$

– рассчитывают электрический КПД

$$\eta_{и} = \frac{r_H - r_1}{r_H}, \quad (3.27)$$

– находят коэффициент мощности ($\cos \varphi$)

$$\cos \varphi = \frac{r_H}{z_H}, \quad (3.28)$$

– рассчитывают активную и реактивную мощности индуктора

$$P_{a.и} = \frac{U_{и}^2 r_H}{z_H^2} 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (3.29)$$

$$P_{р.и} = \frac{U_{и}^2 x_H}{z_H^2} 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (3.30)$$

– рассчитывают ток индуктора

$$I_{и} = \frac{U_{и}}{z_H}, \quad (3.31)$$

– определяют число витков. Если число витков заранее неизвестно, в расчете полагают $w = 1$ и затем число витков находят по формуле

$$w = \frac{U_{и}}{z'_{и}} \sqrt{\frac{r'_и}{P_{a.и} 10^3}}, \quad (3.32)$$

где $P_{a.и}$ – мощность, кВт; $z'_и$ и $r'_и$ – сопротивления при $w = 1$.

– выполняют пересчет индуктора. Индуктор будет потреблять мощность $P'_{a.и}$ вместо $P_{a.и}$ при том же напряжении, если изменить число витков

$$w' = w \sqrt{\frac{P_{a.и}}{P'_a}}. \quad (3.33)$$

Индуктор с числом витков w' вместо w будет потреблять ту же мощность, если на нем изменить напряжение

$$U'_и = U_{и} \frac{w'}{w}. \quad (3.34)$$

Выбор частоты и размеров индуктора.

Выбор частоты является одним из наиболее ответственных моментов при проектировании индукционных установок. Он определяется требованием высокого электрического КПД как индуктора, так и всей установки, необходимостью получения заданного распределения температуры по сечению детали, наличием и техническими данными оборудования (преобразователей требуемой мощности, конденсаторов, контакторов). Окончательно частота выбирается по результатам технико-экономического анализа.

Однако основные требования к частоте определяются системой индуктор – деталь. При поверхностной закалке для получения высокого термического КПД и хорошего качества термообработки необходимо обеспечить так называемый глубинный тип нагрева, при котором горячая глубина проникновения тока в один–три раза превышает толщину нагреваемого под закалку слоя. Отсюда рекомендуемый диапазон частот равен

$$\frac{300}{x_k^2} \ll f \ll \frac{2500}{x_k^2} \text{ Гц}, \quad (3.35)$$

где x_k – глубина закаленного слоя, см.

При сквозном нагреве противоположные требования предъявляют условия равномерного нагрева по всему сечению и высокого электрического КПД. При понижении частоты равномерность нагрева повышается, т. е. время нагрева может быть сокращено. Однако, начиная с некоторой частоты, распределение мощности становится постоянным, при этом время нагрева является минимально возможным. Для сплошных тел (круглого и прямоугольного сечений) при переходе от низкой частоты к высокой, при которой вся мощность выделяется в тонком поверхностном слое, время нагрева увеличивается примерно в 1,8–2 раза при той же равномерности нагрева.

Частота для нагрева стальных деталей в форме сплошного цилиндра радиусом R_2 (при $\rho = 10^{-4}$ Ом · см) равна

$$\frac{7500}{R_2^2} \ll f \ll \frac{3 \cdot 10^4}{R_2^2} \text{ Гц}. \quad (3.36)$$

При отсутствии подходящего оборудования в этом диапазоне частоту следует брать выше, одновременно увеличивая время нагрева.

Для полых цилиндров, в отличие от сплошных, имеется оптимальная частота, при которой КПД максимален. Этот максимум заметно выражен лишь при малых толщинах стенки ($\tau_2 \leq 0,2R_2$)

$$f_{\text{опт}} = \frac{4,4 \cdot 10^7 \rho_2}{R_2 \tau_2} \text{ Гц.} \quad (3.37)$$

Максимум КПД является пологим, и возможны значительные отклонения от оптимальной частоты без заметного падения КПД, и рекомендуются следующие пределы

$$\frac{2,5 \cdot 10^7 \rho_2}{R_2 \tau_2} \ll f \ll \frac{10 \cdot 10^7 \rho_2}{R_2 \tau_2} \text{ Гц.} \quad (3.38)$$

Уменьшение частоты приводит к резкому падению КПД. С увеличением частоты выше указанного диапазона КПД падает до минимума при $\tau_2 = \pi/2A_2$ и затем немного снова поднимается, стремясь к предельному значению для сплошного цилиндра.

Выбор основных геометрических соотношений, т. е. внутреннего диаметра и длины индуктора, его теплоизоляции производится, исходя из следующих соображений.

Для того, чтобы обеспечить равномерный нагрев заготовок в индукторе как садового, так и методического действия, необходимо длину индуктора l_1 выбирать несколько больше длины садки l_2 .

Если это условие не выполнить, то концы заготовок оказываются недогретыми из-за того, что на торцах индуктора магнитное поле сильно искажено, а также вследствие наличия тепловых потерь в концевых зонах нагреваемых заготовок, где экранирующее действие футеровки становится меньше.

На практике обычно пользуются следующими соотношениями

$$\begin{aligned} \text{при } d_1/d_2 < 2 \quad l_1 &= l_2 + (0,85 - 1,5) d_1; \\ \text{при } d_1/d_2 > 2 \quad l_1 &= l_2 + (1,5 - 3) d_1, \end{aligned} \quad (3.39)$$

где d_1 – внутренний диаметр индуктора; d_2 – наружный диаметр нагреваемой детали.

Кроме того, следует учитывать, что величина заглубления зависит также от температуры нагрева, так как при нагреве до более высоких температур конец слитка интенсивно охлаждается за счет увеличенных тепловых потерь. Поэтому величина заглубления при нагреве стали до температуры 1250 °С при прочих равных условиях должна быть больше, чем при нагреве цветных сплавов.

Так, например, для достижения равномерного нагрева заготовок из цветных металлов на промышленной частоте длина индуктора выбирается на 40–80 мм больше длины нагреваемой медной заготовки

(температура нагрева 700–800 °С), а для алюминиевой – на 20–50 мм (температура нагрева 450–500 °С).

Оптимальный диаметр индуктора (d_1) определяется из условия получения максимального коэффициента полезного действия и из чисто конструктивных соображений, так как внутри индуктора должны быть расположены тепловая и электрическая изоляции, а также в большинстве случаев специальные направляющие. Чем меньше зазор между индуктором и заготовкой, тем выше электрический К.П.Д. индуктора, но одновременно больше будут его тепловые потери.

При температурах, не превышающих 700–800 °С, тепловые потери оказываются настолько малы, что обычно их в расчёт не принимают, а зазор между индуктором и заготовкой принимают минимальным, руководствуясь чисто конструктивными соображениями.

При нагреве до температур пластической деформации стали (1100–1250 °С) обычно принимают следующие соотношения:

$$d_1/d_2=1,4-1,8 \text{ либо } d_1 = d_2 + (25-50), \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр огнеупорного цилиндра выбирается следующим образом: $d_3 = (1,1 - 1,2) d_2$; $d_3 - d_2 > 0,5$ см.

Между индуктором и огнеупорным цилиндром обычно прокладывается слой асбестового картона или полотна толщиной 2–5 мм, что снижает тепловые потери и защищает электрическую изоляцию индуктора.

В ряде случаев этого не делают, особенно когда температура нагрева невысока, а также в тех случаях, когда производят армирование индуктора жаростойкими бетонами.

Ниже при рассмотрении характеристик индукционных установок в зависимости от величины d_2 и частоты предполагается, что геометрические размеры выбраны в соответствии с изложенными выше соображениями.

Активную мощность, потребляемую индукционной установкой из сети P_c , можно выразить через полезную мощность ($P_{пол}$) и общий КПД системы (η_0)

$$P_c = \frac{P_{пол}}{\eta_0} = \frac{P_{пол}}{\eta_{и}\eta_{кб}\eta_{л}\eta_{пу}}, \quad (3.40)$$

где $\eta_{и}$, $\eta_{кб}$, $\eta_{л}$, $\eta_{и}$, $\eta_{пу}$ – соответственно КПД индуктора, конденсаторной батареи, линии и питающего устройства;

$P_{пол}$ – полезная мощность, которую требуется передать в изделие для нагрева его до заданной температуры

$$P_{пол} = \frac{C_{ср}(t_k - t_0)gn}{0,24 \cdot \tau_H}, \quad (3.41)$$

где t_k и t_0 – конечная и начальная температура нагрева, °С; g – вес одной заготовки, кг; C_{cp} – средняя интегральная удельная теплоемкость в интервале температур от t_0 до t_k ; n – число одновременно нагреваемых в индукторе заготовок; τ_n – время нагрева, сек.

Произведение $c_{cp}(t_k - t_0)$ называется теплосодержанием металла и его можно определить, используя, например, данные, приведенные в источнике [22].

Минимальное время нагрева.

При сквозном нагреве металлов перед пластической деформацией необходимо добиться получения заданного температурного перепада между поверхностью и центром заготовки, так как от равномерности нагрева зависит качество изделий, получаемых в процессе прокатки,ковки, штамповки или прессования, а также стойкость инструмента.

При обработке заготовок из низколегированных и среднелегированных сталей на прокатных станах и на ковочных агрегатах допустимый конечный перепад по температуре между поверхностью и центром равен 100–150 °С, что составляет 8–10 % конечной температуры при нагреве до 1200–1250 °С.

При процессах прессования требования к равномерности нагрева значительно более высокие, и конечный перепад, как правило, не должен превышать 20–30 °С для цветных металлов и сплавов и 40–60 °С – для высоколегированных сталей и жаропрочных сплавов.

В связи с тем, что нагрев при индукционном методе носит ярко выраженный поверхностный характер, скорость выравнивания температуры по сечению зависит от физических свойств металлов, определяемых коэффициентом температуропроводности, а также от применяемых режимов нагрева.

Чем жестче требования по равномерности нагрева, тем больше потребуется времени на проведение процесса, что часто ведет к ухудшению параметров индукционных установок, увеличению удельного расхода электроэнергии, увеличению длины нагревательных устройств и повышенному окалинообразованию материала заготовок.

Поэтому правильный, технологически обоснованный подбор температурного перепада является одним из наиболее важных факторов при проектировании индукционных нагревательных установок.

Различают два основных режима. В индукторах с равномерно распределенной удельной мощностью происходит постепенный нагрев заготовок с непрерывным ростом температуры поверхностных и внутренних слоев до получения заданного температурного перепада. Такой режим нагрева получил название обычного, так как он чаще всего используется на практике.

Получил распространение также режим изотермического, или ускоренного, нагрева, который проводится с постоянной максимальной температурой на поверхности нагреваемой заготовки.

В этом случае в первый период нагрева благодаря большой удельной мощности поверхностные слои заготовки нагреваются за короткое время до максимальных температур. В последующий период удельную мощность подбирают такой, чтобы она обеспечила поддержание достигнутой температуры на поверхности, что соответствует режиму термостатирования.

Вследствие большого температурного перепада происходит быстрое выравнивание температур и общее время процесса значительно уменьшается.

При правильно выбранной частоте тока нагрев стальных деталей до температуры пластической деформации обеспечивается за время, приведенное на рисунке 3.26.

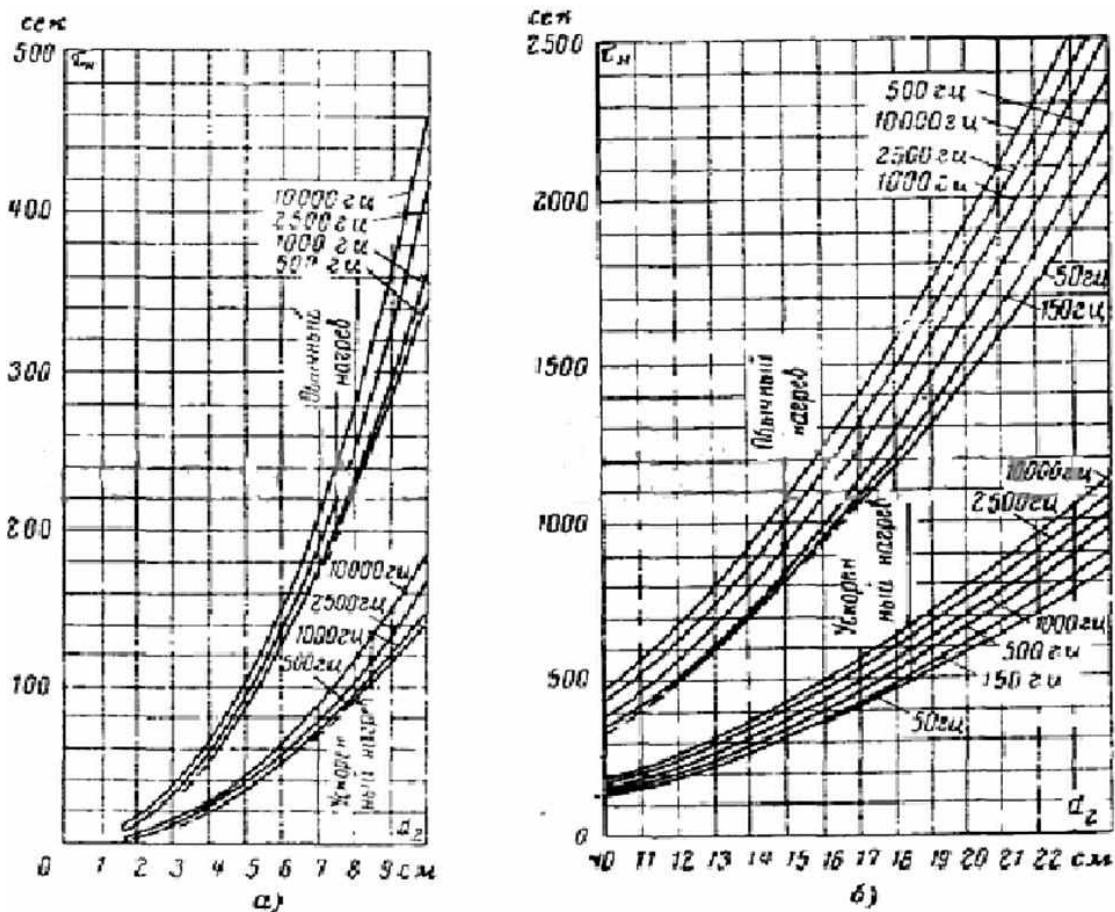


Рисунок 3.26 – Минимальное время нагрева стальных заготовок диаметром d_2 на различных частотах в режимах обычного и ускоренного нагрева:

a – для диаметров до 100 мм; b – для диаметров от 100 до 240 мм

При нагреве цветных металлов и сплавов на промышленной частоте время нагрева можно с достаточной точностью вычислить по следующей формуле

$$\tau_{\text{н}} = \frac{0,17(r_2 - \Delta_2)^2}{a \cdot \left(\frac{t_{\text{п}}}{t_{\text{ц}}} - 1\right)}, \text{сек}, \quad (3.42)$$

где r_2 – радиус детали, см; Δ_2 – глубина проникновения, см; a – средний удельный коэффициент температуропроводности, см²/сек; $t_{\text{н}}$ – конечная температура на поверхности заготовки, °С; $t_{\text{ц}}$ – конечная температура центра заготовки, °С.

3.7 Режимы и оптимальная частота высокочастотного индукционного поверхностного нагрева

Поверхностный нагрев – один из распространённых методов термической обработки, который позволяет повысить твердость поверхности заготовок. Применяется для деталей из углеродистых и конструкционных сталей или чугуна. Индукционная закалка ТВЧ является собой один из самых экономичных и технологичных способов упрочнения. Она дает возможность закалить всю поверхность детали или отдельные её элементы или зоны, которые испытывают основную нагрузку.

При этом под закаленной твердой наружной поверхностью заготовки остаются незакаленные вязкие слои металла. Такая структура уменьшает хрупкость, повышает стойкость и надежность всего изделия, а также снижает энергозатраты на нагрев всей детали.

Основными параметрами, характеризующими высокочастотную закалку, являются:

– глубина закаленного слоя x_k , она принимается условно равной расстоянию от поверхности до зоны, где в структуре имеется 50 % мартенсита. Практически эта глубина определяется по твердости, так как для каждой марки стали твердость полумартенситной структуры известна. Для стали 45 она равна 42–45HRC;

– время нагрева под закалку – время, необходимое для повышения температуры слоя на глубине x_k до закалочной. При выбранной частоте тока время закалки в большинстве случаев определяет глубину закаленного слоя. Кроме того, оно является единственным параметром режима нагрева, который точно дозируется при помощи реле времени и легко – контролируется непосредственным измерением. Поэтому

время нагрева может быть принято в практике в качестве основного параметра режима нагрева;

– для каждой марки стали существует оптимальный интервал температур T_k . При более низкой температуре в структуре закаленного слоя наблюдается остаточный феррит – твердость снижается. При более высокой температуре в закаленном слое наблюдается крупноигольчатый мартенсит и аустенит. Твердость при этом также снижается. Интервал смещается в область более высоких температур при увеличении скорости нагрева. В таблице 3.4 приведены данные по выбору температуры нагрева при различных режимах;

Таблица 3.4 – Температура закалки при разных режимах нагрева, °С

Марка стали	Нагрев в печи	Температура при скорости нагрева, град/с			
		100	250	400	500
40	840–860	850–900	880–920	930–980	960–1120
45	810–860	830–880	860–910	900–950	930–1000
50	820–840	810–850	830–880	870–920	900–960
У8	790–820	780–820	780–850	780–860	820–920
У12	760–780	780–820	780–850	780–860	820–920
40Х	850–870	830–880	860–920	900–960	950–1000
50Г	820–840	810–850	830–880	870–920	900–960
45Г2	830–850	810–850	830–880	870–920	900–960
50ХГ	830–850	810–850	830–880	870–920	900–960
35ХГ2	840–860	830–880	860–920	860–960	930–1000
ХВГ	800–830	830–870	860–900	880–920	900–950

– перегрев наружного слоя ΔT – превышение температуры поверхности закаливаемой детали над температурой закалки на глубине x_k ;

– скорость нагрева V_n (град/с), ее принято вычислять как среднюю в интервале температур структурных превращений, т. е. практически от момента достижения температуры, соответствующей потере магнитных свойств, до момента достижения температуры закалки;

– критическая скорость охлаждения. Мартенсит при закалке получается только при условии охлаждения со скоростью, превышающей определенную, так называемую критическую. Для каждой марки стали характерна своя критическая скорость. Скорость охлаждения по мере удаления от поверхности резко уменьшается. В зависимости от требуемой скорости охлаждения применяют различные охлаждающие среды. Изделия из углеродистой стали обычно охлаждают в воде или в водном растворе соли. Легированные стали требуют меньших скоростей охлаждения. Поэтому для них применяют масло. Скорость охлаждения в области мартенситных превращений для углеродистых сталей равна 400–500 град/с, а для легированных – 50–

200 град/с. Резкое повышение скорости охлаждения может вызвать трещины в закаленном слое, особенно у тел сложной конфигурации (шестерни, кулачки и т. д.).

Скорость охлаждения водой зависит от давления, под которым вода попадает на поверхность, и от температуры воды;

– термический КПД η_t , под которым понимают отношение тепла, потребного для нагрева поверхностного слоя глубиной x_k до температуры T_k , ко всему теплу, сообщаемому телу. Термический КПД определяется типом нагрева и температурой перегрева.

Основные этапы поверхностной закалки ТВЧ – индукционный нагрев до заданной температуры, выдержка при ней, затем быстрое охлаждение. Нагрев при закалке ТВЧ производят с помощью специальной индукционной установки. Охлаждение осуществляют в ванне с охлаждающей жидкостью (водой, маслом или эмульсией) либо разбрызгиванием её на деталь из специальных установок.

Для правильного прохождения процесса закалки очень важен правильный подбор температуры, которая зависит от используемого материала.

Стали по содержанию углерода подразделяются на доэвтектоидные – меньше 0,8 % и заэвтектоидные – больше 0,8 %. Сталь с углеродом меньше 0,4 % не закалывают из-за невозможности получения закалочных структур. Доэвтектоидные стали нагревают немного выше температуры фазового превращения перлита и феррита в аустенит. Это происходит в интервале 800–850 °С. Затем заготовку быстро охлаждают. При резком остывании аустенит превращается в мартенсит, который обладает высокой твердостью и прочностью. Малое время выдержки позволяет получить мелкозернистый аустенит и мелкоигльчатый мартенсит, зерна не успевают вырасти и остаются маленькими. Такая структура стали обладает высокой твердостью и одновременно низкой хрупкостью.

Заэвтектоидные стали нагревают чуть ниже, чем доэвтектоидные, до температуры 750–800 °С, то есть производят неполную закалку. Это связано с тем, что при нагреве до этой температуры кроме образования аустенита в расплаве металла остается нерастворенным небольшое количество цементита, обладающего твердостью высшей, чем у мартенсита. После резкого охлаждения аустенит превращается в мартенсит, а цементит остается в виде мелких включений. Также в этой зоне не успевший полностью раствориться углерод образует твердые карбиды.

В переходной зоне при закалке ТВЧ температура близка к переходной, образуется аустенит с остатками феррита. Но, так как переходная зона не остывает так быстро, как поверхность, а остывает медленно, как при нормализации. При этом в этой зоне происходит улучшение структуры, она становится мелкозернистой и однородной.

Перегревание поверхности заготовки способствует росту кристаллов аустенита, что губительно сказывается на хрупкости. Недогрев не даёт феррито-перлитной структуре полностью перейти в аустенит, и могут образоваться незакалённые пятна.

Поверхностный нагрев проводят на сравнительно высоких частотах. При этом глубина проникновения токов z_a значительно меньше толщины нагреваемого слоя x_k (рис. 3.27).

Прогрев на всю толщину x_k происходит за счет теплопроводности металла. При нагреве по этому режиму требуются меньшие мощности генератора (на рисунке полезная мощность пропорциональна заштрихованным площадям, имеющим двойную штриховку), но время нагрева и удельный расход электроэнергии возрастают. Последнее связано с прогревом за счет теплопроводности глубинных слоев металла. КПД нагрева, пропорциональный отношению площадей с двойной штриховкой ко всей площади, ограниченной кривой t и осями координат, во втором случае ниже.

Вместе с тем следует отметить, что прогрев до определенной температуры слоя металла толщиной b , лежащего за слоем закалки и называемого переходным слоем, совершенно необходим для надежной связи закаленного слоя с основным металлом. При поверхностном нагреве этот слой толще и связь надежнее.

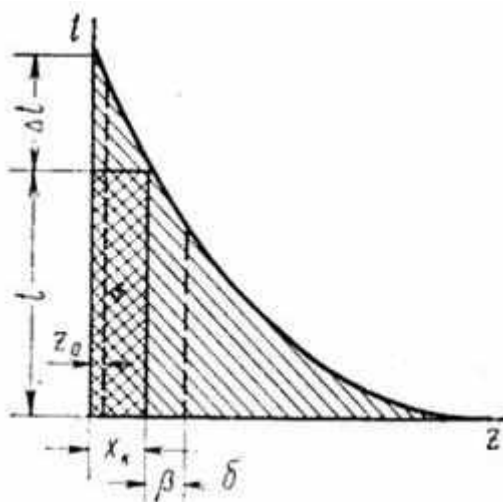


Рисунок 3.27 – Распределение температуры от поверхности вглубь тела при поверхностном индукционном нагреве

При значительном понижении частоты нагрев становится вообще неосуществимым, так как глубина проникновения будет очень большой и поглощение энергии в изделии незначительным.

По принципу работы различают два вида индукционного нагрева: одновременный и непрерывно-последовательный.

При одновременном нагреве площадь индуктирующего провода, обращенная к нагреваемой поверхности изделия, примерно равна

площади этой поверхности, что позволяет одновременно нагревать все её участки. При непрерывно-последовательном нагреве изделие перемещается относительно индуктирующего провода, и нагрев отдельных его участков происходит по мере прохождения рабочей зоны индуктора.

Выбор частоты.

Достаточно высокий КПД может быть получен лишь при определенном соотношении между размерами тела и частотой тока.

При нагреве деталей под поверхностную закалку на глубину x_k (мм) оптимальную частоту (Гц) находят из следующих зависимостей:

– для деталей простой формы (плоские поверхности, тела вращения)

$$f = \frac{5 \cdot 10^4}{x_k^2}, \quad (3.43)$$

– для деталей сложной формы

$$f = \frac{5 \cdot 10^5}{x_k^2}. \quad (3.44)$$

В процессе нагрева удельное сопротивление металлов ρ возрастает. У ферромагнетиков (железо, никель, кобальт и др.) с повышением температуры снижается значение магнитной проницаемости μ . При достижении точки Кюри магнитная проницаемость ферромагнетиков падает до 1, то есть они теряют свои магнитные свойства. Обычная же температура нагрева под закалку 800–1000 °С, под обработку давлением 1000–1200 °С, то есть выше точки Кюри. Изменение физических свойств металлов с изменением температуры приводит к изменению коэффициента поглощения мощности и удельной поверхностной мощности, поступающей в изделие в процессе нагрева (рис. 3.28). Вначале вследствие возрастания r удельная мощность ΔP увеличивается и достигает максимального значения $\Delta P_{\max} = (1,2-1,5) \Delta P_{\text{нач}}$, а затем вследствие потери сталью магнитных свойств падает до минимального ΔP_{\min} . Для поддержания нагрева в оптимальном режиме (с достаточно высоким КПД) установки снабжают устройствами согласования параметров генератора и нагрузки, то есть возможностью регулирования режима нагрева.

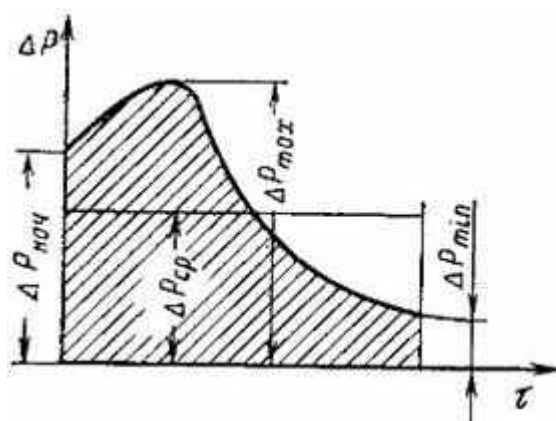


Рисунок 3.28 – Изменение удельной мощности, выделяемой в стали в процессе нагрева, под закалку

Если сравнивать сквозной нагрев заготовок под пластическую деформацию индукционным способом и электроконтактным способом (оба относятся к прямому нагреву), можно заключить, что по расходу электроэнергии электроконтактный нагрев целесообразен для длинных заготовок сравнительно небольшого сечения, а индукционный – для короткомерных заготовок относительно больших диаметров.

Расчет индукторов.

Строгий расчет индукторов довольно громоздок и связан с привлечением дополнительных полуэмпирических данных. Ниже рассмотрен упрощенный расчет цилиндрических индукторов для поверхностной закалки, основываясь на полученных выше зависимостях.

Тепловой расчёт.

Из рассмотрения режимов индукционного нагрева следует, что одну и ту же толщину закаленного слоя x_k можно получить при различных значениях удельной мощности ΔP и длительности нагрева t . Оптимальный режим определяется не только толщиной слоя x_k , но и величиной переходной зоны b , связывающей закаленный слой с глубинными слоями металла.

При отсутствии устройств регулирования мощности генератора характер изменения удельной мощности, потребляемой стальным изделием, изображен графиком, приведенным на рисунке 3.28. В процессе нагрева величина ΔP изменяется и к концу нагрева, после перехода через точку Кюри, резко уменьшается. Происходит как бы самовыключение стального изделия, что обеспечивает высокое качество закалки без пережогов. При наличии регулирующих устройств мощность ΔP может быть равной или даже меньше ΔP_{\min} (рис. 3.28), что позволяет за счет удлинения процесса нагрева уменьшать удельную мощность, требуемую для данной толщины закаливаемого слоя x_k .

Графики режимов нагрева под поверхностную закалку для углеродистых и низколегированных сталей при толщине переходной зоны, составляющей 0,3–0,5 от закаливаемого слоя, приведены на рисунках 3.29 и 3.30.

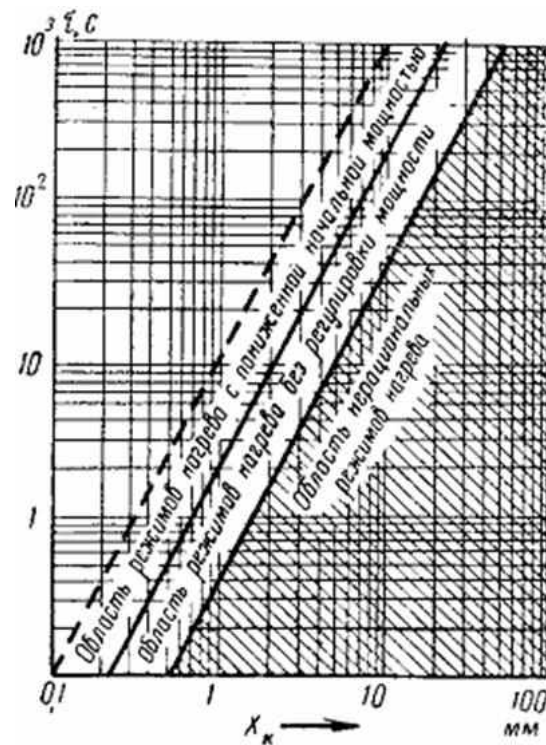


Рисунок 3.29 – Зависимость длительности нагрева от толщины закаливаемого слоя

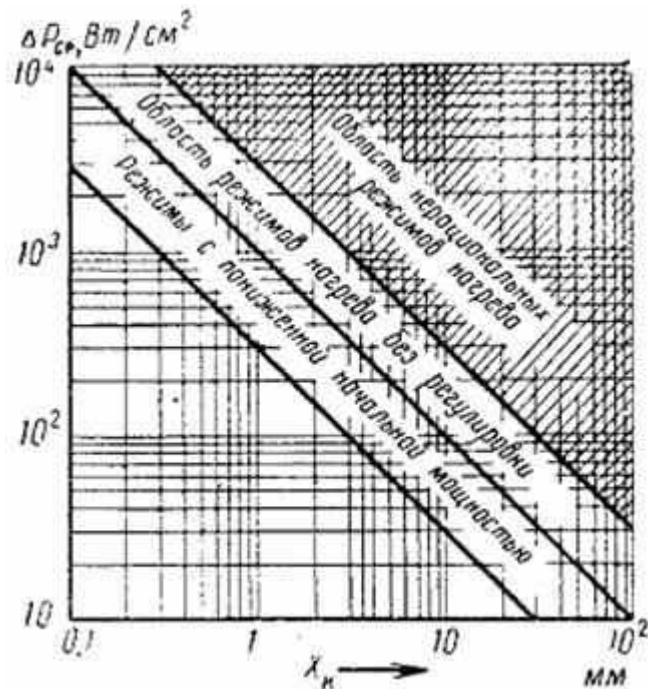


Рисунок 3.30 – Зависимость средней удельной мощности от толщины закаливаемого слоя

Выбрав значение ΔP , находят мощность, подводимую к индуктору,

$$P_{\text{и}} = \frac{\Delta P \pi d_{\text{а}} h_{\text{и}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{и}}}, \quad (3.45)$$

где $d_{\text{а}}$ – диаметр изделия, см; $h_{\text{и}}$ – высота индуктора (см), принимаемая на 10–20 % больше ширины закаливаемого слоя; $\eta_{\text{и}}$ – КПД индуктора (см. рис. 3.31).

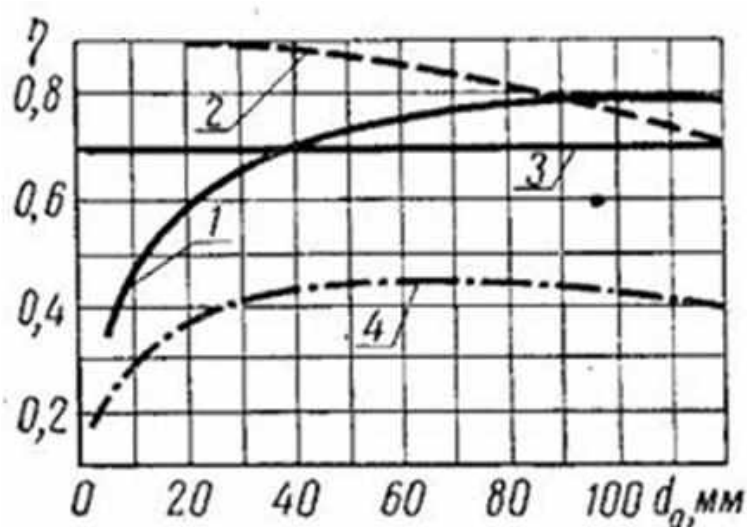


Рисунок 3.31 – Зависимость КПД установок индукционного нагрева от диаметра заготовок:

1 – КПД индуктора; 2 – КПД высокочастотного трансформатора;
3 – КПД генератора; 4 – общий КПД

Колебательная мощность генератора

$$P_{\text{Г}} = \frac{P_{\text{и}}}{\eta_{\text{тр}}}. \quad (3.46)$$

где $\eta_{\text{тр}}$ – КПД высокочастотного (закалочного) трансформатора.

Мощность, потребляемая из сети,

$$P_{\text{потр}} = \frac{P_{\text{Г}}}{\eta_{\text{Г}}} = \frac{P_{\text{и}}}{\eta_{\text{тр}} \eta_{\text{Г}}}, \quad (3.47)$$

где $\eta_{\text{Г}}$ – КПД генератора (рис. 3.31).

Потребляемая мощность генератора (равная при номинальной нагрузке установленной) может быть определена согласно выражению

$$P_{\text{уст}} = G \cdot a, \quad (3.48)$$

где a – удельный расход электроэнергии (кВт·ч/т); G – производительность (т/ч):

Удельный расход электроэнергии при поверхностном индукционном нагреве определяют по формуле

$$a_{\text{пов}} = \frac{\rho x_{\text{к}} S_3 \Delta_i}{3,6 M_3 (1 - \beta) \eta_{\text{г}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{тп}}}, \quad (3.49)$$

где Δ_i – приращение теплосодержания заготовки в результате нагрева, кДж/кг; ρ – плотность материала заготовки, кг/м³; M_3 – масса заготовки, кг; S_3 – поверхность закаливаемого слоя, м²; β – угар металла (при индукционном нагреве в пределах 0,5–1,5 %); $\eta_{\text{г}}$ – КПД передачи тепла за счет теплопроводности (при поверхностной закалке $\eta_{\text{г}} = 0,5$). Остальные обозначения приведены выше.

Примерные значения удельного расхода электроэнергии при индукционном нагреве составляют: при отпуске – 120, закалке – 250, цементации – 300, сквозном нагреве под термомеханическую обработку – 400 кВт · ч/т.

Электрический расчёт.

Пусть глубина проникновения z_a значительно меньше размеров индуктора и детали, а расстояние a между индуктором и изделием мало по сравнению с шириной индуктирующего проводника b (рис. 3.32).

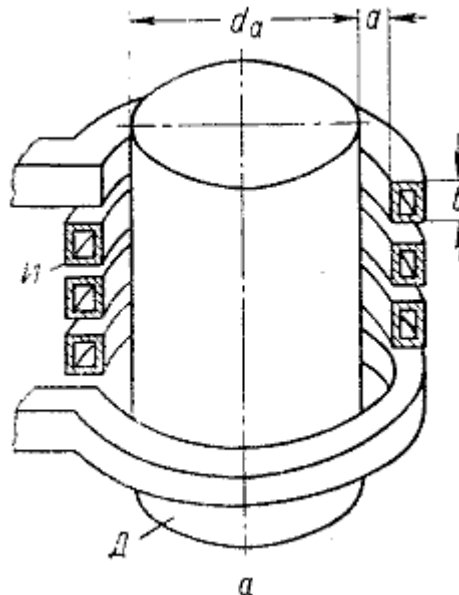


Рисунок 3.32 – Геометрические параметры индуктора для закалки цилиндрических деталей

Для этого случая индуктивность L_c системы индуктор–изделие можно выразить по формуле

$$L_c = \frac{4\pi \cdot 10^{-9} \cdot a \cdot l}{b}, \quad (3.50)$$

где l – развернутая длина индуктирующего проводника.

Тогда ток индуктора

$$I_{и} = \frac{U_{и}}{w \cdot L_c} = \frac{U_{и} \cdot b}{8\pi^2 \cdot 10^{-9} \cdot a \cdot l \cdot f}. \quad (3.51)$$

Учитывая, что $l/b = w_0$ и подставив значение тока в формулу

$$\Delta P \approx 2 \cdot 10^{-4} (I \cdot w_0)^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f}, \quad (3.52)$$

после преобразования получают

$$\Delta P = 3,18 \cdot 10^{10} \frac{U_{и}^2}{(a \cdot l^2)} (\rho \cdot \mu)^{\frac{1}{2}} \cdot f^{\frac{3}{2}}. \quad (3.53)$$

Формула (3.53) даёт связь между удельной мощностью, электрическими параметрами и геометрическими размерами индуктора, физическими характеристиками нагреваемого металла. Принимая за функцию размеры индуктора, их можно получить

$$a \cdot l = 1,78 \cdot 10^5 \cdot U_{и} \cdot \Delta P^{-\frac{1}{2}} \cdot (\rho \cdot \mu)^{\frac{1}{4}} \cdot f^{\frac{3}{4}}. \quad (3.54)$$

Для углеродистой стали можно принять: в холодном состоянии – $\rho = 10^{-5}$ Ом·см, $m = 100$; в нагретом до 800 °С состоянии $\rho = 10^{-4}$ Ом·см, $m = 1$. Тогда формула (3.54) примет следующий вид

– для холодного состояния

$$a \cdot l = 3,18 \cdot 10^4 \cdot U_{и} \cdot \Delta P^{-\frac{1}{2}} \cdot f^{\frac{3}{4}}. \quad (3.55)$$

– для нагретого состояния

$$a \cdot l = 1,78 \cdot 10^4 \cdot U_{и} \cdot \Delta P^{-\frac{1}{2}} \cdot f^{\frac{3}{4}}. \quad (3.56)$$

Значение U_u при поверхностной закалке находится в пределах 50–100 В, при сквозном нагреве – 100–250 В. Формулы (3.55), (3.56) позволяют найти любую из входящих в них величин при известных других.

Пример расчёта.

Рассчитать индуктор для поверхностной закалки цилиндрических заготовок из углеродистой стали диаметром $d_a = 30$ мм и высотой $h_a = 90$ мм. Глубина закаливаемого слоя $x_k = 1$ мм, напряжение на индукторе $U_u = 100$ В.

По формуле (3.44) определяют рекомендуемую частоту, которая составит $f = 5 \cdot 10^4$ Гц.

Из графика (рис. 3.30) определяют $\Delta P \approx 400$ Вт/см².

По формуле (3.55) находят $a \cdot l$ для холодного состояния – $a \cdot l = 38,2$ см².

Принимая $a = 5$ мм, определяют диаметр индуктора

$$d_u = 30 + 2 \cdot 5 = 40 \text{ мм.}$$

Длина индуктирующего проводника

$$l = \frac{3820}{5} = 764 \text{ мм.}$$

Число витков индуктора

$$w = \frac{764}{3,14 \cdot 40} = 6.$$

Высоту индуктора выбирают несколько больше высоты нагреваемой заготовки, используя зависимость

$$H = (1,1-1,2) \cdot h_a \approx 100 \text{ мм.}$$

Затем определяют мощность, подводимая к индуктору,

$$P_u = (400 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 100 \cdot 10^{-3})/0,66 = 57 \text{ кВт,}$$

где 0,66 – КПД индуктора (рис. 3.31).

С учётом КПД колебательная мощность генератора составит (см. формулу 3.41)

$$P_z = P_u / h_{mp} = 57/0,88 = 64,8 \text{ кВт.}$$

3.8 Диэлектрический нагрев

Теоретические основы диэлектрического нагрева.

Применение электрического тока, проходящего через диэлектрики и полупроводники в переменном электрическом поле, является основой диэлектрического нагрева.

Диэлектрический нагрев является наиболее эффективным – при его осуществлении вся энергия вносится в массу нагреваемого материала.

По сравнению с индукционным нагревом, применяемым для разогрева электропроводящих материалов переменным током частотой не более 30 МГц, диэлектрический нагрев проводится обычно с использованием более высоких частот.

Диэлектрический материал (древесина, пластик, керамика) помещается между обкладками конденсатора, на который подаётся напряжение высокой частоты от электронного генератора. Переменное электрическое поле между обкладками конденсатора вызывает поляризацию диэлектрика и появление тока смещения, который разогревает материал.

Достоинства метода: высокая скорость нагрева; чистый бесконтактный метод, позволяющий проводить разогрев в вакууме, защитном газе и т. п.; равномерный нагрев материалов с низкой теплопроводностью; осуществление местного и избирательного нагрева и др.

Области применения метода: сушка материалов (древесины, бумаги, керамики и др.); нагрев пластмасс перед прессованием; сварка пластмасс; сушка клеевых швов; разогрев почвы перед землеройными работами; склеивание древесины и т. д.

Высокочастотный нагрев позволяет повысить качество продукции, ускорить технологические процессы и получить при массовом производстве большую экономию, несмотря на высокую стоимость применяемых установок.

Частицы диэлектрика, помещенного в электрическое поле, испытывают на себе механическое воздействие, смещающее положительно заряженные частицы в одну сторону, а отрицательно заряженные – в другую. Тогда центры электрического действия положительных и отрицательных частиц не совпадают, и во внешнем пространстве такая молекула ведет себя как диполь, т. е. как система двух равных, но противоположных зарядов $+q$ и $-q$, смещенных друг относительно друга на расстояние l . Такой диэлектрик, имеющий ориентированные в одном направлении диполи, называют поляризованным.

Диэлектрик поляризуется не только в постоянном, но и в переменном электрическом поле. В этом случае направление поляризации меняется с частотой поля, упругие диполи вибрируют, жесткие поворачиваются в прямом и обратном направлениях. Происходит и перемещение зарядов, т. е. через диэлектрик протекает электрический ток. При расположении диэлектрика между обкладками конденсатора, на которые подано напряжение от высокочастотного генератора, электрическая цепь замкнется через этот генератор.

Поляризация вызывает потери энергии ввиду трения между молекулами (потери трения) и перемещения диполей (дипольные потери). Потери энергии выражаются в нагреве диэлектрика или

полупроводника, скорость которого определяется частотой изменения поля. Потери при поляризации приводят к запаздыванию смещения молекул по отношению к внешнему полю. С ростом частоты такое отставание увеличивается, пока не достигнет максимума. Дальнейшее повышение частоты приводит к уменьшению поляризации, что ведет к резкому снижению диэлектрической проницаемости вещества.

Анализ процессов, протекающих в переменном магнитном поле, показывает, что мощность, выделяющаяся в диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, определяется только его электрическими характеристиками, а именно, диэлектрической проницаемостью ϵ и углом диэлектрических потерь $tg\delta$ и параметрами поля – напряженностью E и частотой f .

Выделяющаяся мощность не зависит от теплопроводности диэлектриков и имеет низкие значения. Эта особенность диэлектрического нагрева позволяет значительно ускорить процесс обработки материала по сравнению с нагревом другими способами.

Установки диэлектрического нагрева.

Установки высокочастотного диэлектрического нагрева подразделяют на три вида.

Установки первого вида применяются в процессах обработки крупных изделий, требующих быстрого нагрева в однородном электрическом поле: сушка различных волокнистых материалов, целлюлозы и лесоматериалов, обжиг электроизоляторов и фарфоровых изделий, производство звуко- и теплоизоляционных материалов, сварка пластмасс и полимерных материалов.

Установки второго вида применяются для нагрева протяженных плоских изделий: сушка текстильного волокна, рисунков на тканях, бумаги, химических препаратов, полимеризации клеёв, нагрев каучука, пастеризация.

В установках третьего вида проводятся следующие процессы: размораживание продуктов, разогрев и быстрое приготовление блюд, обжиг простых керамических изделий, сушка грибов, чая и т. п.

Устройства диэлектрического нагрева по частотам подразделяют на два вида: установки, работающие на высокой частоте, – ВЧ-установки (частота – 66 кГц–100 МГц), и установки сверхвысокочастотного нагрева – СВЧ-установки (частота – 1000 МГц и выше). Последние чаще применяются при разогреве пищевых продуктов. Выбор рабочих параметров установки определяется исходя из физических свойств нагреваемого материала.

Главное условие равномерного нагрева по всему объему обрабатываемого материала – это превышение заданной глубины проникновения электромагнитной волны в материал по всей площади поперечного сечения.

В комплект установок диэлектрического нагрева входят высокочастотный генератор, система защиты и сигнализации, технологический узел.

Конструкция технологического узла определяется, в основном, родом и видом нагреваемого материала.

Существуют установки диэлектрического нагрева для термообработки пористых резин, предварительного нагрева таблетированных пресс-материалов, нагрева в процессе прессования, термообработки изделий и нагрева перед штамповкой, склеивания терморезактивными клеями, обработки сельхозпродуктов и т. д.

Применяемые установки диэлектрического нагрева по рабочим частотам f условно подразделяют на установки средневолнового (0,3–3,0 МГц), коротковолнового (3–30 МГц) и метрового (30–300 МГц) диапазонов.

Средневолновые применяются для нагрева материалов с большим фактором потерь $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$, к которым относятся очень влажные изделия при их относительно небольших габаритных размерах. Генераторы этих установок имеют сравнительно высокий КПД (0,5–0,6) и выполнены мощностью до нескольких сотен киловатт. Нагрев производится на низких удельных мощностях p_0 (0,01–1,0 Вт/см³) при длительности нагрева в десятки часов и высоком напряжении на рабочем конденсаторе (10–15 кВ).

Коротковолновые установки применяются для нагрева материалов со средним значением фактора потерь. КПД таких установок составляет 0,4–0,55. Мощность генератора составляет несколько десятков киловатт, объем одновременно нагреваемого материала небольшой. Удельная мощность p_0 составляет 1–100 Вт/см³. Сушка с испарением длится в течение нескольких часов, без испарения – доли часа. Установки удобны при работе с воздушным зазором и для осуществления методического нагрева.

Установки метрового диапазона имеют КПД, равный 0,3–0,4. Применяются для нагрева материалов с малым значением $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$. Объем рабочей камеры небольшой, удельная мощность – 0,1–3 кВт/см³, время нагрева – секунды, данные установки могут работать с воздушным зазором.

Особенностью установок сверхвысокой частоты является соизмеримость геометрических размеров колебательных систем с длиной волны используемых колебаний. В этих установках напряженность электрического поля меньше, чем в установках метрового диапазона, что снижает опасность электрического пробоя. В данных установках осуществляется нагрев материалов с низким значением фактора потерь, в частности, продуктов, слоистых материалов, медицинских препаратов и др.

Глава 4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И СВОЙСТВА ДУГОВОГО РАЗРЯДА. ЭЛЕКТРОДУГОВЫЕ ПЕЧИ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

4.1 Общие сведения

Преобразование электрической энергии в тепловую в дуговых печах происходит в разрядном промежутке между торцом электрода и поверхностью металла. Электрическая цепь на этом участке замыкается дуговым разрядом. Дуговой разряд является одной из форм электрического разряда в газах. В обычном состоянии газ состоит из нейтральных частиц и ток не проводит. Он приобретает проводимость, когда в нём кроме нейтральных атомов и молекул появляются заряженные частицы – свободные электроны и ионы. В зависимости от причин, вызывающих их появление, разряды в газах подразделяют на несамостоятельные и самостоятельные. Несамостоятельными называют разряды, для поддержания которых на газовый промежуток требуется воздействие внешних ионизаторов, например рентгеновского излучения. Разряды, существование которых не обусловлено внешними ионизаторами, являются самостоятельными. Дуговой разряд относится к числу самостоятельных разрядов. Кроме дугового, в газах возможны и другие формы самостоятельного электрического разряда, при определенных условиях переходящие одна в другую. Конкретная форма электрического разряда (дуговой, тлеющий и тихий) определяется плотностью разрядного тока и давлением в газовой среде. Дуговой разряд характеризуется высокой плотностью тока в канале разряда (порядка 10^2 – 10^6 А·см²), низким катодным падением напряжения (менее 20 В), высокой температурой газовой среды в межэлектродном пространстве $(3-5) \cdot 10^3$ К. Для возбуждения электрической дуги концы электродов, к которым приложено напряжение, сначала приводят в соприкосновение, а затем разводят на некоторое расстояние. При разведении электродов в точках контакта увеличивается сопротивление и растет количество выделяющегося на этом участке тепла, повышается температура концов электродов.

Приоритет в открытии дугового разряда принадлежит академику Василию Владимировичу Петрову – 1802 г. Он рассказал о возможности использования дугового разряда для плавления металлов. Дугой назвал это явление англичанин Гэмфи Дэви, который независимо от Петрова В. В. исследовал это явление в 1808–1810 г.

Важным условием стабильного горения дуги является согласование её параметров с параметрами источников питания.

Промышленные дуговые печи питаются, как правило, переменным током. Преимущественное использование переменного тока для питания печей объясняется более низкой стоимостью его

получения и возможностью передачи на значительные расстояния со сравнительно небольшими потерями. Постоянный ток используют для питания дуговых печей лишь в исключительных случаях, когда применение переменного тока либо невозможно, либо не обеспечивает необходимого качества металла. По сравнению с дугой постоянного тока дуга в цепи переменного тока менее устойчива. В течение каждого периода напряжение источника переменного тока и значение силы тока в дуге дважды переходят через нулевое значение. Это означает, что в цепи переменного тока дуга дважды за период исчезает и возбуждается вновь. Непрерывное горение дуги отличается от прерывистого лишь длительностью пауз, в течение которых дуга отсутствует. При непрерывном горении значение силы тока плавно переходит через нулевое значение, и длительность пауз равна нулю. Конечное значение длительности пауз отвечает прерывистому, но устойчивому горению дуги. При неустойчивом горении пауза стремится к бесконечности и происходит гашение дуги.

Неспокойная, прерывистая дуга в электропечах нежелательна, так как в этом случае мощность трансформатора используется не полностью, вследствие чего замедляется плавление металла, снижается производительность установки.

Появление пауз при смене полярности связано с деионизацией разрядного промежутка и с потерей эмиссионной способности катода. Ферросплавные и сталеплавильные дуговые электропечи являются печами прямого действия, в которых дуга горит между электродом и поверхностью нагреваемого металла. Тепловое состояние электрода в таких печах бывает достаточно стабильным, а температура металла может изменяться в значительных пределах, особенно в печах периодического действия. В зависимости от периода плавки дуга горит между электродом и твёрдой холодной шихтой, электродом и прогретой твёрдой шихтой и, наконец, между электродом и поверхностью жидкой ванны. Этапы горения дуги в разные периоды времени переработки шихты показаны на рисунке 4.1. Наименее устойчивое горение дуги наблюдается в первом случае, когда электрическая дуга горит на поверхности твёрдой холодной шихты. При переходе напряжения источника через нуль шихта в зоне дуги благодаря высокой теплопроводности металла успевает остыть и в тот полупериод, когда она служит катодом, эмиссия электронов оказывается недостаточной для получения необходимой степени ионизации газов в разрядном промежутке при нормальном напряжении на дуге. Ионизация начинается при более высоком напряжении; напряжение на дуге сильно колеблется даже в течение полупериода. На осциллограмме напряжения появляются «пики».

По мере разогрева шихты и появления жидкого металла горение дуги становится более устойчивым, уменьшается напряжение

зажигания, пики напряжения сглаживаются, сокращается продолжительность пауз. После полного расплавления металла осциллограмма напряжения дуги приближается по форме к синусоиде, а значение силы тока плавно переходит через нуль. Горение дуги стабилизируется, паузы практически отсутствуют.

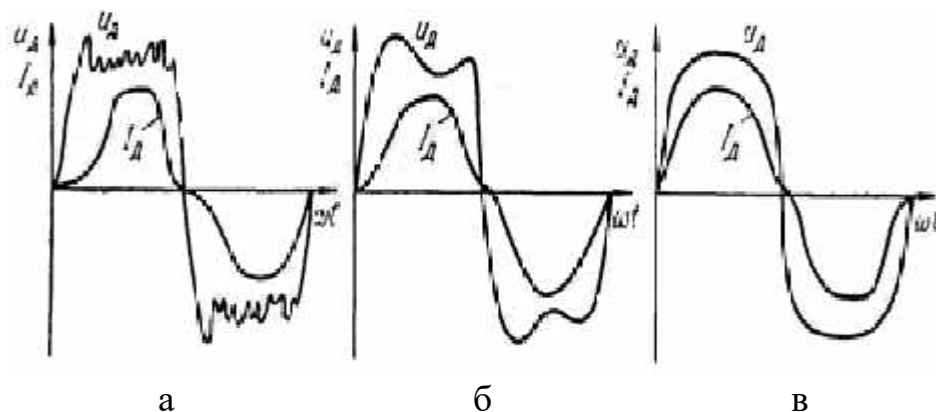


Рисунок 4.1 – Напряжение и ток электрической дуги в печи:
 а – в начале плавления шихты; б – в конце плавления;
 в – в восстановительный период

Для повышения стабильности горения дуги необходимо принимать меры по теплоизоляции зоны разряда с тем, чтобы поддерживать требуемую степень ионизации газа в разрядном промежутке и улучшить условия эмиссии электронов катодом. Возможности активного воздействия на тепловое состояние разрядной зоны в промышленных электропечах, особенно в период наименее устойчивого горения дуги (в период проплавления шихты) практически отсутствуют. Холодная шихта хорошо поглощает тепло и благодаря высокой теплопроводности быстро отводит его от зоны горения дуги. Несколько уменьшить отвод тепла в шихте от зоны электрической дуги и тем самым несколько улучшить условия ее возбуждения можно рациональным подбором и укладкой шихты. Для этого под электродами шихту надо расположить таким образом, чтобы в начале плавления дуга горела на мелких кусках шихты, которые быстрее нагреваются и оплавляются. В этом случае горение дуги стабилизируется сравнительно быстро. Если же под электродом окажется массивный кусок шихты, на прогрев которого требуется много тепла, то дуга горит неустойчиво в течение длительного периода времени. Повысить устойчивость горения дуги можно в результате изменения условий ионизации газа в межэлектродном промежутке. Обычно дуга горит в газах, характеризующихся довольно высоким потенциалом ионизации. Если под электроды поместить материал, содержащий легкоионизируемый элемент, то в разрядном промежутке появятся пары

этого элемента, суммарная степень ионизации газа при прочих равных условиях увеличится, и дуга станет более устойчивой. Наиболее распространенным в металлургических цехах элементом со сравнительно низким потенциалом ионизации является кальций, потенциал ионизации которого в два с лишним раза меньше, чем у основных компонентов воздуха ($N_2 = 15,6 \text{ В}$; $O_2 = 12,5 \text{ В}$). Присадка под электроды кальцийсодержащих материалов, например, извести или силикокальция, оказывает на дугу стабилизирующее действие.

Шихтовые материалы.

Основной составляющей шихты является стальной лом. Лом не должен содержать цветных металлов и должен иметь минимальное количество никеля и меди; желательнее, чтобы содержание фосфора в ломе не превышало 0,05 %, при более высоком содержании фосфора продолжительность плавки возрастает. Лом не должен быть сильно окисленным (ржавым), так как с ржавчиной (гидратом окиси железа) вносится в металл много водорода. Лом должен быть тяжеловесным, чтобы обеспечивалась загрузка шихты в один прием (одной бадьей). При легковесном ломе после частичного расплавления первой порции шихты приходится вновь открывать печь и подсаживать шихту, что увеличивает продолжительность плавки. В последнее время расширяется применение металлизированных окатышей и губчатого железа – продуктов прямого восстановления обогащенных железных руд. Они содержат 85–93 % Fe, основными примесями являются окислы железа, SiO_2 и Al_2O_3 . Отличительная особенность этого сырья – наличие углерода от 0,2–0,5 до 2 % и очень низкое содержание серы, фосфора, никеля, меди и других примесей. Это позволяет выплавлять сталь, отличающуюся повышенной чистотой от примесей. Переплав отходов легированных сталей позволяет экономить дорогие ферросплавы. Эти отходы сортируют по химическому составу и используют при выплавке сталей, содержащих те же легирующие элементы, что и отходы. Для повышения содержания углерода в шихте используют чугун, кокс и электродный бой. В качестве шлакообразующих в основных печах применяют известь, известняк, плавиковый шпат, боксит, шамотный бой; в кислых печах – кварцевый песок, шамотный бой, известь. В качестве окислителей используют железную руду, прокатную окалину, агломерат, железные окатыши, газообразный кислород. В электросталеплавильном производстве для легирования и раскисления применяются практически все известные ферросплавы и легирующие.

4.2 Классификация и устройство дуговых электрических печей

Дуговые электрические печи нашли широкое применение в металлургической, химической, машиностроительной и других отраслях промышленности. К ним относятся:

- дуговые печи косвенного действия. В таких печах электрическая дуга горит между электродами, расположенными над расплавленным металлом, и теплообмен между дугой и материалом осуществляется как за счёт излучения, так и за счёт конвекции;

- дуговые печи прямого действия. В этом случае электрическая дуга горит между электродами и нагреваемым материалом. Его нагрев осуществляется при выделении энергии в дуге, протекании тока через расплав, а также за счёт излучения плазмы дуги, конвекции и теплопроводности;

- дуговые печи сопротивления. В этом типе печей дуга горит под слоем электропроводной шихты – теплота выделяется в дуговом разряде и при прохождении тока через шихту в расплавленных материалах. Передача теплоты в объём печи происходит за счёт теплопроводности, излучения и частично за счёт конвекции;

- вакуумные дуговые печи, в которых электрическая дуга горит в инертном газе или парах переплавляемого металла между расходуемым электродом (из переплавляемого металла) и ванной жидкого металла или между не расходуемым электродом и ванной переплавляемого металла;

- плазменно-дуговые плавильные установки. В них нагрев металла происходит электрической дугой вместе со струей плазмы инертного газа, что позволяет обеспечить чистоту переплавляемого металла, увеличить производительность и экономичность печи данной модификации.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) прямого действия предназначены для выплавки стали в слитки для последующего передела в прокатных цехах, а также для получения фасонного литья, металлургического сырья, химических продуктов. Промышленностью выпускают дуговые печи вместимостью 0,5; 1,5; 3; 6; 12; 25; 50; 100 и 200 т. Печи состоят из следующих основных частей: каркаса; механизма наклона; футеровки; свода, механизма перемещения свода; электродов; электрододержателей и механизма перемещения электрододержателей; системы электромагнитного перемешивания металла в ванне; системы водяного охлаждения, гидравлического привода механизмов, электрооборудования. Основные узлы печи приведены на рисунке 4.2.

Конструкция печи имеет загрузочные окна и сливное отверстие. Печь иногда загружают сверху при снятом своде. Слив металла производят наклоном печи.

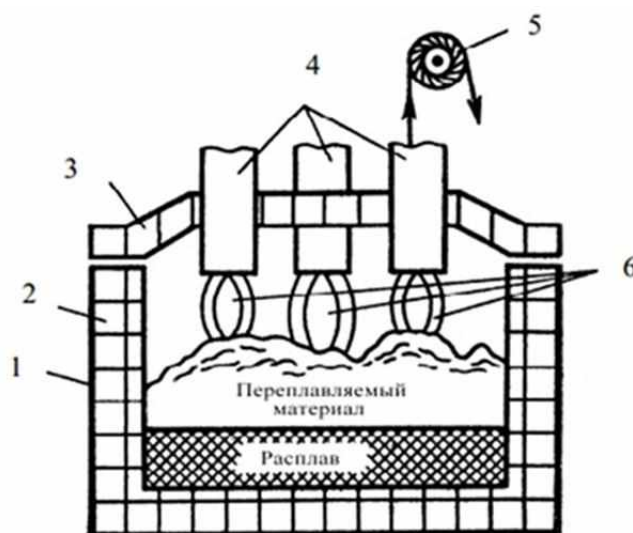


Рисунок 4.2 – Схема дуговой сталеплавильной печи прямого действия:

- 1 – металлический кожух (цилиндрической или конической формы);
 2 – огнеупорная футеровка; 3 – свод; 4 – электроды; 5 – механизм подъема электродов; 6 – дуга

Каркас.

Все нагрузки от футеровки и жидкого металла, а в некоторых конструкциях – и от механизмов наклона печи и подъема свода, воспринимаются каркасом печи. Каркас может быть цилиндрической или конической формы, слегка расширяющийся кверху. Каркас сваривают из листовой низкоуглеродистой стали и усиливают ребрами жесткости. Толщина стенки каркаса зависит от вместимости печи. Днище каркаса может быть плоским, коническим или сферическим. В каркасе вырезают отверстия для загрузочного окна и металлической лётки. На больших печах боковые стены каркаса имеют водяное охлаждение.

В ряде случаев каркас печи выше уровня жидкого металла представляет собой отдельные водоохлаждаемые панели, соединённые между собой болтами. На поверхности панели, обращенной в рабочее пространство печи, имеются ребра и иглы, на которые нанесен тонкий слой огнеупорной массы.

В подобных печах потери энергии через стены выше, чем у печей без охлаждения стен, но удельный расход энергии на тонну выплавленного металла меньше, так как время плавки значительно сокращается. Кроме того, сокращаются простои печи, связанные с ремонтом футеровки стен.

Механизм наклона. Для слива металла печь наклоняют на 40–45° в сторону сливного носка, а для скачивания шлака на 10–15° в сторону рабочего окна. Печь наклоняют с определенной скоростью механизмом

с электромеханическим или гидравлическим приводом, находящимся сбоку от нее или под ней. Механизм наклона печи вместимостью 0,5; 1,5 и 3 т состоит из двух гидравлических цилиндров, размещенных под печью. К каркасу печи на болтах присоединены два литых сегмента, установленные на литые плиты. На плитах и сегментах выполнены зубцы, надёжно фиксирующие печь в определенном положении. Печь наклоняют при перемещении штока цилиндров, которые шарнирно соединены с фундаментом и каркасом.

Футеровка. Подина состоит из нескольких слоев. Первый слой, соприкасающийся с жидким металлом и шлаком – набивной из огнеупорного порошка. При кислом процессе используют набивку из кварцевого песка, при основном – набивку из магнезитового порошка. Второй слой подины при кислом процессе выполняют из динаса, а при основном – из магнезита. Последующие слои состоят из шамота, диатомита и асбеста. Стены печей – многослойные. Первый слой в зависимости от процесса выкладывают из динасового или магнезитового кирпича, второй – из шамотного кирпича, третий – из диатомитового порошка, который, выполняя роль теплоизоляции, одновременно компенсирует расширение огнеупоров при их нагреве и тем самым предохраняет каркас от разрушения. Вместо огнеупорных кирпичей иногда применяют набивные блоки, изготовленные из кварцевого песка или магнезитового порошка. У сверхмощных сталеплавильных печей стены из огнеупоров заменяют водоохлаждаемыми панелями.

Свод. Известны печи с водоохлаждаемым сводом, в котором футеровка отсутствует полностью или сохраняется только в центральной части свода, где расположены электроды. Своды изготавливают с помощью специального шаблона из высокоглиноземистого или электродинасового нормального и фасонного кирпича.

Механизм перемещения свода. При загрузке печей применяют специальные механизмы для подъема и поворота свода. Наиболее широко используют метод загрузки сверху. При загрузке шихты свод вместе с электродами поднимают и поворачивают на 80–100°. Открытую печь загружают с помощью специальных загрузочных корзин. По окончании загрузки свод возвращают в исходное положение. После этого может быть начат рабочий цикл. У некоторых печей свод после подъема остается в приподнятом положении, а печь выкатывают из-под свода на позицию загрузки. По окончании загрузки печь устанавливают в первоначальное положение, а свод опускают. Механизированная загрузка шихты позволяет повысить производительность печи и сэкономить электроэнергию.

Электроды.

Электроды в дуговых печах служат для ввода электроэнергии внутрь рабочего пространства печи, для расплавления шихты и получения необходимых материалов. Применяются угольные или графитированные электроды. Угольные электроды изготавливают из антрацита и кокса, а графитированные – из искусственного графита в специальных электрических печах. В современных печах в подавляющем большинстве применяются графитированные электроды. Иногда применяемые графитоугольные электроды диаметром 100–1200 мм изготавливают из антрацита, термоантрацита (прокаленного антрацита), нефтяного кокса, каменноугольного пека и смолы в специальных печах путём обжига заготовок без доступа кислорода при температуре до 1600 К. Угольные электроды по сравнению с графитированными имеют меньшую механическую прочность и большее удельное сопротивление. Поэтому угольные электроды обычно применяют лишь на малых печах вместимостью до 3 т.

Таблица 4.1 – Параметры электродов для дуговых печей

Параметры	Электроды								
	графитированные						угольные		другие
Диаметр, мм ²	150	300	400	500	600	700	150	300	600
Плотность тока, не более, А/см ²	26	19	16	15	10–15	10–13	12	10	30

В дуговых печах применяются непрерывно наращиваемые электроды. Они имеют круглое сечение и обработанные торцы, в которых по оси имеются отверстия с резьбой. В отверстия ввинчены до половины своей длины ниппели, выполненные из материала электрода. На выступающую из торца электрода половину ниппеля навинчивают следующий электрод и т. д. Таким способом изготавливается электродная свеча, состоящая из нескольких электродов. Электроды имеют длину 1000–1800 мм. Управление перемещением электродов в процессе плавки производится в автоматическом режиме с помощью электрогидравлического регулятора.

Электрододержатели (ЭД).

Электроды крепятся в специальных ЭД, которые предназначены для удержания электродов и подвода к ним тока. Каждый ЭД закреплен на стойке, которая может перемещаться в вертикальном направлении. ЭД связаны с механизмом перемещения электродов. Ток подводится к ЭД с помощью пакета медных шин или водоохлаждаемых труб. Установки электромагнитного перемешивания металла позволяют ускорить выведение вредных газов и компонентов из расплава, выровнять химический состав расплава. Жидкий металл в ванне приводится в движение с помощью электромагнитных устройств

переменного тока с перемежающимся магнитным полем при частотах 0,4–1,0 Гц. Промышленные установки электромагнитного перемешивания состоят из трех компонентов: индуктора, источника питания и системы охлаждения. Индукторы электромагнитного перемешивания выполняют в виде цилиндрических или плоских конструкций. В первом случае индукторы располагаются на боковой поверхности корпуса, во втором – под донной поверхностью. Мощность индукторов составляет 0,5–0,6 кВт, напряжение фазы 115–180 В, коэффициент мощности 0,5–0,6. В качестве источников питания индукторов используют электромагнитные преобразовательные агрегаты и тиристорные преобразователи частоты. Охлаждение статора производится водой, если он изготовлен из медной трубки, или воздухом по специальным каналам внутри обмотки. Стоимость установки электромагнитного перемешивания металла составляет 30–100 % стоимости печи, а расход энергии в ней на 1 т выплавленной стали 3–5 % от полного расхода энергии. Электрооборудование состоит из печного трансформатора, дросселей, коммутационно-защитной аппаратуры.

На рисунке 4.3 показана конструкция дуговых печей вместимостью 0,5; 1,5 и 3 т.

4.3 Технологии плавки стали в дуговых сталеплавильных печах прямого действия

Технология плавки стали в ДСП зависит от используемых шихтовых материалов, емкости печи, необходимого качества стали.

Ниже приведены некоторые технологии плавки и их особенности.

Плавка в основной печи на углеродистой шихте.

Данная технология применяется на печах малой и средней емкости (до 40 т) при выплавке качественных легированных сталей. Плавка состоит из следующих периодов: заправка печи; загрузка шихты; плавление; окислительный период; восстановительный период; выпуск стали.

Заправка – это исправление изношенных и поврежденных участков футеровки пода. После выпуска очередной плавки с подины удаляют остатки металла и шлака. На поврежденные подины и откосы забрасывают магнезитовый порошок.

Длительность заправки составляет 10–15 мин.

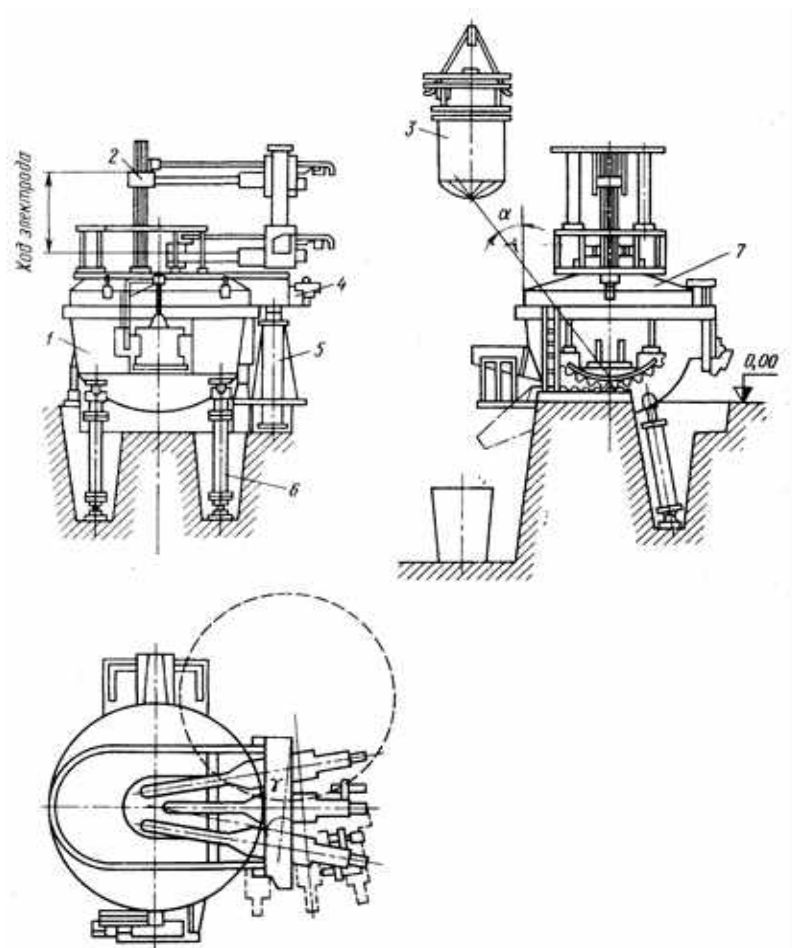


Рисунок 4.3 – Конструкция дуговой печи типа ДСП
емкостью 0,5; 1,5; 3 т:

- 1 – каркас; 2 – электрододержатель; 3 – корзина; 4 – траверса;
5 – механизм подъёма и поворота свода; 6 – гидравлический цилиндр;
7 – свод

Загрузка шихты.

При выплавке стали в печах малой и средней ёмкости шихта состоит преимущественно из стального лома (на 90–100 %). Для повышения содержания углерода в шихту вводят чугун (< 10 %), а также электродный бой или кокс. Чтобы совместить удаление части фосфора при плавлении шихты в завалку рекомендуется добавлять 2–3 % извести. Загрузку ведут бадьями или корзинами. Необходима плотная укладка шихты, это улучшает её проводимость, обеспечивает устойчивое горение дуги, ускоряет плавление. Для уменьшения угара кокс и электродный бой кладут под слой крупного лома.

Плавление.

После окончания завалки электроды опускают почти до касания с шихтой и включают ток. Под действием высокой температуры дуги шихта под электродами плавится, жидкий металл стекает вниз, накапливаясь в центральной части подины. Электроды постепенно

опускаются, проплавляя в шихте «колодцы» и достигая крайнего нижнего положения. По мере увеличения количества жидкого металла электроды поднимаются. Это достигается при помощи автоматических регуляторов для поддержания определенной длины дуги. Плавление ведут при максимальной мощности трансформатора. Во время плавления происходит окисление составляющих шихты, формируется шлак, происходит частичное удаление в шлак фосфора и серы. Окисление примесей осуществляется за счёт кислорода воздуха, окалины и ржавчины, внесенных металлической шихтой. Для ускорения плавания иногда применяют газокислородные горелки, вводимые в рабочее пространство через под или стенки печи, позволяющие вводить в жидкий металл кислород. При расходе кислорода 4–6 м²/т длительность плавания сокращается на 10–20 мин. Продолжительность периода плавки определяется мощностью трансформатора и составляет от 1,1 до 3,0 ч. Расход электроэнергии за время плавания составляет 400–480 кВт·ч/т.

Окислительный период.

Задачи окислительного периода: уменьшить содержание в металле водорода и азота; фосфора до 0,01–0,015 %; нагреть металл до температуры близкой к температуре выпуска. Кроме того, за время периода окисляют углерод до нижнего предела его содержания в выплавляемой стали. За счет кипения (выделения пузырьков СО при окислении углерода) происходит дегазация металла и его перемешивание, что ускоряет процессы дефосфорации и нагрева. Окисление примесей ведут, используя либо железную руду (окалину, агломерат), либо газообразный кислород. За все время плавания и окислительного периода в шлак удаляется до 30–40 % серы, содержащейся в шихте. При кипении вместе с пузырьками СО из металла удаляются водород и азот. Этот процесс имеет большое значение для повышения качества стали, поскольку в электропечи в зоне электрических дуг идет интенсивное насыщение металла азотом и водородом. В связи с этим сталь обычно содержит азота больше, чем мартеновская и кислородно-конвертерная сталь. Окислительный период заканчивается тогда, когда углерод окисляется до нижнего предела его содержания в выплавляемой марке стали, а содержание фосфора снижено до 0,01–0,015 %. Период заканчивают сливом окислительного шлака. Полное скачивание окислительного шлака необходимо, чтобы содержащийся в нем фосфор не перешел обратно в металл во время восстановительного периода.

Восстановительный период.

Задачи восстановительного периода: раскисление металла и удаление серы; доведение химического состава стали до заданного; корректировка температуры; введение в металл нужных легирующих компонентов. Раскисление металла проводится с целью получения

необходимых свойств стали, уменьшения содержания окислов железа в шлаке, получения стали с пониженным содержанием неметаллических включений. В восстановительный период в печь вводят в определённой последовательности ферромарганец, ферросилиций, известь, плавиковый шпат и шамотный бой и др. Для улучшения перемешивания шлака и металла и интенсификации медленно идущих процессов перехода в шлак серы, кислорода и неметаллических включений в восстановительный период рекомендуется применять электромагнитное перемешивание, особенно на большегрузных печах, где удельная поверхность контакта металл–шлак значительно меньше, чем в печах малой емкости. Длительность восстановительного периода составляет 40–100 мин. За 10–20 мин. до выпуска проводят корректировку содержания кремния в металле, вводя в печь кусковой ферросилиций. Для конечного раскисления за 2–3 мин. до выпуска в металл присаживают 0,4–1,0 кг алюминия на 1 т стали. Выпуск стали из печи в ковш производят совместно со шлаком. Интенсивное перемешивание металла со шлаком в ковше обеспечивает дополнительное рафинирование – из металла в белый шлак переходит сера и неметаллические включения. При выплавке легированных сталей в дуговых печах в конце периода расплавления в сталь вводят легирующие добавки. Хром и марганец вводят в металл после слива окислительного шлака в начале восстановительного периода, никель вводят в завалку, а молибден добавляют в конце плавления или в начале окислительного периода. Вольфрам обычного вводят в начале восстановительного периода, не позднее, чем за 30 мин. до выпуска стали. Легирование стали феррованадием производят за 15–35 мин. до выпуска, ферросилицием – за 10–20 мин. до выпуска. Ферротитан вводят в печь за 5–15 мин. до выпуска, либо в ковш. Алюминий вводят за 2–3 мин. до выпуска в ковш. После легирования металл выливается в ковш для разливки стали.

Длительность плавки.

Плавка в крупных печах длится 4–6 ч: из них 1,5–2,5 ч длится расплавление и 2–4 ч – окисление и рафинирование металла. Режимы работы печи и стадии технологического процесса могут быть различными в зависимости от вида скрапа (металлического лома), шихты, состава футеровки, применения легирующих компонентов.

Выплавка стали методом переплава.

На металлургическом заводе отходы легированной стали разливаемой в изложницы, достигают 25–40 %. По мере накопления отходов выплавляют сталь методом переплава. Плавку ведут без окисления или с непродолжительной продувкой кислородом, что позволяет сохранить значительную часть содержащихся в отходах ценных легирующих элементов. При плавке без окисления углерод и фосфор не окисляются, поэтому содержание фосфора в шихте не

должно быть выше его допустимых пределов в готовой стали, а содержание углерода на 0,05–0,1% ниже, чем в готовой стали. В шихту помимо легированных отходов вводят мягкое железо – шихтовую заготовку с низким содержанием углерода и фосфора и, при необходимости, феррохром и ферровольфрам. Загрузку и плавление шихты производят как при обычной плавке; в период плавления загружают 1–1,5 % извести или известняка. После расплавления шлак, как правило, не скачивают, сразу приступая к проведению восстановительного периода. При этом раскисление, десульфурацию и легирование металла производят обычным способом. При диффузионном раскислении из шлака восстанавливается хром, вольфрам и ванадий. Если после расплавления шлак получился густым из-за высокого содержания окиси магния, его скачивают и наводят новый. При выплавке стали методом переплава сокращается расход ферросплавов, на 10–30 % возрастает производительность печи, на 10–20 % сокращается расход электроэнергии и электродов.

Выплавка высококачественных сталей по упрощенной технологии с последующим внепечным рафинированием стали.

Используются следующие технологии:

- плавка с рафинированием металла в ковше печным шлаком;
- плавка с рафинированием в ковше синтетическим шлаком;
- технология с продувкой в ковше порошкообразными реагентами;
- плавка с рафинированием и доводкой металла вне печи.

Общим для всех разновидностей второго направления технологии является стремление использовать крупные печи в основном для расплавления шихты, нагрева металла и проведения окислительных процессов – дефосфорации и обезуглероживания; иногда в печи проводят также легирование и формирование требуемого перед выпуском состава шлака.

Плавка с использованием металлизированных окатышей.

Основу окатышей (так называемой губки) составляет железо с содержанием углерода от 0,2–0,5 до 2 %, они содержат также некоторое количество невосстановленных окислов железа и пустую породу (в основном, SiO_2 и Al_2O_3), количество которой должно быть не более 3–7 % массы окатышей. Отличительная особенность этого сырья является малое содержание серы, фосфора, меди, никеля, хрома и других примесей, обычно содержащихся в стальном ломе. Это облегчает и упрощает процесс выплавки и обеспечивает получение стали высокого качества и степени чистоты (суммарное содержание примесей в стали получается в несколько раз меньше, чем при выплавке из стального лома). Если содержание металлизированных окатышей в шихте не превышает 25–30 % от её массы, то технология электроплавки существенно не отличается от обычной. Переработка шихты, основу

которой составляют металлизированные окатыши требует применения специфической технологии. Особенности этой технологии являются:

- непрерывная загрузка окатышей со скоростью, пропорциональной подводимой в печь электрической мощности, причем загрузка должна начинаться после сформирования в печи ванны жидкого металла;

- совмещение периода плавления с окислительным (обезуглероживанием);

- упрощение технологии плавки в связи с малым содержанием в шихте вредных примесей – серы и фосфора.

Степень металлизации окатышей должна находиться в определенных пределах, обеспечивающих кипение ванны в процессе их загрузки и плавления. Оптимальное содержание окатышей в шихте составляет 60–70 % от её массы, при большем их содержании возрастает длительность расплавления и плавки в целом. Плавку начинают с загрузки стального лома, который в количестве 30–40 % от массы металлической шихты заваливают в печь одной порцией. Далее подают напряжение и после расплавления лома в сформировавшуюся жидкую ванну начинают непрерывную загрузку окатышей; обычно их загружают в зону электрических дуг с помощью автоматизированной системы через отверстие в своде печи. Скорость подачи окатышей согласуют с подводимой в печь электрической мощностью так, чтобы температура ванны была на 30–40 °С выше температуры плавления металла. Период загрузки и расплавления совмещают с окислительным, т. е. проводят его так, чтобы обеспечить непрерывное окисление углерода (кипение ванны). При этом благодаря перемешиванию ускоряется плавление окатышей, обеспечиваются дегазация ванны и получение в конце периода заданного содержания углерода в металле. По ходу плавления в печь загружают известь для ошлакования кислой пустой породы окатышей. Основность шлака в связи с низким содержанием в окатышах серы и фосфора может быть меньшей, чем при плавке на шихте из стального лома и составлять 1,5–2,0. В конце периода плавления необходимо получить требуемое в выплавляемой стали содержание углерода; при недостатке углерода прибегают к вдуванию в ванну карбюризаторов, избыточный углерод окисляют путем кратковременной продувки кислородом. После окончания плавления применяют различные варианты ведения заключительной части плавки. Один из них – нагрев металла до требуемой температуры и выпуск в ковш, где производят внепечную доводку стали и рафинирование; другой – проведение в печи кратковременной доводки, в течение которой проводят нагрев, раскисление и легирование.

Выплавка стали в кислых дуговых печах.

Электрические печи с кислой футеровкой обычно используют в литейных цехах при выплавке стали для фасонного литья. Преимуществом кислых печей по сравнению с основными является более высокая стойкость футеровки, наряду с этим стоимость кислых огнеупоров примерно в 2,5 раза ниже стоимости основных. При плавке стали для фасонного литья восстановительный период обычно отсутствует, длительность плавки меньше, чем в основной той же емкости. По этой причине, а также в связи с меньшей теплопроводностью кислой футеровки, более низким является и расход электроэнергии. Основным недостатком кислых печей является то, что во время плавки из металла не удаляется сера и фосфор. Удаление газов. Во время плавки из электропечи выделяется большое количество запыленных газов. Температура газов составляет 900–1400 °С, содержание пыли в период продувки ванны кислородом доходит до 100 г/м³ газа. Количество газов, выделяющихся, например, из печи, емкостью 100 т в период продувки кислородом, достигает 9–10 тыс. м³/ч. Для создания нормальных условий работы в сталеплавильном цехе необходимы улавливание и очистка отходящих газов. В старых цехах с печами малой емкости применяются отсасывающие зонты, установленные над сводом. Однако они громоздки, не обеспечивают полное сгорание газов. В настоящее время газы отводят через отверстие в своде с последующей очисткой от пыли. Наибольшее распространение получила мокрая газоочистка с использованием труб Вентури. Технические характеристики ДСП переменного тока прямого действия приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики печей прямого действия

Тип печи	Номинальная мощность трансформатора, кВА	Напряжение первичной обмотки, кВ	Пределы изменения U ₂ , В	Ток вторичной обмотки, кА	Удельный расход ЭЭ, кВт/т
ДС-0,5	400	6; 10	213–110	1,085	650
ДСП-0,5ИЗ	630	6; 10	216–98	нд	560
ДСП-1,5	1000	6; 10	225–118	2,57	550
ДСП-1,5ИЗ	1250	6; 10	225–103	нд	480
ДСП-3	1800	6; 10	242–122,5	2,25	525
ДСП-6ИЗ	2000	6; 10	243–116	нд	465
ДСП-6	2800	6; 10	257–197,5	6,3	нд
ДСП-12	5000	6; 10	278–202	10,4	500
ДСП-12НЗ	8000	6; 10	318–120	нд	435
ЖДСП-20	9000	6; 10	318–116	16,35	470
ДСП-25	16000	6; 10	384–148	24–10	нд
ДСП-25Н2	15000	35	370–128	нд	430

Окончание таблицы 4.2

ДСП-40	15000	35	386–126	23,5	нд
ДСП-50Н2	2000	35	407–144	нд	415
ДСП-50	20000–29150	35	486–152	27,7–34,6	460–440
ДСП-80	32000	35	478–161	38,8	420
ДСП-100	45000	35	591,5–164,1	43,9	нд
ДСП-120	45000	35	нд	нд	400

Примечание: нд – нет данных

4.4 Дуговые электрические печи косвенного действия

Дуговая печь косвенного действия предназначена для переплава цветных металлов и их сплавов, а также для выплавки некоторых сортов чугуна и никеля. Ее основное преимущество – небольшой угар металла, так как электродуговой разряд не соприкасается непосредственно с переплавляемым материалом. Однофазная дуговая печь косвенного действия (рис. 4.4) представляет собой горизонтально расположенную ванну, футерованную изнутри огнеупором.

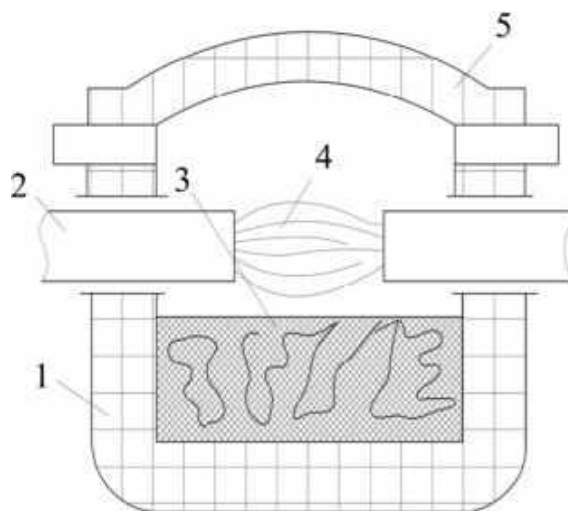


Рисунок 4.4 – Конструкция дуговой печи косвенного действия:

- 1 – огнеупорный материал в горизонтально расположенной ванне;
- 2 – электрод; 3 – расплавляемый материал; 4 – электрическая дуга;
- 5 – свод

В противоположных боковых стенках установлены графитированные электроды, перемещаемые по мере обгорания механизмами подачи. Переплавляемый материал загружают на дно ванны через отверстие в боковой поверхности корпуса. На электроды подается напряжение, затем они сводятся до соприкосновения и возникновения тока в цепи и затем разводятся, что приводит к

возникновению электрической дуги. Вследствие поглощения выделяемой дугой энергии происходит нагрев и расплавление металла. После расплавления металла печь наклоняется механизмом наклона и из неё сливается расплав. Регулирование мощности печи производится путем изменения величины тока и длины дуги.

К электрооборудованию дуговых печей относят: печной трансформатор, регулировочный реактор и электропривод механизма подачи электродов. Ток к электродам подводится гибкими кабелями от печного трансформатора. Регулирование расстояния между электродами осуществляют с помощью электропривода, управляемого персоналом дистанционно, или автоматическим регулятором режима. Дуговые печи косвенного действия производят емкостью 0,25 и 0,5 т. Они снабжены трансформаторами мощностью 175–250 и 250–400 кВА. Режим работы дуговой печи зависит от режима процесса плавки. При расплавлении металлического лома печь работает на максимальной мощности. При доводке жидкого металла до требуемого химического состава мощность печи сравнительно невелика. Режим печи регулируется либо изменением напряжения на электродах, либо изменением длины дуги, т. е. регулируя силу тока. Для изменения подводимого к печи напряжения трансформатор снабжается устройством регулирования напряжения, для чего на первичной обмотке предусматриваются одно основное и несколько дополнительных ответвлений (для малых печей предусматривают 2–4 ступени регулирования напряжения; для крупных печей – до 25 ступеней). Изменение длины дуги осуществляют опусканием или подъёмом электродов с помощью автоматической системы. Печь подключают к трехфазной сети промышленной частоты напряжением 6–35 кВ. С целью уменьшения потерь электроэнергии печные трансформаторы устанавливают на минимальном расстоянии от печи. В цепь высокого напряжения включают реактор (дроссель), который ограничивает силу тока при коротком замыкании электродов на металл.

4.5 Электрооборудование дуговых сталеплавильных печей (ДСП)

К основному электрооборудованию ДСП относят:

- печь с электродами и ванной;
- понижающий трансформатор;
- дроссели;
- короткую сеть;
- коммутационную, измерительную и защитную аппаратуру.

Принципиальная электрическая схема показана на рисунке 4.5.

В печных установках применяются трансформаторы и дроссели, изготовленные в виде отдельных аппаратов, а также трансформаторы со встроенными дросселями.

В дуговых печных установках различают главную и вспомогательные цепи тока. К главной цепи электрического тока относится основное силовое электрооборудование и электрические дуги печи. Вспомогательными считаются цепи управления, измерения, защиты, автоматики и др.

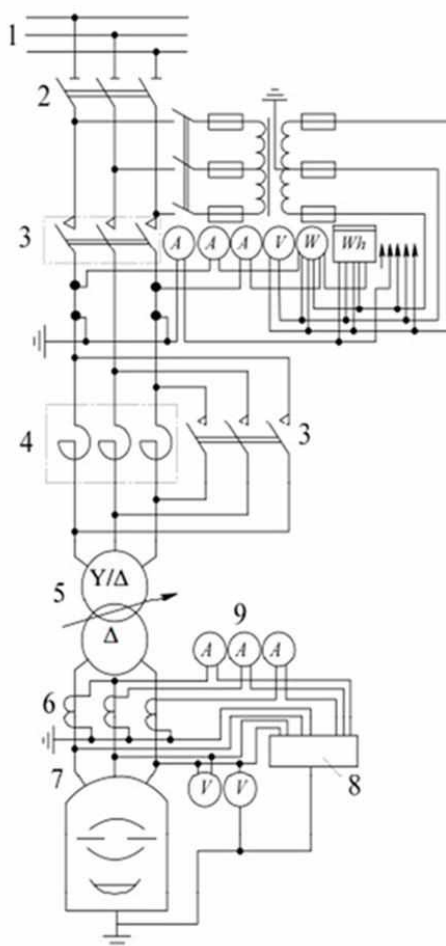


Рисунок 4.5 – Схема электрических соединений дуговой печной установки:

- 1 – высоковольтные шины; 2 – разъединитель; 3 – выключатели;
 4 – реактор; 5 – печной трансформатор; 6 – измерительные трансформаторы; 7 – короткая сеть; 8 – автоматический регулятор мощности; 9 – приборы контроля; А – амперметр; V – вольтметр; W – ваттметр; Wh – счетчик; Y/Δ – соединение обмоток трансформатора

Главная цепь включает первичную и вторичную обмотки цепи силового трансформатора. Первичная цепь состоит из последовательно соединенных аппаратов высокого напряжения, дросселя и первичной

обмотки индивидуального печного трансформатора. Вторичная цепь состоит из последовательно соединенных вторичной обмотки трансформатора, токопроводов короткой сети, электродов и электрических дуг. Все части цепи располагаются вне печи и называются подводящей электрической сетью.

Подключение питающей линии высокого напряжения от ввода осуществляется через разъединители и выключатели высокого напряжения, установленные вместе с защитными аппаратами в распределительном устройстве электропечной установки.

Электроснабжение трансформаторов печной подстанции производится от сети 6 (10)–35 кВ, а для мощных подстанций – 110 кВ. Цепи измерения и защиты подключены к трансформаторам тока и напряжения. Для поддержания оптимального режима печи устанавливаются автоматические регуляторы мощности печи. Такие регуляторы воздействуют на механизм передвижения электродов, изменяют длину дуги и поддерживают заданное значение мощности дуговой печи. Для повышения точности регулирования созданы автоматизированные системы управления ДСП. Печные трансформаторы для печей небольшой и средней мощности выполняются трехфазными. Для печей большой мощности применяются группы однофазных трансформаторов, которые позволяют получить повышенный коэффициент мощности за счет более рациональной конструкции короткой сети и независимого регулирования мощности и напряжения каждой фазы.

Печные трансформаторы имеют следующие особенности:

- высокое значение номинального тока на стороне низкого напряжения (до десятков и сотен килоампер);
- большой коэффициент трансформации;
- число ступеней и диапазон регулирования напряжения гораздо больше, чем у силовых трансформаторов (напряжение регулируется примерно на 500 %);
- трансформаторы обладают высокой стойкостью против эксплуатационных коротких замыканий с кратностью тока $(2,5-3) \cdot I_n$, имеют высокую механическую прочность.

Мощные печные трансформаторы имеют принудительное охлаждение с искусственной циркуляцией масла через теплообменник, снабжены устройствами РПН (регулируемым под нагрузкой напряжением), производящими до 160 переключений в сутки. Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются по схеме «треугольник–треугольник» с возможностью переключения по схеме «треугольник–звезда», что позволяет переводить печь с линейного напряжения на фазное. Регулирование напряжения на электродах печи и её электрических характеристик осуществляется с помощью устройства ПБВ (регулирование напряжения без возбуждения) или РПН.

Переключение без возбуждения применяется на печных трансформаторах малой и средней мощности. В трансформаторах большой мощности переключение осуществляется под нагрузкой, для чего трансформатор снабжается автоматическим регулятором напряжения.

Дроссель, или реактор служит для ограничения бросков тока при эксплуатационных коротких замыканиях и стабилизации горения дуг за счет создания падающей характеристики цепи питания. У работающих непрерывно дуговых печей режим работы дросселя прерывистый, условия его работы тяжелые, поэтому он должен удовлетворять повышенным требованиям термической и механической прочности. Дроссель включается между сетью и линейными зажимами обмотки высокого напряжения трансформатора или в «фазу» – последовательно с данной обмоткой. Чаще всего дроссель располагают в общем кожухе с печным трансформатором.

Для передачи электрической энергии от вторичной обмотки трансформатора в рабочее пространство ванны служит короткая сеть дуговых печей. Активное и индуктивное сопротивления являются составными частями общего сопротивления участков печной установки. Они оказывают важное влияние на такие энергетические показатели, как мощность, коэффициент мощности, энергетический КПД и др.

Короткая сеть представляет собой токопровод от вторичных обмоток трансформатора до электродов дуговой печи. По этой сети протекают очень большие токи (до 100 кА и выше), поэтому токопроводы короткой сети изготавливают большого сечения в виде пакетов медных лент, медных шин или труб с водяным охлаждением.

Короткая сеть должна иметь минимальную длину и рациональное расположение проводников как для снижения индуктивности, так и для равномерной загрузки фаз и трансформатора (рис. 4.6).

Короткая сеть имеет четыре основных участка: шинные пакеты, служащие для передачи напряжения от выходов низкого напряжения печного трансформатора до неподвижных башмаков; гибкую часть (участок гибких кабелей); трубошины (от подвижных башмаков до головок электрододержателя); электроды.

В электрической схеме дуговой сталеплавильной печи необходимо предусматривать элементы защиты от токов перегрузки и аварийного короткого замыкания.

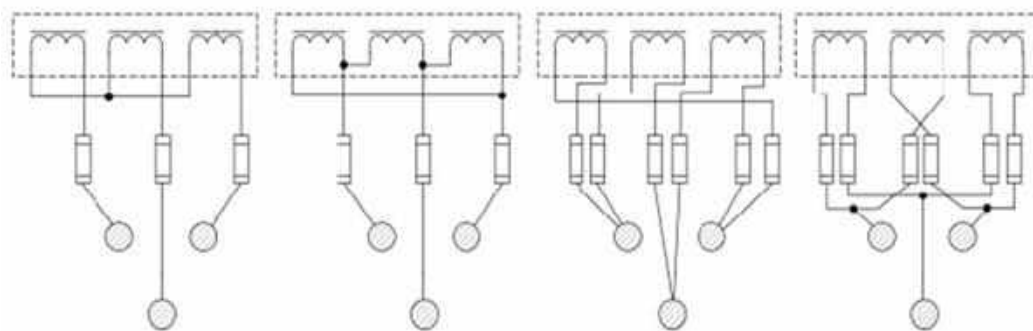


Рисунок 4.6 – Варианты схем соединения вторичных токопроводов дуговой сталеплавильной печи

Защиту от перегрузок обычно включают на стороне низкого напряжения с помощью максимальных токовых реле с зависимой выдержкой времени. Защита от токов аварийного короткого замыкания осуществляется с помощью максимальных токовых реле мгновенного действия на стороне высокого напряжения.

4.6 Электрические характеристики дуговых печей косвенного и прямого действия

Дуговая электропечь работает, как правило, в круглосуточном режиме с остановками на ремонт и профилактический осмотр. Технологический процесс предполагает периодическое чередование плавки с отключением печи для слива металла, последующей заправки и загрузки компонентов. Большая мощность печных агрегатов предусматривает и большое потребление электрической энергии, поэтому перед службой главного энергетика промышленного предприятия и технологами стоят задачи выбора оптимального режима работы печи, позволяющего обеспечить как высокую производительность печи, так и минимальный расход электроэнергии.

Поскольку оптимальные значения этих показателей часто не совпадают, установление рациональных условий работы дуговой печи основывается на анализе энергетических характеристик. Электрические режимы работы дуговой сталеплавильной печи характеризуются расчетными величинами токов, напряжений, сопротивлений и мощностей. При изменениях длин дуг и их сопротивлений происходят изменения напряжения, причем эти изменения колеблются от нуля (короткое замыкание) до максимума при обрыве дуги.

В зависимости от силы тока в цепи электроплавильной печи различают следующие режимы работы:

- режим холостого хода (дуги не горят, I равен 0);

- нормальный режим ($I = I_n$);
- режим эксплуатационного короткого замыкания ($I = I_{кз}$).

По цикличности и времени нагрузки печи различают непрерывный режим и режим с нагрузкой, меняющейся в течение плавки. Производительность дуговой сталеплавильной печи и расход электроэнергии зависят от мощности дуг, потерь электроэнергии и связаны с рабочим током установки.

Более цельную картину изменения энергетических показателей установки с изменением режима работы печи можно получить при анализе рабочих, тепловых и электрических характеристик, таких как полная активная мощность установки, мощность дуги, электрические и тепловые потери, электрический КПД, коэффициент мощности, расход электроэнергии на плавку, производительность, время плавки.

Первые теоретические расчеты параметров дуговых плавильных печей производят на основании их схем замещения. В расчетах электрические элементы цепи заменены активными и индуктивными сопротивлениями, взятыми такими, что при одинаковых напряжениях потребляемые токи и мощности схемы замещения и реальной цепи равны. В схемах замещения электрические дуги заменяют активными сопротивлениями. На рисунке 4.7 представлена полная схема замещения дуговой сталеплавильной печи и ее короткая сеть.

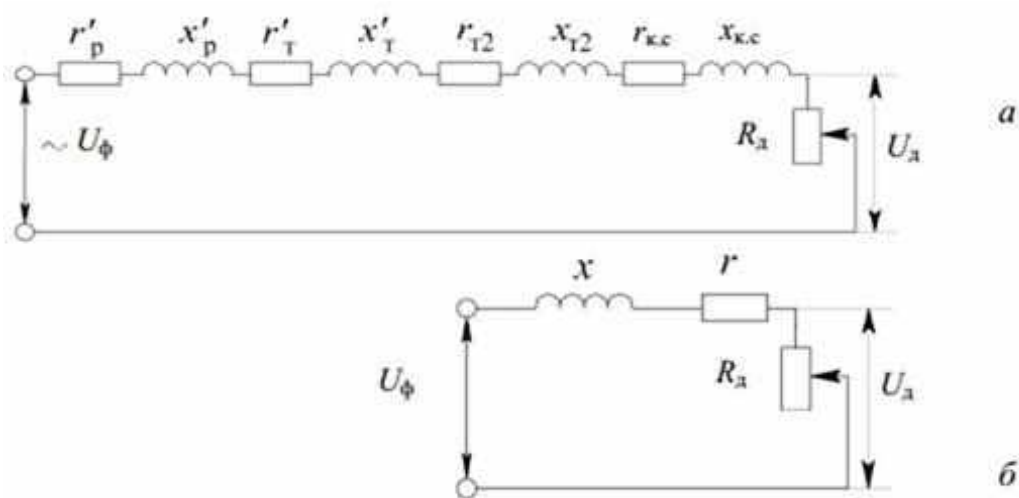


Рисунок 4.7 – Схема замещения дуговой сталеплавильной печи:

а – полная схема замещения; б – короткая сеть;

r'_p, x'_p – приведенные сопротивления реактора; r'_m, x'_m – приведенные сопротивления первичной обмотки трансформатора; r_{m2}, x_{m2} – активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки трансформатора;

$r_{кс}, x_{кс}$ – активное и индуктивное сопротивление короткой сети;

U_ϕ – фазное напряжение сети; R_d – сопротивление электрической дуги;

U_d – напряжение на дуге; x – индуктивное сопротивление; r – активное сопротивление

Короткая сеть и электроды в схеме замещения представлены активным r и индуктивным x сопротивлениями. Печной трансформатор заменяют совокупностью активных и индуктивных сопротивлений.

Рабочие параметры дуговой сталеплавильной печи находят опытным путем при рабочей нагрузке печи, аналитическим расчетом с использованием известных методик и графически – по круговым диаграммам.

Электрические параметры дуговой сталеплавильной печи и её технологические показатели представлены на рисунке 4.8, из которого следует, что потери в сети увеличиваются пропорционально квадрату тока, а с ростом тока снижается электрический КПД печи и коэффициент мощности.

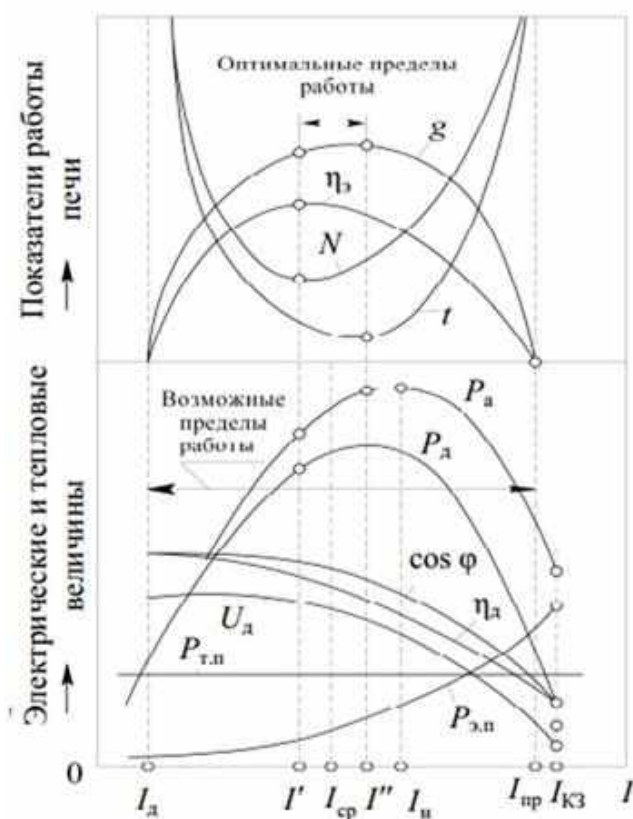


Рисунок 4.8 – Электрические и рабочие характеристики дуговой сталеплавильной печи:

- g – производительность печи; $\eta_{э}$ – электрический КПД;
- N – удельный расход электроэнергии; t – время расплавления;
- $P_{а}$ – полная активная мощность дуговой сталеплавильной печи;
- $P_{д}$ – мощность дуги; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности;
- $U_{д}$ – напряжение на дуге; $\eta_{д}$ – КПД дуги; $P_{т.п}$, $P_{э.п}$ – тепловые и электрические потери; $I_{д}$ – ток дуги; $I_{ср}$ – величина тока при оптимальном режиме работы; $I_{н}$ – величина тока при нормальном режиме работы; $I_{пр}$ – предельное значение рабочего тока; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания

Мощность дуги P_d и полная активная мощность дуговой сталеплавильной печи P_a увеличиваются до максимума и затем резко падают. Удельный расход электроэнергии N имеет минимум при токе I' . Это же значение тока соответствует максимуму полного КПД печи. Ток I' определяет режим наименьшего удельного расхода электроэнергии. Ток I'' показывает максимальную мощность дуг и наименьшее время расплавления t . Он же позволяет найти режим максимальной производительности.

Электрические и рабочие характеристики дуговой сталеплавильной печи дают возможность проанализировать её работу и определить оптимальный режим эксплуатации применяемого электрооборудования.

4.7 Режимы работы дуговых сталеплавильных печей

ДСП относятся ко второй категории по надёжности электроснабжения. Печи условно разделяют на три группы:

- печи малой ёмкости (0,5–6 т) с трансформаторами мощностью 1–3 МВА, подключаемыми к шинам 6–10 кВ заводских подстанций;
- печи средней ёмкости (10–50 т) с трансформаторами мощностью 3–15 МВА и напряжением первичной обмотки 6–10 кВ;
- печи большой ёмкости (80, 100 и 200 т) с трансформаторами мощностью 25–125 МВА на напряжения 35, 110, 220 кВ.

В мировой практике наблюдается тенденция увеличения ёмкости печей до 300–400 т с увеличением мощности печных трансформаторов до 150 МВА. Печи малой ёмкости применяются, в основном, в машиностроении. В литейных цехах расплавленный металл используют для производства фасонного литья. В ДСП металлургических заводов выплавляют углеродистые и высоколегированные стали и специальные сплавы. Углеродистые и низколегированные стали выплавляются, в основном, в печах большой ёмкости, высоколегированные стали – в печах средней и малой ёмкости. Печи работают непрерывно. Длительные отключения печи происходят только при её ремонтах. Число кратковременных отключений в процессе одной плавки достигает несколько десятков. Нагрузка ДСП непрерывно-циклическая. Цикличность работы характеризуется чередованием плавков с остановками печи для слива металла, заправки печи и завалки шихты.

Для плавки стали характерны три последовательно проходящих периода: расплавление, окисление, восстановление (рафинирование). Наибольшую мощность ДСП потребляет в период плавления шихты, который по времени длится от $1/3$ до $2/3$ времени плавки. На рисунке 4.9 показан график изменения средней мощности ДСП-100 с

трансформаторами мощностью 25 МВА за один технологический цикл плавки продолжительностью 4,5 ч. На графике видно несколько отключений агрегата на 10–20 мин. и указаны причины отключений. Технологические отключения на время от 1 до 10 мин не показаны (их число значительно больше и они увеличивают переменный характер нагрузки). На графике показаны усредненные нагрузки. В действительности нагрузка имеет неустойчивый резко переменный характер, неравномерный по фазам. ДСП являются причиной возникновения колебаний напряжения, несимметрии токов и напряжений и не синусоидальности напряжения.

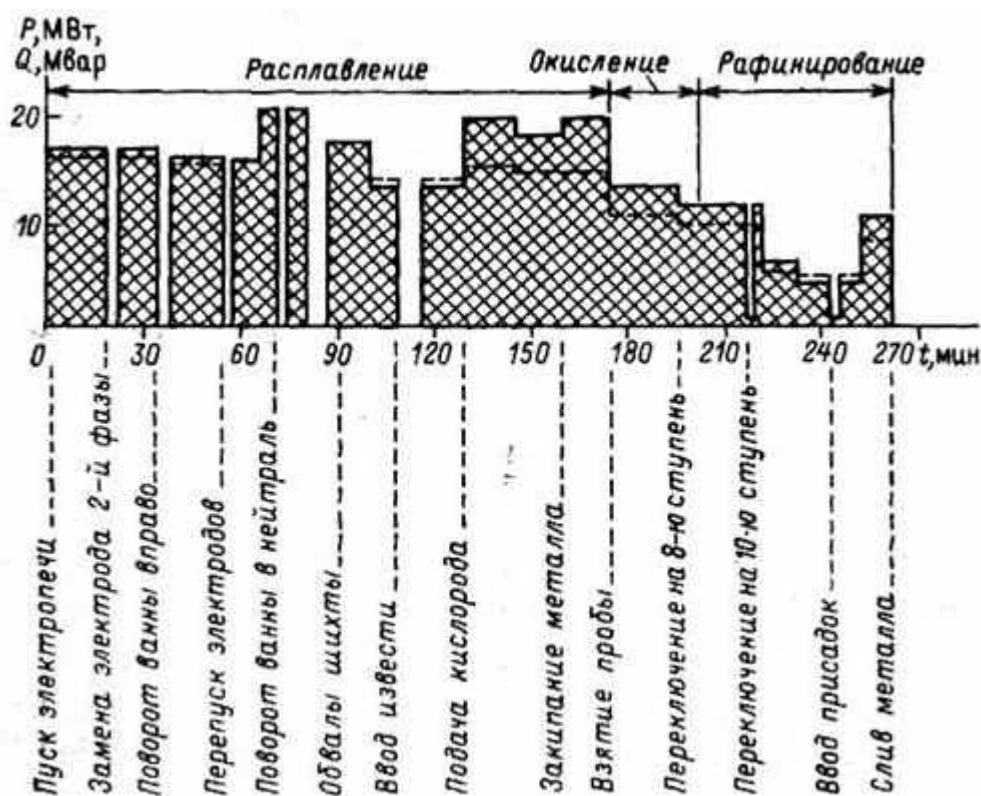


Рисунок 4.9 – График изменения средней мощности печи ДСП-100 за один технологический цикл плавки

Колебания напряжения вызываются колебаниями нагрузки, которые очень значительны, особенно в период расплавления шихты. На рисунке 4.10 представлены осциллограммы активной и реактивной мощности в фазах питающей сети при работе ДСП с трансформатором мощностью 63 МВА в период расплавления. Как видно из осциллограмм, изменение нагрузки печи происходит с частотой 1–12 Гц и носит характер нерегулярных колебаний, связанных с неустойчивым горением дуг. В соответствии с особенностями характеристик ДСП колебания реактивной мощности значительно превышают колебания активной мощности. Особенно значительны колебания нагрузки при

эксплуатационных коротких замыканиях, например, при погружении электродов в расплавленный металл. Значения колебаний могут достигать $(1,5-2)I_n$ – для печей большой емкости и $(2,5-3,5)I_n$ – для печей малой и средней емкости.

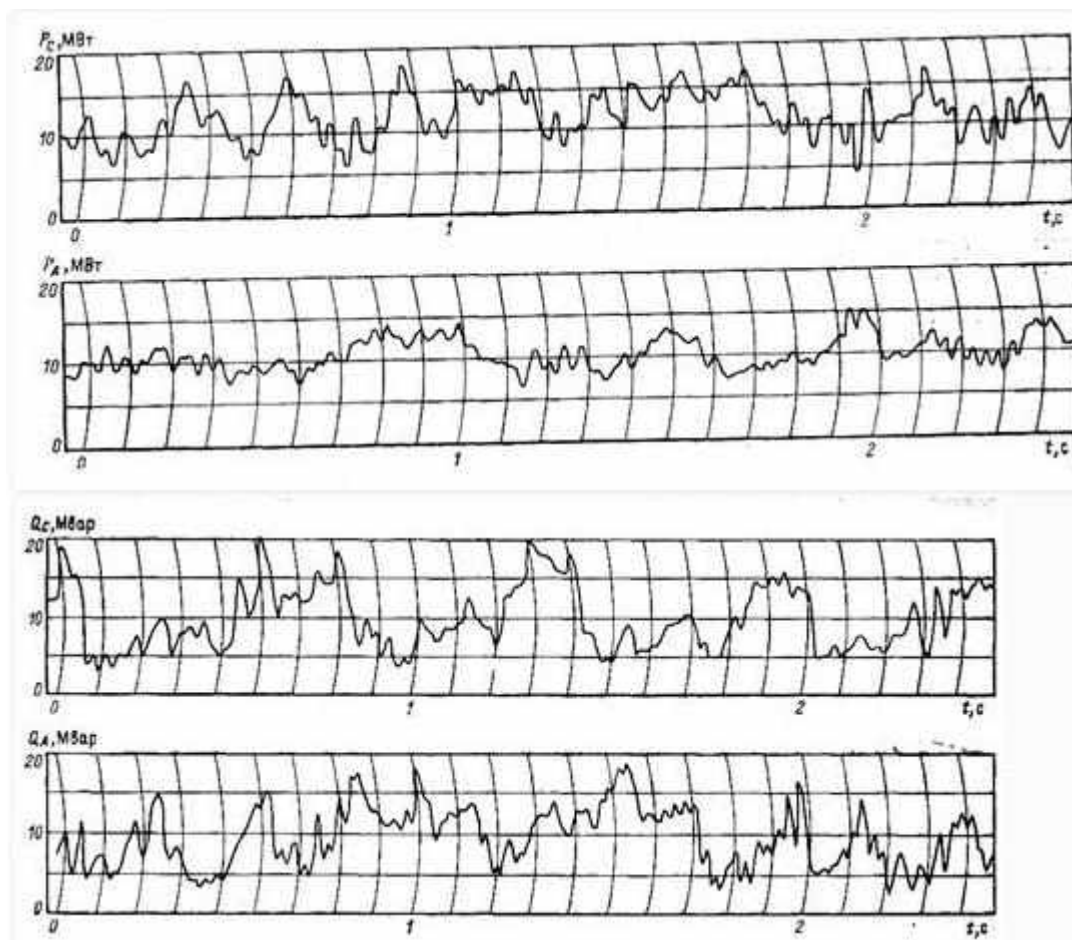


Рисунок 4.10 – Графики мгновенных значений активной (P) и реактивной (Q) мощностей фаз А и С печи ДСП-100 в период расплавления

Колебания нагрузки печей, особенно колебания реактивной мощности, вызывают значительные колебания напряжения в питающей сети, которые тем больше, чем больше мощность печного трансформатора и меньше мощность короткого замыкания в точке присоединения дуговой печи.

Несимметрия токов и напряжений.

По осциллограммам видно, что нагрузка по фазам сети неравномерна. Максимальное различие по фазам А и С составляет по активной мощности 9 МВт, по реактивной мощности – 8 МВАр (см. табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Значения нагрузки по фазам при работе печи в период расплавления шихты

Период времени, с	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,6	1,7
Фаза С: Р, МВт	12	10,5	10	10	9,8	17	8	10	15	16	16,5	9
Фаза А: Р, МВт	10	9,8	9,8	9,8	9	8	10	13	12	11	8	10
Фаза С: Q, МВАр	18	3	5	8	5	19	12	18	5	10	10	10
Фаза А: Q, МВАр	10	7	8	6	4,7	14	5	15	12	18	14	7,5

Несинусоидальность токов и напряжений.

Дуга и печной трансформатор имеют нелинейные вольтамперные характеристики. По отношению к внешней сети печь является источником высших гармонических составляющих и генерирует в сеть 3, 5, 7, 11 и т. п. гармоники.

С целью снижения вредного влияния дуговой сталеплавильной печи на работу электрической сети проводят обязательные организационно-технические мероприятия технологического и электроэнергетического характера: автоматическое регулирование тока и компенсацию реактивной мощности, уменьшение колебания напряжения по фазам, фильтрацию высших гармоник.

Технологические мероприятия предусматривают сортировку и подготовку скрапа, его равномерную загрузку, использование качественных электродов, использование вместе со скрапом обогащенной и частично восстановленной железной руды в виде окатышей и др.

В питающей сети в соответствии с требованиями ГОСТ 13109–97 (2002) (качество электроэнергии) должны быть предусмотрены следующие меры: применение повышенного напряжения 110–220 кВ; применение глубоких вводов ЛЭП на территорию промышленных предприятий; подключение печи в точке с большой мощностью короткого замыкания. Применяемые схемные решения для питания отдельных печей и цехов должны предусматривать связь с другими потребителями только на напряжении 110–220 кВ схемы электроснабжения предприятия.

4.8 Электромагнитное перемешивание стали в дуговых печах

При расплавлении большей части шихты эффективным средством ускорения процесса плавки является перемешивание металла в ванне.

Оно выравнивает химический состав, ускоряет удаление газов и выведение вредных примесей из расплава. Жидкий металл в дуговой сталеплавильной печи приводится в движение с помощью электромагнитных устройств переменного тока с вращающимся магнитным полем.

Электромагнитные перемешиватели изготавливают в виде цилиндрических или плоских конструкций: одни охватывают боковую поверхность расплава, другие располагают под донной частью ванны. При расположении перемешивателя под дном ванны в зависимости от применяемой частоты тока, конструкции статора и направления движения магнитного поля используют разные схемы движения расплава, наиболее эффективные для разных периодов плавки. Скорость движения и направление расплава зависит от тока индуктора и составляет 0,2–1 м/с. Магнитное перемешивание возможно только при низких частотах питающего тока и зависит от глубины ванны расплава. Глубина расплава в печах некоторых типов приведена в таблице 4.4. При указанных параметрах жидкой ванны её эффективное перемешивание будет при частотах 0,4–1,0 Гц.

Таблица 4.4 – Глубина расплава в печах некоторых типов

Марка печи	Диаметр зеркала, м	Глубина расплава, м	Марка печи	Диаметр зеркала, м	Глубина расплава, м
ДСП-5 МТ	2,4	0,33	ДСП-50	5,05	0,995
ДСП-12	3,4	0,555	ДСП-100	5,16	1,08
ДСП-12	4,0	0,775	ДСП-200	6,96	1,48

Электромагнитные перемешиватели состоят из трех элементов: индуктора, источника питания и системы охлаждения. Характеристики статоров представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Характеристики статоров

Параметры статора	Емкость печи, т			
	25	50	100	200
Тип статора	СЭП1-25	СЭШ-50	СЭП1-100	СЭП1-200
Номинальная частота, Гц	0,9	0,65	0,5	0,4
Мощность фазы, кВА	575	550	860	525
Сила тока, кА	2,5	2,4	2,4	2,0
Напряжение фазы, В	115	115	180	130
Коэффициент мощности	0,5	0,59	0,58	0,6

Источниками питания статоров являются электромагнитные преобразователи (ЭМП) и тиристорные преобразователи частоты. Охлаждение статора возможно водой, если он изготовлен из медной трубки, или воздухом – по специальным каналам внутри обмотки. Стоимость установки ЭМП составляет от 30 до 100 % стоимости печи, а

расход энергии в ней на 1 т произведенной стали – 3–5 % от полного расхода энергии.

4.9 Автоматизация управления режимом работы дуговой электрической печи

К основным задачам автоматизированного управления процессом плавки в дуговых сталеплавильных печах относят следующие:

- централизованный контроль за ходом технологического процесса с сигнализацией и регистрацией отклонений от заданных параметров;
- контроль за работой оборудования с сигнализацией и регистрацией неисправностей и непредвиденных остановок;
- управление металлургическим процессом;
- управление энергетическим режимом;
- сбор и обработка информации с выдачей необходимой документации.

Задачи управления металлургическим процессом:

- расчёт оптимального состава шихты;
- управление загрузкой печи;
- расчёт кислорода, легирующих и шлакообразующих добавок;
- прогнозирование момента окончания технологических периодов.

Задачи управления энергетическим режимом:

- максимальное использование мощности печи;
- минимальные удельные расходы энергоносителей;
- нормальная эксплуатация электрического и другого печного оборудования.

В автоматическом режиме решаются задачи:

- поддержание мощности печи на уровне, определяемом программой;
- регулирование напряжения трансформатора;
- быстрое устранение всех отклонений от нормального режима.

Поставленные задачи решаются с помощью автоматических регуляторов мощности, тока, напряжения, трансформаторов.

Токовые регуляторы просты, надежны и эффективны. Так как текущее значение рабочего тока каждой фазы контролируется, то при управлении возможно использовать обычные стабилизирующие системы, в которых формирование сигнала рассогласования пропорционально разности заданного тока и текущего тока.

Несмотря на простоту, данный метод обладает существенным недостатком, так как при автоматическом управлении при зажигании дуги возможна поломка электрода.

Кроме того, зависимость величины тока дуги от длины дуги L_d имеет нелинейный вид, что затрудняет функционирование токового регулятора.

Дифференциальный регулятор обеспечивает управление путем поддержания определённого соотношения между величиной тока дуги и напряжением, подаваемым на электрод.

Обычно при выбранной ступени напряжения регулирование электрического режима осуществляется и в токовом регуляторе и в дифференциальном регуляторе перемещением электрода, то есть изменением длины дуги. Но длину дуги измерить очень сложно, а ток можно мерить с любой точностью.

Существует множество способов технической реализации управления электрическим режимом. Наиболее простой метод управления электрическим режимом – метод с использованием электромашинных усилителей (ЭМУ), которые обеспечивают перемещение электродов с небольшой скоростью (до 30 мм в секунду), хотя современные тиристорные и электрогидравлические приводы обеспечивают скорость до 300 мм/с при диаметре электродов до 600 мм.

Контроль уровня сыпучих материалов: извести, раскислителей и легирующих добавок в основных резервных и расходных бункерах обычно осуществляется позиционными датчиками, которые фиксируют максимальный и минимальный уровни материалов в бункерах.

Контроль уровня и наличия материала (веса) в загрузочном бункере для подачи материала через загрузочный люк в ДСП производится с помощью тензометрических преобразователей. Загрузочный люк обычно находится в закрытом положении, при его открытии включается азотная завеса.

Регулируется расход кислорода на продувочные фурмы и газокислородные фурмы. Регулирование осуществляется по пропорционально-интегральному закону с использованием контроллера. Количество кислорода, поданного в ДСП, используется для прогнозирующих расчетов содержания углерода в расплавленном металле. По количеству кислорода возможно прекращение продувки металла и переход к периоду рафинирования (к восстановительному периоду).

Отсечка подачи кислорода при завершении продувки осуществляется быстроходными исполнительными или пневматическими или гидравлическими исполнительными механизмами.

Выполняется измерение напряжения питания каждого электрода с низкой стороны печного трансформатора. Параметр используется в

схеме регулирования энергетического режима в каждой фазе питающего напряжения. Для измерения напряжения и гальванического разделения цепей питания и контроля используются измерительные трансформаторы напряжения (ИТН).

Контролируется перемещение каждого электрода, что необходимо для управления подводимой электрической мощностью для выбранной ступени напряжения. Перемещение электрода на современных печах осуществляется с помощью реечных механизмов или гидравлическими системами. В процессе плавки, особенно в период расплавления, дуги горят неустойчиво. Для ликвидации обрывов дуги и технологических коротких замыканий скорость перемещения электрода должна быть достаточно большой (автоматический режим 80–120 мм/мин, ручной режим – до 300 мм/мин).

Контролируется химический состав металла в дуговых сталеплавильных печах. Контроль осуществляется отбором проб и химическим анализом этих проб.

Контроль химического состава металла выполняется с использованием современных технических средств. Для ускорения процесс определения состава металла современные квантометры устанавливаются на мобильные установки (автомобили) и размещаются непосредственно в цехе.

Определяется состав отходящих плавильных газов на содержание CO, CO₂ и H₂. Данные анализы используются для прогнозирования содержания углерода в стали.

Важна автоматизация не только электрического, но и теплового режима дуговых сталеплавильных печей.

Особенно тяжелые температурные условия возникают в рабочем пространстве ДСП в восстановительный период, когда дуги обнажены, металл нагрет практически до температуры выпуска, и все процессы разрушения огнеупорной футеровки (разъедания шлаком огнеупорной кладки) происходят с максимальной скоростью, которая достигает 15–25 мм/час.

Для сохранения целостности огнеупорной кладки и достижения требуемой температуры металла управление электрическим режимом как источником тепловой энергии сводится к коррекции электрического режима по температуре металла или рабочей кладки. Существует несколько способов формирования величины корректирующего воздействия электрического режима по температурному состоянию.

Метод коррекции директивного значения подводимой к печи мощности путем расчёта корректирующей поправки, которая определяется в зависимости от отклонения действительного значения температуры металла от заданного значения соотношением в соответствии с выражением $P(\tau) = P_3(\tau) \pm \Delta P$

$$\Delta P = \frac{G \cdot C \cdot (t_3 - t_M(\tau))}{860 \cdot \Delta\tau \cdot h}, \quad (4.1)$$

где $P_3(\tau)$ – заданное значение подводимой мощности; ΔP – корректирующая поправка; C – удельная теплоемкость; 860 – эмпирический коэффициент, численно равный количеству энергии, усваиваемой ДСП из 1 кВт мощности; $\Delta\tau$ – интервал времени, в течение которого температура металла должна достичь заданного значения. Этот интервал времени определяется дискретностью периодического замера температуры термопарой погружения; h – коэффициент усвоения тепловой энергии металлом (определяется экспериментально).

Расчет поправки ΔP осуществляет автоматический регулятор температурного режима, который вырабатывает корректирующий сигнал регулятору электрического режима, если поправка может быть осуществлена в небольших пределах. Недостаток – отсутствует связь между коэффициентом усвоения энергии металлом и подводимой электрической мощностью.

Для ликвидации данного недостатка метод для расчёта корректирующей поправки ΔP с учетом изменения коэффициента усвоения в зависимости от подводимой в печь мощности

$$h = \frac{P_{УСВ}}{P_{ПОДВ}}, \quad (4.2)$$

$$P_{УСВ} = P_{АКТ} - P_{ПОТ},$$

$$P_{ПОТ} = I^2 \cdot R,$$

где $P_{УСВ}$ – усвоенная мощность; $P_{ПОДВ}$ – подводимая мощность; $P_{ПОТ}$ – мощность потерь; R – активное сопротивление подводящей цепи.

Данный метод использован при выполнении условия непрерывного измерения температуры металла в процессе плавки. Недостаток метода – не предусмотрена корректировка по температуре кладки печи.

Другими недостатками дуговых сталеплавильных печей переменного тока являются:

- высокий угар металла и большой расход графитированных электродов (10–16 кг на 1 т жидкой стали), сложность выплавки низкоуглеродистых сталей из-за науглероживания стали от электродов;
- уровень шума при расплавлении достигает 90 дБ;
- обильное пылевыведение, требующее мощных вентиляционных установок и систем пылегазоочистки;
- при поломках электродов происходит быстрое науглероживание металла, что приводит к браку сталей по химическому составу;

- резко переменный, несимметричный характер электрической нагрузки, что приводит к появлениям больших колебаний и не симметрии напряжения в электрической сети;
- печи являются источниками высших гармонических составляющих;
- высокий расход электроэнергии.

4.10 Дуговые печи постоянного тока

Достоинства дуговых печей постоянного тока (ДППТ) по сравнению с печами переменного тока состоят в следующем:

- возможность проведения всех металлургических процессов;
- резкое снижение угара металла;
- улучшение механических свойств стали;
- не требуются дополнительные устройства перемешивания металла;
- уменьшение расхода электроэнергии на 15–20 %;
- уменьшение расхода электродов в 2–5 раз;
- уменьшение выбросов пыли и газа в 8–10 раз;
- снижение на 20–30 % расхода огнеупорных материалов;
- более равномерный график электрической нагрузки.

Конструкция.

Дуговая печь постоянного тока имеет один графитированный электрод (катод), расположенный по центру свода, и один охлаждаемый металлический электрод (анод), устанавливаемый в поде печи. Верхняя часть этого электрода соприкасается с расплавленным металлом, а к противоположной части присоединяется токоподвод (рис. 4.11).

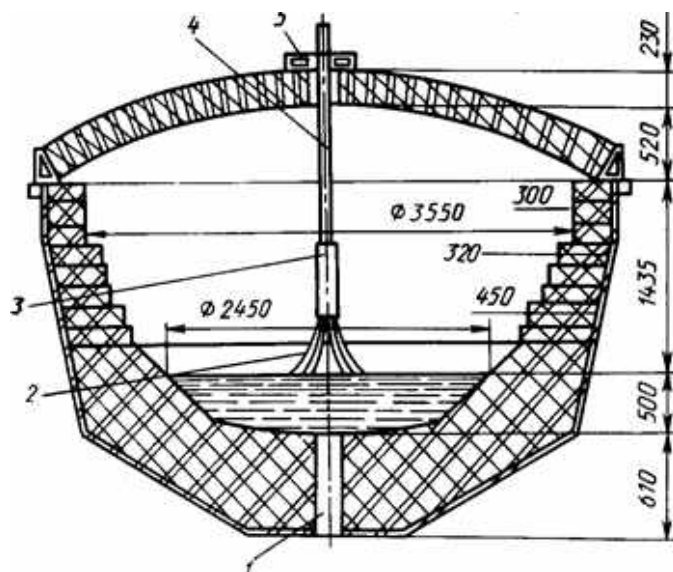


Рисунок 4.11 – Футеровка дуговой печи постоянного тока

Сводный электрод 3 может вводиться в печь на водоохлаждаемом держателе 4 через экономайзер 5, расположенный в центре свода. Подовый электрод 1 представляет собой систему металлических стержней, расположенных в набивной магнезитовой подине. Верхним концом стержни контактируют с расплавленным металлом в печи, а противоположные концы стержней заделаны в общую охлаждаемую водой или воздухом плиту, к которой присоединён токоподвод. Для нормальной эксплуатации электрода 1 в печи при выпуске оставляют немного жидкого металла, закрывающего электрод при последующей загрузке шихты. Электрическая дуга 2 между электродом 3 и металлом в печи имеет форму спирали, радиус витков которой увеличивается по направлению от электрода 3 к расплавляемому металлу. Взаимодействие тока дуги с собственным магнитным полем приводит к интенсивному вращению столба дуги вокруг центральной оси спирали, так что дуга визуально воспринимается в виде усеченного конуса.

Основные элементы печи: каркас, механизм наклона печи, футеровка, механизмы загрузки шихты для печи постоянного тока практически аналогичны узлам печи переменного тока.

ДППТ работает практически бесшумно, и только в начале расплавления металла возникает шум, генерируемый электрической дугой в процессе ее возникновения и погасания (подобно разряду молнии при грозе). В печи переменного тока такой разряд происходит дважды в течение каждого периода, когда напряжение переменного тока проходит через ноль, т. е. при частоте тока 50 Гц – 100 раз в секунду. В ДППТ электрическая дуга теоретически горит устойчиво. Дуга гаснет и снова зажигается лишь в моменты начала плавки и слива металла. Узел ввода электрода 3 и дверца рабочего окна хорошо уплотнены, что позволяет полностью ликвидировать подсос воздуха в рабочее пространство печи и неорганизованный выброс продуктов плавки в атмосферу цеха. Конструкция печи допускает работу с контролируемой нейтральной атмосферой. Дополнительные затраты на поддержание в печи нейтральной атмосферы (аргона) целиком компенсируются за счет снижения расхода графитированных электродов, а снижение угара железа и легирующих элементов дает экономию, величина которой зависит от выплавляемых марок стали. Применение контролируемой атмосферы повышает выход годного металла на 3–4 % и на 15–20 % сокращает расход ферросплавов. Футеровка печи вместимостью 12 т – основная, свод стены и под выполнены из магнезитохромитового или магнезитового кирпича. Стойкость свода и верхней части стен 180–200 плавов, нижней части стен и подины печи вместе с подовым электродом около 2500 плавов, т. е. от одного капитального ремонта печи до другого. Печь имеет следующие эксплуатационные показатели: масса металлозавалки – до 14,3 т; время расплавления – 1,5 ч; удельный

расход электроэнергии на расплавление – 490–520 кВт·ч/т; удельный расход электродов – до 1,5 кг на 1 т жидкой стали при работе с обычной и до 0,35 кг при работе с защитной атмосферой. Питание печи осуществляется от тиристорного выпрямителя тока. Принципиальным отличием является электрическое оборудование, и в первую очередь – выпрямитель тока.

Основные технические данные дуговых печей постоянного тока приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Технические данные ДППТ

Наименование параметра	ДСПТ- 1,5/2,5	ДСПТ- 6,0/6,3	ДСПТ- 12,0/13,2
Установленная мощность, кВА	2500	6300	17200
Потребляемая мощность, кВт			
Вместимость печи, т	1,5	6,0	12,0
Рабочий ток, А	8000	12500	14000
Время расплавления, мин.	45	60	60
Удельный расход электроэнергии на расплавление одной завалки, кВт·ч/т	600	550	600
Выпрямленное напряжение, В	300	450	660
Диаметр каркаса, мм	1400	3500	3785
Ширина рабочего окна, мм	520	750	980
Высота рабочего окна, мм	400	500	690
Диаметр сводового электрода, мм	150	200	250
Диаметр подового электрода, мм	150	300	250

Примечание: Для всех печей: напряжение питающей сети 6/10 кВ, частота тока 50 Гц, атмосфера печи – аргон или воздух.

4.11 Применение дуговых электрических печей

Для повышения качества металла, полученного в других установках, его переплавляют при низком давлении в вакуумных дуговых печах (ВДП), в результате чего в металле уменьшается содержание вредных примесей и растворенных газов. ВДП применяют в основном для выплавки слитков высоко реакционных металлов (титана, ниобия, вольфрама, циркония, тантала, молибдена), а также для переплава специальных высококачественных сталей, в результате чего они не только очищаются, но и приобретают более плотную структуру. Рабочее давление в камере печи может составлять 1,0–0,001 Па в зависимости от требований к получаемому металлу. В современных ВДП получают слитки массой от нескольких сотен килограммов до 50–60 т.

Руднотермические печи (РТП) применяются в металлургии черных металлов и других отраслях для получения ферросплавов – сплавов железа с кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом и др. РТП относятся к дуговым печам сопротивления, имеют высокую единичную мощность и относятся ко второй категории по надежности электроснабжения. Нагрев перерабатываемых материалов производится за счёт теплоты, возникающей при протекании тока по электродам, шихте, электрической дуге и расплавляемому материалу. Дуга горит под слоем электропроводной шихты, теплота выделяется в дуговом разряде и преимущественно при прохождении тока через шихту в расплавленных материалах. Номенклатура продуктов, получаемых в РТП, весьма широка: они могут выпускаться из печи в виде пара, газа, жидкости расплава или твердого тела, извлекаемого целым слитком. Сырьём для получения ферросплавов служат руды или концентраты. При производстве основных сплавов: ферросилиция, ферромарганца и феррохрома пользуются рудами с большим содержанием металла. Первоначально руду вследствие малого содержания в ней полезного компонента обогащают, получая концентрат с высоким содержанием оксидов основного элемента.

Следует отметить разнообразие конструкций РТП, что вызвано многообразием и сложностью химического состава перерабатываемого сырья, а также большим ассортиментом производимой продукции.

По назначению, конструктивным особенностям, физико-химическим процессам печи и процессы можно разделить на две основные группы: восстановительные (многошлаковые, шлаковые и бесшлаковые) и переплавные (сталеплавильные, рафинировочные и др.).

По режиму эксплуатации печи разделяют на печи непрерывной работы и печи периодической работы.

По типу конструкции печи бывают открытые, закрытые и частично укрытые, т. е. имеющие свод, но без герметично укрытой ванны.

Печи обозначаются индексами, которые расшифровываются по следующим правилам.

Тип печи (способ нагрева) обозначается: Д – дуговой; И – индукционный; С – сопротивления; Р – руднотермическая; Ш – шлаковая; Э – электронно-лучевая.

Продукт – металл: С – сталь; А – алюминий; Т – титан и т. д.

Для дуговых печей ставят характеристику конструкции печи: П – поворотный свод; Б – барабанные; В – вакуумные.

Для руднотермических печей вторая буква характеризует форму ванны: К – круглая; П – прямоугольная.

Третья буква – характер конструкции: З – закрытая; О – открытая.

Через тире пишут мощность в МВА (емкость по металлу) и продукт: Ф – фосфор; К – корунд; Ш – штейн.

Примеры индексов: ДСП–50 – дуговая сталеплавильная печь емкостью 50 т; РКЗ–48Ф – руднотермическая круглая закрытая, 48 МВА, для фосфора.

Процессы получения элементарного фосфора, карбида кальция, нормального и белого электрокорунда проводятся в мощных руднотермических печах непрерывного действия прямого нагрева. В таких печах электрическая энергия преобразуется в тепловую непосредственно в нагреваемом материале.

Электроэнергия вводится в реакционное пространство с помощью электродов, сама реакционная зона является электрическим проводником, доля электрической дуги при этом довольно мала, не превышает 10–20 % от полной мощности печи.

Производство карбида кремния и искусственного графита ведется в печах сопротивления периодического действия, в которых электроэнергия подается через неподвижные электроды на проводящий керн внутри печи.

В России и Казахстане для производства фосфора применяются руднотермические печи типа РКЗ-48, РКЗ-72, РКЗ-80 (индекс печи означает руднотермическая круглая закрытая, а далее указывается электрическая мощность в мегавольт-амперах). Такие трехфазные круглые печи состоят из следующих основных элементов: кожух печи, футеровка, система подвески и перемещения электродов и тракт шихтоподачи. Свод печи футерован огнеупорным бетоном и имеет отверстия для электродов с сальниковыми уплотнениями, а также для шихтовых течек и для газохода, который может быть отключен от печи газоотсекателем специальной конструкции.

В промышленном производстве плавнелитых огнеупоров применяют только электродуговые печи, источником тепловой энергии в которых является электрическая дуга. В результате концентрированного выделения энергии в малых объемах в дуговых печах достигаются высокие температуры, необходимые для плавления шихт на основе тугоплавких оксидов Al_2O_3 , ZrO_2 , Cr_2O_3 , MgO , SiO_2 и др. Электрическая дуга обеспечивает большую скорость нагрева, высокую производительность установок и требуемую чистоту выплавляемых изделий. Электрокорунд нормальный выплавляют в электрических дуговых трехфазных печах.

При необходимости выполнения расчётов электродуговых печей определяют значения токов и напряжений электропечных трансформаторов. Они являются важнейшими параметрами руднотермических печей, т. к. не только обеспечивают рациональные технологические режимы печей, но и позволяют рассчитать их геометрические размеры. При расчёте токов и напряжений

целесообразно использовать расчётные формулы, приведенные в работе [9]. В указанном источнике приведен пример расчёта удельного сопротивления технологических зон печей, используемых при производстве технического кремния.

Для производства карбида кремния служат керновые печи сопротивления, которые могут быть стационарными или передвижными. В настоящее время в основном используются самоходные печи. Самоходная электрическая печь сопротивления состоит из пода, боковых и торцевых стенок, смонтированных на подвижной платформе. Основное сырьё для производства карбида кремния – кремнезёмсодержащий материал и углеродистый восстановитель, а также древесные опилки или подсолнечная лузга и поваренная соль (для зеленого карбида кремния). Кроме того, используют некоторые вспомогательные (угольные электроды, огнеупорный кирпич) и возвратные (аморф, старая шихта) материалы.

Глава 5. ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ

5.1 Сущность процессов

В 1923 г. американские физики Л. Тонкс и И. Ленгмюр предложили называть среду, в которой значительная часть молекул или атомов ионизирована – плазмой.

Плазма является состоянием вещества, наиболее распространенным в космосе.

Плазму получают чаще всего в электродуговом разряде, в высокочастотном электрическом поле, с помощью энергии лазерного излучения.

Физические свойства плазмы – высокие значения температур, энтальпия и электропроводность – позволяют осуществлять ряд интересных физических и технических проектов.

В атомной физике, например, «горячая» плазма с температурой выше 10^6 К рассматривается как средство проведения управляемых термоядерных реакций синтеза.

Функционируют ряд магнитогидродинамических (МГД) генераторов, в которых высокоскоростной плазменный поток служит для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

Существуют электрореактивные плазменные двигатели.

Плазма нашла применение в металлургии, в сварочном производстве.

Для технологических целей используют так называемую «низкотемпературную» плазму, представляющую собой частично ионизированный газ.

Плазма – это ионизированный газ, содержащий ионы, электроны, атомы и нейтральные частицы. При прохождении газа через электрический разряд, нейтральные атомы расщепляются на заряженные ионы (четвертое состояние вещества).

Плазма может быть низкотемпературной (порядка 10^5 °С) и высокотемпературной ($10^6 \dots 10^8$ °С).

Установки, позволяющие осуществлять непрерывный регулируемый нагрев газа до высоких температур, называют генераторами низкотемпературной плазмы (дугowymi или высокочастотными плазмотронами).

Основными сферами применения плазменных технологий является химия, металлургия, машиностроение.

При плазменной обработке изменяются форма, размеры, структура обрабатываемого материала или состояние его поверхности. Плазменная обработка включает: разделительную и поверхностную

резку, нанесение покрытий, наплавку, сварку, разрушение горных пород (плазменное бурение).

Схема плазменной резки приведена на рисунке 5.1.

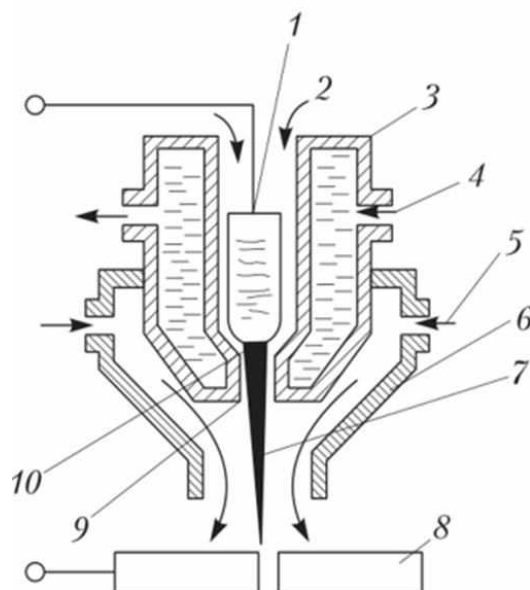


Рисунок 5.1 – Схема процесса плазменной резки

Для повышения температуры и мощности обычной дуги и превращения её в плазменную используют два процесса: сжатие дуги и принудительное вдувание в неё плазмообразующего газа (рис. 5.1). Сжатие дуги осуществляется за счёт размещения ее в специальном устройстве – плазматроне 3, стенки которого интенсивно охлаждаются водой 4. При проходе через канал плазматрона 9 поперечное сечение дуги уменьшается и возрастает ее мощность – количество энергии, приходящееся на единицу площади. Температура в столбе обычной дуги составляет 5000–7000 °С, а в плазменной дуге достигает 30000 °С. Дуга 7 горит между разрезаемым изделием 8 и медным водоохлаждаемым электродом 1, имеющим вставку 10 из циркония или, что предпочтительнее, из гафния. В электродную область плазматрона вдувается плазмообразующий газ 2. В некоторых плазматронах имеется камера 6, в которую подается дополнительная среда – газ или вода 5. Это улучшает некоторые характеристики процесса резки.

Процесс резки происходит за счёт расплавления металла дугой и выдувания расплава потоком газа. Для обеспечения более равномерного распределения температуры по сечению дуги во многих плазматронах предусмотрена специальная система закрутки потока газа. Некоторые конструкции плазматронов приведены на рисунке 5.2. Плазматроны для резки тонкого металла, рассчитанные на малые токи, имеют воздушное охлаждение (рис. 5.3).



Рисунок 5.2 – Плазматроны для резки и их устройство:
 1 – гайка сопла; 2 – изоляционная втулка; 3 – электронный узел;
 4 – кожух; 5 – фторопластовый корпус; 6 – механизм закрутки
 воздушного потока; 7 – электрод; 8 – сопло



Рисунок 5.3 – Плазматрон для резки с воздушным охлаждением

5.2 Газы для резки

Используемый газ оказывает существенное влияние на процесс. Для резки используется следующие газы: воздух, кислород, водород, азот, аргон. Часто применяют смеси этих газов, состав которых зависит от разрезаемого материала.

Наиболее известным, традиционным, широко применяемым газом при плазменной резке, является воздух. Поэтому способ иногда называют воздушно-плазменной резкой. При его использовании хорошо режутся низкоуглеродистые стали, можно резать легированные стали, медь, алюминий.

Воздух является самым дешёвым газом, который при этом обеспечивает достаточно высокое качество реза. Недостатком воздуха является азотирование разрезаемых кромок, что приводит при их сварке к образованию пор. Кроме того, вследствие азотирования увеличивается твердость кромок и ухудшается их механическая обрабатываемость. Претензии к воздуху появляются и при увеличении толщины металла, так как начинает проявляться непараллельность стенок реза.

Кислород, кроме выдувающей функции, обеспечивает сгорание разрезаемого металла, что улучшает параллельность стенок реза, и устраняет заусенцы. В сочетании со специальной конструкцией плазмотрона с закруткой струи при использовании кислорода удалось создать так называемую узкоструйную плазму, которая обеспечивает малую ширину реза, что особенно важно при вырезке сложных профилей с большим количеством изгибов. Кроме того, кислород не азотирует кромки, предотвращая появление пористости. Опасения, что в кислороде снизится стойкость электрода, были устранены после исследований особенностей окисления гафния при высоких температурах. Были предложены новые способы крепления гафниевой вставки к электроду (например, через алюминиевую прокладку).

Водород отдельно как плазмообразующий газ не используется, но может быть добавкой к другим газам. Благодаря высокой теплоемкости и теплопроводности он способствует передаче тепла от дуги к металлу, увеличивая эффективность процесса резки. Это особенно важно при резке цветных металлов, обладающих высокой теплопроводностью. Водород часто добавляют к аргону, который обеспечивает наилучшее качество при резке меди, но сам обладает низкой тепловой эффективностью. Добавляют водород и к азоту.

Азот используется в смеси с другими газами или как самостоятельный плазмообразующий газ. В нём дуга горит при меньших токах, что позволяет снизить тепловую нагрузку на электрод и сопло. В последнее время интенсивно разрабатываются новые схемы процесса плазменной резки с использованием дополнительной среды, подаваемой в отдельное сопло.

Наиболее известны следующие комбинации газов, которые обеспечивает высокие скорости и качество резки:

– режущий газ – азот, дополнительный – воздух; область применения – резка нержавеющей сталей и алюминия;

– режущий газ – смесь 35 % Ar + 65 % N₂, дополнительный – азот; область применения – резка нержавеющей стали и алюминия больших толщин;

– режущий газ – смесь 95 % N₂ + 5 % H₂, дополнительный – азот; область применения – резка нержавеющей стали малых толщин с высоким качеством реза.

Дополнительная среда ограничивает размеры дуги, способствует её сжатию и концентрации тепла. Кроме того она защищает сопло от брызг, улучшает его охлаждение. Улучшается также охлаждение разрезаемых кромок, что уменьшает их деформацию.

Иногда вместо газа в качестве дополнительной среды используют воду, которая подается в сопло или находится небольшим слоем на поверхности разрезаемой детали. Наличие воды образует вокруг дуги водяной колокол, внутри которого находится пар. Пар создает высокое давление, которое сжимает дугу и способствует выдуванию из реза расплавленного металла. Это увеличивает эффективность процесса резки. Наличие же воды под разрезаемой деталью способствует поглощению газа, аэрозолей и других продуктов резки, уменьшает шум от работы плазматрона, что улучшает экологичность процесса.

Способы ввода плазмообразующего газа можно разделить на аксиальный (осевой), тангенциальный (вихревой), распределенный, транспирационный.

Аксиальный ввод используется в различных плазменных устройствах, применяемых в основном для обработки дисперсных материалов, для сварки, плавки, рафинирования металлов, требующих аксиального потока плазмы. Он позволяет обеспечить хорошую стабилизацию разряда, снижение турбулентных пульсаций в плазме, возможность получения ламинарных потоков, повышение однородности прогрева газа в разряде, равномерность его распределения по сечению канала.

Тангенциальный ввод используется для повышения термоизоляции плазмы. Газ подается в разрядную камеру по специальным каналам, в результате чего образуется газовый вихрь, обдувающий столб дуги и генерируемую плазменную струю. Слой холодного газа под действием центробежных сил располагается у стенки, предохраняя её от контакта с дугой.

Плазматроны с тангенциальным вводом газа, в отличие от аксиального, имеют больший термический КПД, более высокую эффективность преобразования электрической энергии в тепловую, хорошую пространственную стабилизацию разряда.

К недостаткам данного способа относятся: образование вихревой плазменной струи с повышенным рассеиванием мощности, сложности ввода исходного материала в плазменный поток, невозможность получения ламинарных потоков, высокий уровень шума.

Распределённый ввод во многом аналогичен аксиальному вводу газа. В этом случае повышается термоизоляция плазмы от стенок канала и возможно создание плазмотронов с высоким термическим КПД (более 80 %). Длина дуги может быть значительно увеличена, и в связи с этим достигнута необходимая мощность плазмотронов при высоких напряжениях и низких токах дуги.

Недостатками данного способа являются: усложнение конструкции плазмотрона, трудность равномерного распределения газа по сечению разрядного канала, низкое теплосодержание потока плазмы в связи с большим расходом газа.

Транспирационный ввод – способ ввода газа через пористую стенку плазмотрона. В этом случае обеспечивается интенсивное взаимодействие газа со стенкой, что обеспечивают термический КПД более 90 %. Кроме того, достигается равномерность ввода газа в дугу и улучшается её стабилизация.

5.3 Оборудование для резки

Оборудование для плазменной резки делится на три группы: переносные аппараты, передвижные установки и стационарные машины (рис. 5.4–5.5).



Рисунок 5.4 – Плазмотроны для резки:
а – переносной; б – передвижной

Переносные аппараты предназначены для резки металла толщиной до 10–16 мм. Имеют воздушное охлаждение плазмотрона.

Плазмообразующий газ обычно воздух, который подается компрессором. Для увеличения срока службы плазматрона воздух целесообразно очищать, пропуская через фильтр. Аппараты рассчитаны на питающую сеть 220 или 380 В.

Передвижные установки имеют большую мощность и предназначены для резки металла толщиной до 30...40 мм.

Стационарные машины сконструированы обычно по порталному принципу и похожи на порталные машины для кислородной резки.

Плазменная резка получила широкое распространение в различных отраслях промышленности. Она является основным способом резки легированных сталей и цветных металлов, которые не поддаются кислородной резке. Достаточно широко применяется плазменная резка и для резки низкоуглеродистых сталей относительно небольших толщин. Для малых толщин (до 10 мм) плазменная резка в 3–5 раза более производительна, чем кислородная. При толщине металла S 35–40 мм скорость резки низкоуглеродистой стали обоими способами примерно одинакова. Для больших толщин более производительна кислородная резка.



Рисунок 5.5 – Стационарная установка для плазменной резки

На предприятиях часто приходится резать металлы различной толщины, поэтому в последнее время стали выпускаться универсальные машины, содержащие одновременно плазматроны и резаки для кислородной резки. На такой машине низкоуглеродистая сталь

толщиной до 40 мм режется плазмой, свыше 40 мм – кислородной резкой.

Оборудование с ЧПУ для плазменной резки металла обладает преимуществами:

- заданная программа обеспечивает высокую точность резки и изготовление деталей сложной геометрической формы;

- технология не требует высоких затрат энергии и вложения дополнительных финансов, отличается автономностью; по мере использования плазмотрона расходы уменьшаются, а уровень рентабельности становится выше;

- аппараты плазменной резки с ЧПУ отличаются высокой производительностью. Скорость работы плазмотрона намного выше, чем у газового оборудования, с ним может соперничать только лазерная резка. Благодаря этому преимуществу плазменные установки часто используют для массового производства деталей;

- эксплуатация и техническое обслуживание не вызывают трудностей;

- агрегат предназначен для резки металлических листов с разными свойствами (низколегированной и углеродистой стали, чугуновых заготовок), имеющих толщину в пределах 0,5–150 мм, при этом обеспечивается высокое качество реза и, в ряде случаев, не требуется дополнительная обработка заготовок;

- при работе оборудования с ЧПУ нет выделений газов, не используется открытый источник пламени.

5.4 Классификация электродуговых плазмотронов

В зависимости от признака, положенного в основу классификации, выделяют следующие типы электродуговых плазмотронов:

- по виду дуги делят на две группы: прямого действия и косвенного действия;

- по роду тока: постоянного и переменного тока;

- однодуговые и многодуговые;

- с внутренней и вынесенной дугой; с продольно обдуваемой (линейные) и с поперечно обдуваемой дугой;

- с самоустанавливающейся и фиксированной длиной дуги;

- по системе охлаждения электрода и плазмообразующего сопла: с воздушным и с водяным охлаждением.

Каждый из рассмотренных типов плазмотронов можно классифицировать по конструктивным признакам.

В общем виде, основными элементами дуговых плазмотронов являются: электрододержатель с электродом, камера для плазмообразования, плазмообразующее сопло, формирующее сжатую дугу или плазменную струю, изолятор, разделяющий электродный узел от плазмообразующего сопла, вспомогательные системы, обеспечивающие подачу плазмообразующего, фокусирующего и защитного газов, а также охлаждающей жидкости. При разработке плазмотронов должны учитываться мощность (или максимальный ток), надежность, срок службы отдельных элементов, способы токоподвода, способы возбуждения сжатой дуги, воспроизводимость и управляемость параметрами сжатой дуги или плазменной струи и др.

Как указано выше, по системе охлаждения электрода и плазмообразующего сопла плазмотроны делятся на два основных типа: с воздушным и с водяным охлаждением. Могут быть плазмотроны со смешанной системой охлаждения теплонагруженных узлов. Чаще применяют плазмотроны с охлаждением водой, т. к. теплоемкость воды намного выше теплоемкости воздуха и других газов, поэтому обеспечивается высокая мощность и высокая степень сжатия дуги.

Плазмотроны классифицируют по способу стабилизации сжатой дуги. Система стабилизации сжатой дуги обеспечивает сжатие столба дуги и строгую фиксацию его по оси сопла плазмотрона и является одним из важнейших элементов плазмотрона. Существует три вида стабилизации сжатой дуги: газовая, водяная и магнитная. Наиболее простой и распространенной является газовая стабилизация, при которой наружный, холодный слой рабочего (плазмообразующего) газа омывая столб дуги, охлаждают и сжимают его. При этом, в зависимости от способа подачи газа, газовая стабилизация может быть аксиальной или вихревой. Наибольшее обжатие дуги достигается при вихревой стабилизации, поэтому этот способ чаще используется в плазмотронах для резки и напыления. При аксиальной стабилизации обеспечивается ламинарный характер истечения струи из плазмообразующего сопла, что является важным для ряда процессов. В ряде случаев применяют двойную стабилизацию дуги. При водяной стабилизации можно достигнуть наиболее высокой степени сжатия и температуры столба дуги (50–70 тыс. К). Однако присутствие паров воды вблизи катодной области приводит к интенсивному сгоранию электродов из любых материалов, поэтому в плазмотронах с водяной стабилизацией используются расходуемые (чаще графитовые) электроды, автоматически перемещающиеся по мере сгорания. Магнитная стабилизация, при которой создаваемое продольное магнитное поле сжимает столб дуги, менее эффективна, чем водяная и газовая. Кроме того, наличие соленоида усложняет конструкцию плазмотрона и увеличивает его габариты. Преимущество магнитной стабилизации состоит в возможности регулирования степени сжатия дуги не зависимо

от расхода рабочего газа. На практике наложение продольного магнитного поля применяется для вращения анодного пятна по внутренним стенкам сопла, при работе в режиме косвенной дуги, с целью повышения стойкости последнего.

По виду электрода катода плазмотроны постоянного тока можно разделить на две группы: плазмотроны со стержневым и плазмотроны с распределенным катодом. В плазмотронах со стержневым катодом, катодное пятно фиксируется на торце электрода, а в плазмотронах с распределенным катодом – интенсивно перемещается с помощью газовихревого или магнитного вращения по развитой поверхности электрода. Стержневые катоды могут быть трех видов: расходуемый, газозащитный и пленкозащитный. Расходуемый, чаще всего, графитовый электрод, несмотря на высокую температуру плавления, имеет повышенный расход из-за возгонки вблизи температуры плавления. Газозащитный вольфрамовый электрод – самый распространенный из всех видов электродов. Вольфрам имеет высокую прочность и достаточно высокие электро- и теплопроводность. При работе в инертной среде (аргон гелий) при нагрузке $j = 15\text{--}20 \text{ А/мм}^2$ вольфрам практически не расходуется. Пленкозащитные катоды обладают высокой стойкостью в активных средах (воздух, углекислый газ, технический азот). Они представляют собой стержень из циркония или гафния, запрессованный в медной обойме. Высокая термостойкость таких катодов обусловлена образованием стойкой тугоплавкой пленки из оксидов и нитридов, защищающей чистый металл от испарения. Активная вставка расходуется в основном при включении дуги, вследствие разрушения пленки от термоудара. При использовании циркониевого электрода допускается большая чем для вольфрама плотность тока, достигающая $80\text{--}100 \text{ А/мм}^2$. При работе плазмотрона с окислительной плазмообразующей средой на больших токах (1000 А и более) используются разнообразные виды распределенных катодов, наиболее распространенными из которых являются полый, дисковый и кольцевой. Недостатками распределенных катодов являются сложность их конструкции, трудность равномерного перемещения катодного пятна по всей поверхности электрода, низкая стабильность горения дуги, возрастание напряжения прикатодной области дуги и связанное с этим увеличение потерь мощности в электроде.

Состав плазмообразующей среды зависит от технологического процесса и очередь является определяющим фактором при выборе схемы плазмотрона. По химическому воздействию на обрабатываемое изделие и электроды плазмотрона все плазмообразующие среды можно разделить на три большие группы: инертная, восстановительная и окислительная.

По роду тока плазмотроны отличаются большим многообразием. Подавляющее большинство плазмотронов работает на постоянном токе

прямой полярности. Это объясняется тем, что на аноде дуги выделяется большее количество тепла, чем на катоде. Тепловая мощность, выделяемая в электроде плазмотрона, в отличие от плавящегося электрода сварочной дуги является не только бесполезной, но и вредной. Предельно допустимая токовая нагрузка на лантанированный вольфрамовый электрод на переменном токе примерно в два раза, а на обратной полярности, при использовании постоянного тока, – в десять раз ниже, чем на прямой полярности. Поэтому плазмотроны постоянного тока прямой полярности имеют наиболее высокий коэффициент использования полезной мощности. При работе плазмотрона на переменном токе прохождение тока через нуль может вызвать погасание дуги, поэтому напряжение холостого хода источника питания переменным током не менее чем вдвое превышает рабочее напряжение дуги. Плазмотроны переменного тока рекомендуется применять для сварки алюминиевых сплавов, так как в периоды обратной полярности за счёт действия эффекта катодного распыления разрушается тугоплавкая окисная пленка, препятствующая процессу сплавления металла. Наряду с дуговыми плазмотронами, работающими на токе промышленной частоты, разработаны высокочастотные и сверхвысокочастотные плазмотроны.

5.5 Конструкции узлов плазмотронов

Основными узлами плазмотронов являются электродный, сопловой, изолятор, системы водо- и газоснабжения.

Основной характеристикой материала катода являются эмиссионные свойства, которые определяются работой выхода электронов. Чем меньше работа выхода, тем лучше решаются задачи стабилизации дуги и охлаждения катода. Для работы в инертных газах наилучшим материалом катодов является вольфрам, легированный окислами лантана и иттрия (марки ВЛ и СВИ). Конструктивно катоды из вольфрама выполняются двумя способами: в виде прутка, который фиксируется цанговым зажимом, закрепленном в электродном узле плазмотрона (рис. 5.6), и в виде медной державки с заделанным в неё стержнем вольфрама, установленной в электродном узле. Последняя конструкция менее удобна, но обеспечивает более высокие плотности тока.

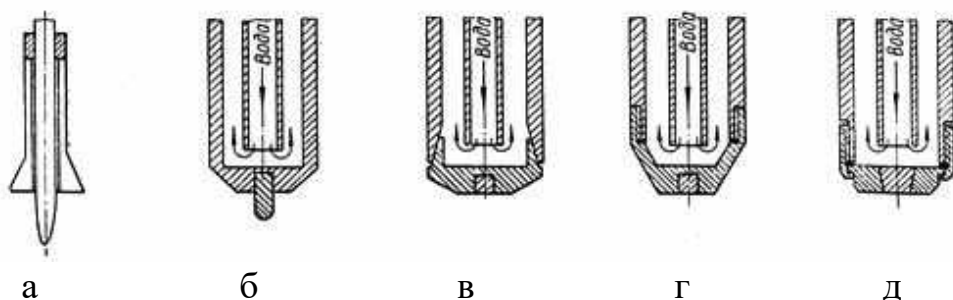


Рисунок 5.6 – Конструкции катодов

Катодная вставка может закрепляться в цельном корпусе и сменных медных наконечниках, соединяемых с корпусом электрододержателя конусной посадкой или резьбой. Конструкции, изображённые на рисунках в, г, д характерны для катодов с активной вставкой (цирконий, гафний), предназначенных для работы в кислородсодержащих средах. Вставка соединяется с наконечником различными способами: пайкой, диффузионной сваркой, запрессовкой, совместной холодной штамповкой активной вставки с медной державкой и др.

При работе плазмотрона на постоянном токе обратной полярности тепловая нагрузка на анод резко возрастает. Опыт показывает, что для обеспечения адекватной стойкости сечение вольфрамового электрода на обратной полярности должно быть в 9 раз больше, чем при прямой полярности. Необходимо рассредоточить заряд по поверхности анода для снижения плотности теплового потока в анод. Эксперименты, проводимые с вольфрамовыми электродами различной конструкции показали, что при рабочем токе 150 А и токе возбуждения 50 А они разрушались за время меньше 23 мин, а при токе 200 А за 2–3 мин. Это объясняется недостаточной теплопроводностью вольфрама. Эксперименты проведенные с медными анодами (теплопроводность меди в 3 раза выше, чем вольфрама) различные конструкции (рис. 5.7 а–г) показали, что конструкции а и б при рабочем токе 200 А и токе возбуждения 50 А быстро разрушались. При использовании электрода в активное пятно располагалось на кромке электрода, что приводило к аварийной работе плазмотрона (двойной дуге). Электрод конструкции г при токе 200 А имел ресурс 300 мин. при 60 возбуждениях дуги. Считается, что рост ресурсов анодов связан с увеличением размеров электродов и улучшением их охлаждения. Предлагается анодный узел, состоящий из водоохлаждаемой медной державки и активной вольфрамовой вставки (рис. 5.7 д). Высокая стойкость анода обеспечивается качественным соединением меди с вольфрамом и эффективным водяным охлаждением. Наилучшие результаты достигались при осадке расплавленной меди на вольфрамовую вставку.

Стойкость таких анодов достигает 100–300 часов при рабочем токе до 300 А при 100–500 включениях.

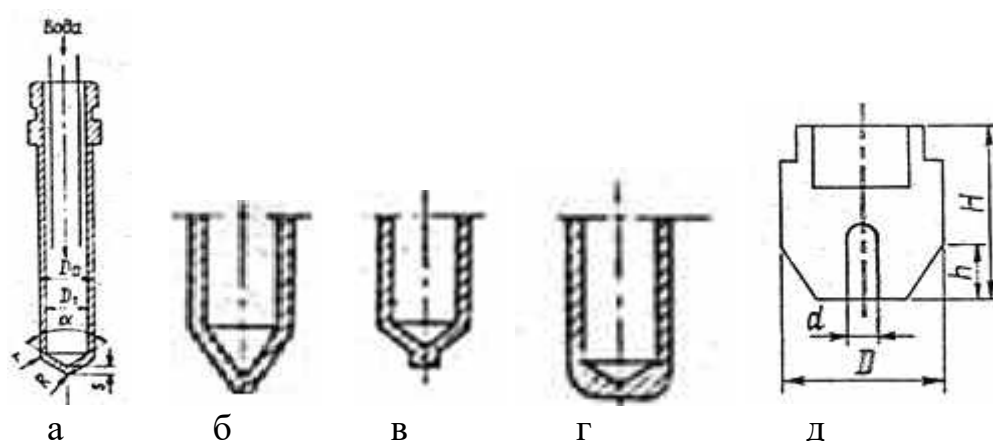


Рисунок 5.7 – Конструкции анодов:

а, б, в, г – медные электроды; д – медный электрод с вольфрамовой вставкой

Плазмообразующие сопла воспринимают большие тепловые нагрузки и поэтому требуют тщательного конструктивного оформления. Опыт эксплуатации показал, что наилучшим материалом для изготовления сопел является медь высокой чистоты (марки М0, М1), обладающая высокой теплопроводностью и сравнительно невысокой стоимостью. Армирование стенок сопла теплостойкими материалами приводит к уменьшению срока его службы из-за уменьшения теплопроводности. Сопла малоамперных и ручных плазменных горелок могут быть выполнены с естественным или газовым охлаждением (рис. 5.8 а–б). В большинстве случаев применяется водяное охлаждение сопел, при этом участок сопла контактирующий с плазменным столбом, выполняют сменным (рис. 5.8 в–д).

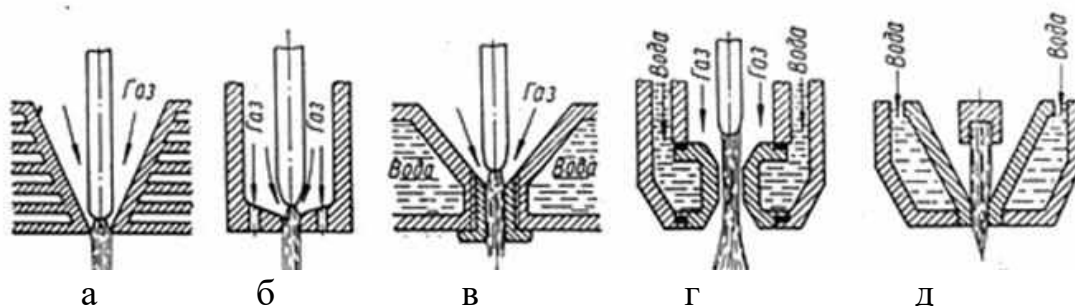


Рисунок 5.8 – Конструкции плазмообразующих сопел:

а, б – охлаждаемые воздухом; в, д – сменные, охлаждаемые водой

Узел завихрения рабочего газа определяет качество стабилизации столба сжатой дуги. Функции завихрителя может выполнять корпус плазмотрона, керамическая шайба, помещенная у входа в сопло, само сопло. При этом можно значительно сократить длину канала сопла, заменив большую часть его кольцами стабилизирующего газа, вращающегося вокруг столба дуги (очень сложное и трудоёмкое в изготовлении). Завихрителем может быть и сам электрод плазмотрона, на наружной поверхности которого выполняется винтовая нарезка.

Плазмообразующее сопло и электродный узел должны быть изолированы друг от друга. Одним из условий стабильного горения дуги является точная центровка электрода и плазмообразующего сопла. Функции связи электродного узла и плазмообразующего сопла плазмотрона, их точной центровки и электрической изоляции выполняет изолятор. К материалу изолятора предъявляются разнообразные, а, иногда, противоречивые требования:

- достаточная механическая прочность;
- высокая электрическая прочность, т. к. возбуждение дежурной дуги осуществляется с помощью высоковольтного высокочастотного разряда;
- термостойкостью, т. к. части изолятора подвергаются тепловому и световому воздействию сжатой дуги;
- обрабатываемостью механическими способами (режущими инструментами, штамповкой и др.);
- герметичностью, поскольку через изолятор могут проходить коммуникации газоснабжения и водяной системы охлаждения.

Материалы, применяемые для изготовления изоляторов плазмотронов, условно можно разделить на две группы: обрабатываемые из заготовок на универсальном оборудовании (прутки, листы), и получаемые с помощью специальной технологической оснастки (пресс-формы, заливочные формы и др.). К первой группе относятся фторопласт-4, иногда эбонит, капролон. Ко второй – эпоксидная смола холодного отверждения ЭД-5 с кремнийорганическим наполнителем, стеклонаполненные пресс-материалы типов АГ-4В, ДСВ, КМК-218, КПС и др., а также высокоглиноземистые керамические типа кристаллокорунда и 22ХС. Из материалов первой группы изоляторы изготавливаются на универсальном оборудовании (токарные, фрезерные, сверлильные станки) и могут быть достаточно сложными. К недостаткам их следует отнести низкую технологичность процесса изготовления и низкую термостойкость материалов. Из материалов второй группы детали можно изготавливать достаточно простым способом с минимальной трудоемкостью и потерями материала. Недостатком является трудность обеспечения точности размеров и формы изолятора. Это объясняется наличием конусов и литейных уклонов, а также изменением коэффициента усадки у одного и того же

материала. В связи с этим в пресс-формах изготавливают простые детали, не требующие высокой точности.

Применение перспективных керамических материалов сдерживается двумя причинами. Первая – большой разброс коэффициента усадки шликерной массы при спекании, что не позволяет получать детали выше 11–12 квалитета размерной точности. Вторая причина – для их изготовления требуется специальное технологическое оборудование (шаровые мельницы, машины шликерного литья, водородные печи для спекания), что снижает рентабельность при мелкосерийном производстве.

Системы газоснабжения и охлаждения плазмотронов во многом определяют технологические возможности и габариты плазмотронов. Каналы для подачи плазмообразующего, защитного и стабилизирующего газов могут выполняться в теле основных элементов плазмотрона, образовываться при сопряжении этих элементов при наличии различных проточек на их поверхности, а также создаваться за счет сопряжения дополнительных промежуточных деталей. Системы охлаждения электрода и плазмообразующего сопла плазмотронов делятся на два основных типа: системы с воздушным и с водяным охлаждением. Могут быть плазмотроны со смешанной системой охлаждения теплонагруженных узлов. Чаще используются плазмотроны с водяной автономной системой охлаждения электрода и плазмообразующего сопла. Такие плазмотроны имеют достаточно высокую мощность, однако устройство их отличается сложным устройством, большим количеством комплектующих деталей, имеющих сложную форму, значительные габариты и массу. Плазмотроны с совмещенной системой охлаждения электродного и соплового узлов имеют меньшие габариты и массу, но снижается долговечность охлаждаемых узлов за счёт электрохимической эрозии.

5.6 Конструкция плазмотрона для ручной резки

Плазмотроны для ручной резки различают по типу поджига дуги:

– прямого действия – дуга возбуждается при прохождении электрического тока между катодом и анодом. Такие резаки применяются для резки электропроводных материалов (сталей и сплавов);

– косвенного действия – дуга поджигается между катодом и соплом. Плазмотроны этого типа используются для резания материалов, которые не проводят электрический ток (пластмассы и т. д.).

Конструктивно плазмотрон состоит из элементов, приведенных на рисунке 5.9. Они выполняют основные функции в процессе формирования плазменной дуги и поддержания её горения.

Технологический процесс плазменной резки заключается в поджиге дежурной дуги в результате прохождения электрического тока от катода на анод (металлическую заготовку). Пилотная дуга подготавливает пространство между плазмотроном и металлом, способствуя частичной ионизации. При её контакте с металлопрокатом автоматически увеличивается мощность и поджигается режущая плазменная дуга. За счёт направленного воздействия тепловой энергии дуги металл частично расплавляется и выдувается из зоны реза под воздействием кинетической энергии плазменного газа.

Производительность и возможности оборудования для ручной плазменной резки зависят непосредственно от технических характеристик. Основными из них являются: рабочая сила тока – определяет предельную толщину разрезаемого металлопроката, и может достигать от 40–400 А.



Рисунок 5.9 – Основные элементы плазмотрона для ручной резки

Продолжительность включения (ПВ) – определяет период непрерывной эксплуатации аппарата без перегрева. Обычно составляет от 40 (полупрофессиональные модели) до 100 % (профессиональные модели). Система охлаждения для мощных промышленных аппаратов оборудуются водяным охлаждением, а бытовые и полупрофессиональные модели – обычно воздушным. Дополнительный функционал включает защиту от перегрева (автоматическое

отключение), оснащение разъемами обратной связи для подключения кабелей с целью совместной работы с машинами ЧПУ и т. д. Важным параметром является конструкция плазмотрона для ручной резки и возможность его оснащения дополнительными приспособлениями, например, для поддержания постоянного расстояния между соплом и обрабатываемым металлом, высокоточного вырезания круглых заготовок или отверстий разных диаметров.

Основная классификация плазменного оборудования для ручного раскроя:

– инверторного типа – отличаются высоким КПД, энергоэффективностью, компактными размерами и небольшим весом. Такие аппараты выпускаются обычно небольшой мощности и позволяют резать металл толщиной до 20 мм и предназначены для бытового и полупрофессионального применения;

– трансформаторного типа – устройства для профессионального применения. Характеризуются высокой ПВ (80–100 %) и возможностью раскроя металлопроката толщиной до 100 мм и более.

Кроме дуговых используют высокочастотные плазмтроны, работающие на индуктивно-ёмкостном принципе, поэтому им не нужны аноды и катоды, не нужен также обязательный контакт электрической дуги с газом. В них горелка становится своеобразным резонатором. Газ в ней поджигают непосредственно токи высокой частоты (ТВЧ), проходящие сквозь стенки камеры, которые созданы из непроводящих материалов. Производители горелок пользуют для этого закаленное кварцевое стекло или керамику, а их необходимую защиту от перегрева обеспечивает газодинамическая изоляция и воздушное охлаждение. Внутреннее строение такой горелки проще, она компактнее и легче, но может использоваться лишь для разрезания тонких материалов (толщиной до 3 мм).

Существуют комбинированные плазмтроны. В комбинированных плазмтронах нагнетаемый газ поджигается как токами высокой частоты, так и горящим дуговым межэлектродным разрядом. Кроме этого, выталкиваемая струя в них сжимается параллельным воздействием магнитного поля. У приборов очень большой спектр регулировки мощности, что существенно расширяет основной функционал данных моделей.

Для нормальной работы в любой из описанных горелок важно стабилизировать процесс истечения плазмы, максимально сжать её и зафиксировать по оси отверстия сопла. Этого добиваются воздействием газа, воды либо магнитного поля. В первом случае горящий дуговой столб сжимается нагнетаемым внешним газом более холодной температуры, также участвующим в плазмообразовании. Во втором можно еще больше сжать плазменный столб, одновременно разогрев его до 50000 °С и выше. Но водяные пары сжигают электрод намного

быстрее. Магнитная стабилизация менее эффективна, но позволяет регулировать интенсивность плазменной струи и экономить используемый газ.

5.7 Применение плазменной обработки

Основные способы получения стационарной низкотемпературной плазмы основаны на использовании различных электрических разрядов, таких как тлеющий искровой; импульсный; барьерный; высокочастотный индукционный; высокочастотный емкостной; сверхвысокочастотный; электроискровой в кипящем слое; коронный, факельный, электродуговой; трансформаторный. Все эти перечисленные разряды реализуются в соответствующих плазмотронах, большей частью электродуговых и сверхвысокочастотных (СВЧ).

Плазмтроны могут применяться:

- при сварке, резке и обработке металлов, а также различных твёрдотельных материалов;
- для расплавления и рафинирования (очистки) металлических сплавов;
- при нанесении защитных покрытий на металлические поверхности (керамики, электроизоляции и т. д.);
- для упрочнения материалов металлическим наплавочными порошковыми материалами;
- для подогрева металлического расплава в мартеновских и плавильных печах;
- для термического обезвреживания высокотоксичной органики;
- для получения нанодисперсных порошков и соединений преимущественно сферической формы;
- при плазменной горной и шахтной проходке;
- при безмазутной растопке угольных котельных на электростанциях.

Неэлектропроводные материалы (бетоны, гранит, тонколистовые органические материалы) обрабатывают плазменной струей (дуга горит в сопле плазменной горелки между ее электродами). Нанесение покрытий (напыление) производится для защиты деталей, работающих при высоких температурах, в агрессивных средах или подверженных интенсивному механическому воздействию.

Материал покрытия (тугоплавкие металлы, окислы, карбиды, силициды, бориды и др.) вводят в виде порошка или проволоки в плазменную струю, в которой он плавится, распыляется, приобретает скорость – 100–200 м/с и в виде мелких частиц (20–100 мкм) наносится на поверхность изделия.

Плазменные покрытия отличаются пониженной теплопроводностью и хорошо противостоят термическим ударам. Мощность установок для напыления 5–30 кВт, максимальная производительность 5–10 кг напыленного материала в час.

Для получения порошков со сферической формой частиц, применяемых в порошковой металлургии и в аддитивных технологиях, в плазменную струю вводят материал, частицы которого, расплавляясь, приобретают под действием сил поверхностного натяжения сферическую форму. Размер частиц может регулироваться в пределах от нескольких мкм до 1 мм. Более мелкие (ультрадисперсные) порошки с размерами частиц 10 нм и выше получают испарением исходного материала в плазме и последующей его конденсацией.

Использование того или иного электрического разряда для создания плазмотрона, а также его конструкция определяются технологией и технико-экономическими показателями процесса. При выборе плазмотрона учитывают требуемую мощность, ресурс работы на плазмообразующем газе заданного химического состава, параметры плазменной струи (температуру, скорость, отсутствие загрязнений продуктами эрозии электродов), КПД (отношение энергии, затраченной на нагрев газа и химические реакции, к потребляемой энергии), удобство обслуживания и безопасность эксплуатации. При определении КПД установки плазмотрона следует учитывать потери энергии в источнике питания и подводящих коммуникациях.

Если отсутствуют специальные требования к чистоте целевого продукта, то чаще всего выбирают электродуговые плазмотроны, а при наличии таких требований – безэлектродные (индукционные или емкостные) высокочастотные плазмотроны. Электродуговые плазмотроны работают практически на любых газах. Их применяют также в тех случаях, когда требуемая мощность превышает 300–500 кВт.

5.8 Установки электронно-лучевого нагрева

Электронный луч представляет собой направленный поток электронов, переносящих свою энергию от излучателя к изделию (объекту).

Схема электронно-лучевой установки приведена на рисунке 5.10.

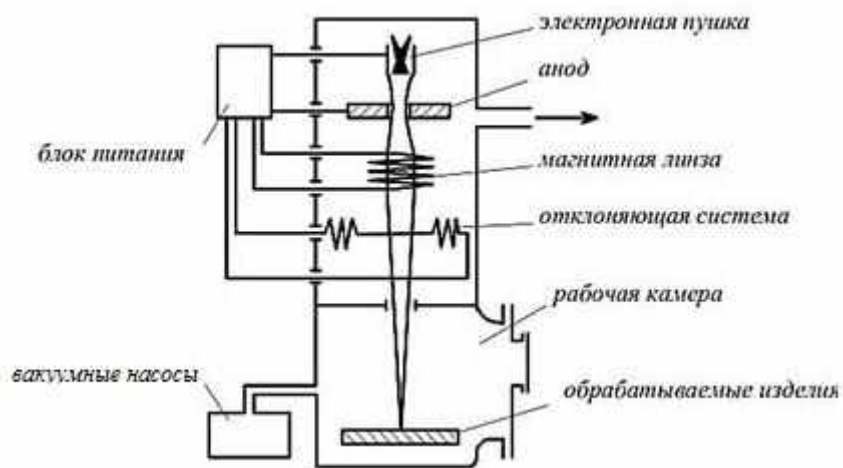


Рисунок 5.10 – Схема электронно-лучевой установки

Ускоренные электроны, получившие кинетическую энергию пропорционально их скорости, передают её материалу обрабатываемой поверхности. Ввиду того, что электроны отдают при столкновении с молекулами и атомами обрабатываемого материала свою энергию, в рабочей камере должен поддерживаться глубокий вакуум, который необходим для защиты катода от бомбардировки положительными ионами.

Испускаемые катодом электроны получают ускорение в электрическом поле и формируются электромагнитными полями в электронный пучок или луч. Сформированный пучок электронов проходит через рабочую камеру и попадает на поверхность обрабатываемого объекта.

Глубина проникновения электронов и протяженность зоны интенсивного выделения тепловой энергии составляет около 10^{-6} м и для твёрдых тел нагрев является поверхностным. Мощность рентгеновского излучения в энергетическом балансе электронно-лучевой установки очень мала, однако его биологическое воздействие для человека является опасным. Поэтому при разработке и изготовлении электронно-лучевых установок (ЭЛУ) необходимо предусмотреть мероприятия по защите обслуживающего персонала от рентгеновского излучения.

Конструктивные особенности электронно-лучевых установок.

Все конструкции электронно-лучевых установок имеют набор систем, которые сходны по своему назначению и принципу действия. Их можно разделить на два комплекса – энергетический и электромеханический.

Энергетический комплекс состоит из электронной пушки с блоками питания и управления лучом. Электронной пушкой является устройство, в котором пучок электронов под воздействием

электрического и магнитного поля фокусируется в луч, ускоряется электрическим полем, выводится через анод и направляется на нагреваемое изделие или поверхность.

Одним из главных узлов электронной пушки является катод. Его изготавливают из тугоплавких металлов (W, Ta, Mo), оксидов редкоземельных металлов (Zr, La). Катоды прямого нагрева применяются при небольших токах эмиссии (до 20 мА), катоды косвенного нагрева – при больших (до 200 мА). Заданная плотность электронного луча находится путём подбора конфигурации катода и анода, так как после прохождения анода электроны движутся в пространстве вне электрического поля. Ввиду того, что электронный луч обладает объёмным пространственным зарядом, в результате столкновения электронов нарушается фокусировка луча. Поэтому после электростатической фокусировки луч дополнительно фокусируется линзой, которая представляет собой электромагнитную катушку.

Электромеханический комплекс включает вакуумную рабочую камеру, систему позиционирования и перемещения заготовки, систему наблюдения за ходом процесса, систему защиты от рентгеновского излучения.

Вакуумная камера является базовым элементом электронно-лучевой установки, наиболее важным и сложным узлом электромеханического комплекса. Конструкция определяется видом технологического процесса. Камера должна быть герметичной и механически прочной. Материал, из которого она изготовлена, должен поглощать рентгеновское излучение.

Главная функция вакуумной камеры – создание и поддержание в рабочем объеме и в электронной пушке необходимого вакуума.

Система позиционирования и перемещения заготовок определяется видом операции. Самым простым устройством, применяемым при электронно-лучевой плавке, можно считать устройство вытягивания слитка. Самые сложные системы бывают задействованы при размерной обработке: они обеспечивают 5–6 видов различных перемещений с точностью 1–5 мкм.

Электронные плавильные установки.

Плавильные установки предназначены, в основном, для переплавки стали, молибдена, ниобия и других тугоплавких и химически активных металлов. Их мощность варьирует от 50 до 2000 кВт.

Одна из простых схем электронной плавильной установки с кольцевым катодом и автоэлектронным нагревом, в которой анодом является сам расплавляемый металл, представлена на рисунке 5.11. Катодом К служит нагретая током до 2500 К вольфрамовая спираль. Анодом А является расплавляемый электрод и жидко слой металла в верхней части слитка, образующегося в кристаллизаторе. Катод

окружает молибденовый экран Э, находящийся под тем же потенциалом. Покидающие катод электроны отталкиваются экраном и в виде кольцевого пучка направляются на электрод и на поверхность слитка. Нижняя часть электрода расплавляется под ударами бомбардирующих его электронов. Расплавленный металл каплями стекает в ванну.

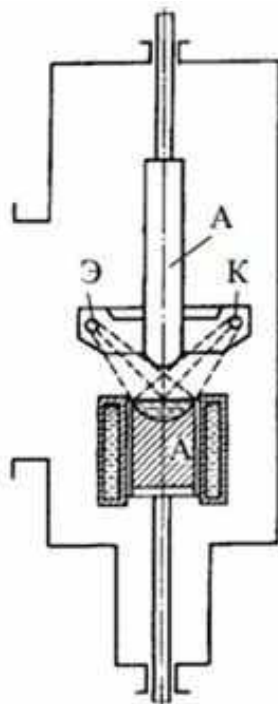


Рисунок 5.11 – Схема электронно-лучевой установки с кольцевым катодом

Электронные сварочные установки в отличие от плавильных работают с сфокусированным лучом при ускоряющем напряжении от 70 до 100 кВ.

Электроснабжение электронно-лучевой установки.

Для работы электронно-лучевой установки применяются высоковольтные источники питания постоянного тока. Они включают повышающие трансформаторы и высоковольтные выпрямители.

Из всех конструкций электрических печей электронно-лучевые установки являются самым сложным комплексом электротехнологического оборудования. В системах электроснабжения электронно-лучевых установок электрические цепи делят на основные и вспомогательные. Основными считают цепи накала катода, питания преобразователя постоянного тока, а также цепи питания, получения, измерения и контроля вакуума; вспомогательными – цепи фокусировки, отклонения и развёртки электронного луча. От работы системы питания электронно-лучевой установки и обеспечения вакуума зависит качество переплавляемого металла.

Применение электронно-лучевого нагрева.

Технологические операции электронно-лучевой обработки можно подразделить на следующие группы: плавка (технологические операции плавки в вакууме, локального переплава), испарение (испарение в вакууме), размерная обработка электронным лучом, термообработка (без изменения агрегатного состояния вещества), сварка.

Параметры, определяющие размеры участка, обрабатываемого электронным лучом, определяются теплопроводностью и температурой плавления.

Плавка электронным лучом в вакууме.

Целесообразна в случае, когда нужно получить сверхчистые металлы. Она имеет преимущества перед плавкой в вакуумных электрических печах других типов, так как позволяет производить рафинирование жидкого металла в кристаллизаторе после прекращения плавления электрода, а также осуществлять другие физико-химические процессы, которые при иных способах плавки не могут проходить полностью или не протекают вовсе. Переплавляемый материал может быть применен в любой форме (шихта, прутки, лом, спечённые штабики, губка).

Важное значение при электронно-лучевой плавке имеет вакуум. В нём осуществляется интенсивный процесс дегазации, который значительно улучшает механические свойства металла, особенно пластичность. Многие сплавы на основе вольфрама, молибдена, ниобия и других химически активных металлов нашли широкое применение только благодаря тому, что их выплавляют в вакууме. Некоторые вредные примеси (нитриды, карбиды, оксиды) при нагреве в вакууме разлагаются, за счёт этого осуществляется вакуумное рафинирование переплавляемого металла. Во время плавки металла в вакууме постоянно происходит удаление газообразных продуктов из зоны реакции, в результате активизируются раскислительные реакции. Этот процесс повышает качество выплавляемого в вакууме металла, существенно снижает в нём количество газов, и в первую очередь – кислорода.

Особенно эффективна электронно-лучевая плавка при выращивании монокристаллов, когда на затравку наплавляется материал из тигля и вытягивается с определенной скоростью вертикально вверх с получением монокристалла.

Часто применяют электронно-лучевую плавку с последующей заливкой в вакууме литейных форм. На специальных электронно-лучевых установках для плавки в вакууме при давлении 104–107 Па получают слитки массой до 20 т.

Локальный переплав обрабатываемых поверхностей с использованием электронного луча позволяет получать большие скорости кристаллизации металла в зоне плавления. Формирующиеся

при этом структуры существенно отличаются от структур, образующихся в обычных условиях: измельчается микроструктура, значительно повышаются пластичность, твердость и износостойкость.

Поверхностное оплавление металла называют «облагораживающим»: это позволяет при изготовлении важных конструкций с улучшенными показателями износостойкости применять недорогие исходные металлы и сплавы.

Испарение материалов при нагреве в вакууме электронным лучом широко применяют для получения тонких плёнок. В отличие от других способов испарения металла, когда энергия подводится к испаряемой поверхности через стенку тигля или высокотемпературный нагревательный элемент, при электронно-лучевом испарении идет прямой нагрев поверхности испаряемого металла. Этот способ позволяет испарять материалы из водоохлаждаемых тиглей, что особенно важно при работе с химически активными и тугоплавкими металлами. При электронно-лучевом испарении можно управлять электронным пучком как в пространстве, так и во времени, регулируя при этом интенсивность ввода энергии в испаряемое вещество, влияя тем самым на скорость испарения.

Широко применяется электронно-лучевое испарение в микроэлектронике для нанесения металлических покрытий на стальную ленту, для изготовления фольги определённого состава. Электронным лучом возможно испарение с последующим осаждением на подложку различных неметаллических материалов: диоксида кремния, оксида алюминия, различных видов стекла.

Размерной обработкой заготовки электронным лучом получают глухие или сквозные отверстия определённых размеров или контуры заданной формы. Размерная обработка материала основана на том, что при большой удельной поверхностной мощности скорость испарения обрабатываемого материала и давление пара возрастают настолько, что весь жидкий металл с потоком пара выбрасывается из зоны обработки. Дозирование подводимой энергии достигается импульсным воздействием электронного луча на поверхность или его перемещением по ней с расчётной скоростью.

Одной из разновидностей размерной электронно-лучевой обработки является перфорация – получение мелких сквозных отверстий в различных материалах. Таким способом изготавливают металлические и керамические элементы фильтров, пористый материал для охлаждения камер сгорания и отверстия в лопатках турбин.

Термообработка при помощи электронного луча заключается в локальном нагреве обрабатываемых участков детали для получения структурных превращений материала. Кроме этого она применяется для отжига материалов в вакууме.

Электронно-лучевая сварка – одна из наиболее распространенных областей использования электронно-лучевой обработки. Тонкий луч электронов, фокусируемый на стыке соединяемых деталей, нагревает их до плавления. Сварочный шов при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) получается высокого качества. Количество энергии, необходимое для расплавления материала с применением электронного луча, гораздо меньше, чем при других видах нагрева в процессе сварки. Это объясняется высокой концентрацией энергии в фокусе электронного луча. При электронно-лучевой сварке благодаря высокой концентрации энергии в сварочной зоне сварочный шов имеет форму вытянутого клина с большим отношением длины зоны расплавления к ее ширине. Как правило, глубина проплавления электронным лучом больше ширины шва до 20 раз.

Установки ЭЛС бывают двух типов: низковольтные с рабочим ускоряющим напряжением до 15–20 кВ и высоковольтные, работающие при ускоряющем напряжении 150–200 кВ. Их конструкции не имеют особых отличий от установок для выполнения других технологических операций. Но всё же есть некоторые конструктивные и схемные особенности. В состав электронно-лучевой сварки включают специальное сварочное оборудование: сварочную вакуумную камеру с вакуумной насосной системой, электронную пушку с высоковольтным источником постоянного тока.

Вакуумная камера обязательно снабжается вакуумными вводами для передачи разнонаправленных движений, подачи охлаждающей воды, подвода электропитания к катоду, магнитным линзам и т. д. В камерах имеются специальные люки для загрузки и выгрузки деталей, а также механизмы и устройства, обеспечивающие технологический процесс сварки. Снаружи ведется наблюдение по приборам для определения степени вакуума в отсеках камеры.

5.9 Принципы работы лазеров и использование лазерных установок

Принцип работы оптического квантового генератора (ОКГ) основан на генерировании монохроматических волн оптического диапазона под действием индуцированного излучения.

Одна из схем формирования луча лазера приведена на рисунке 5.12.

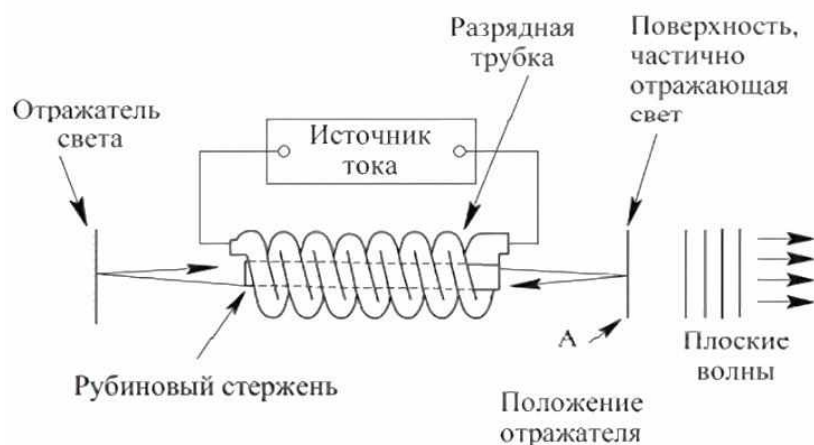


Рисунок 5.12 – Схема твердотельного оптического квантового генератора (лазера)

Оптические квантовые генераторы имеют много общего и независимо от конструктивного исполнения они включают следующие элементы:

- рабочее тело, состоящее из набора атомов или молекул, для которых может быть создана инверсия населённости;
- систему, дающую возможность осуществлять инверсию, называемую системой накачки;
- оптический резонатор;
- блок для вывода энергии из резонатора;
- блок управления концентрацией энергии и геометрическим положением направленного луча света;
- специальные системы регулирования и управления, связанные с конкретной конструкцией и применением лазеров.

С целью инверсии населенности в лазерах используют различные виды накачки:

- оптическую, осуществляемую путём облучения вещества мощным световым потоком;
- электрическую – за счёт прохождения через вещество электрического тока;
- химическую – когда инверсия появляется в результате химической реакции, причем в ней принимает участие и рабочее вещество, и т. д.

Для ОКТ предусматривается режим работы – непрерывный и импульсно-периодический.

В настоящее время лазеры по роду материалов, применяемых для получения индуцированного излучения, подразделяют на четыре типа: твердотельные с оптическим возбуждением, полупроводниковые (инжекционные), жидкостные и газовые.

Лазеры твердотельные с оптической накачкой.

В лазерах с данным излучателем активным элементом является твёрдое тело. В таких лазерах основная масса диэлектрика (матрица) конкретного участия в генерации индуцированного излучения не принимает. Излучение и генерация частиц связаны с происходящими в матрице переходами атомов активатора, содержащегося в ней в количестве 0,01–10 %.

Матрица состоит из кристаллов щелочно-земельных фторидов, вольфраматов или молибдатов, синтетического рубина, иттриево-алюминиевых гранатов, стекла различных составов. В качестве стимулирующих добавок активаторов применяются различные редкоземельные элементы, хром и уран.

Схема твердотельного оптического квантового генератора с рубиновым стержнем представлена на рисунке 5.13.

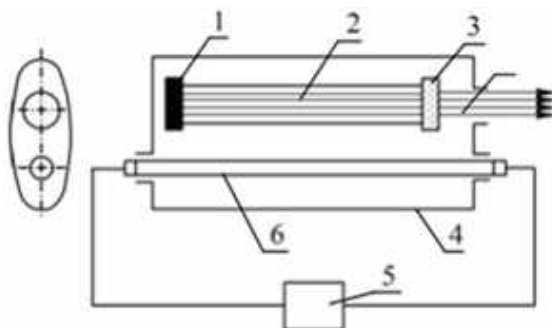


Рисунок 5.13 – Принципиальная схема твердотельного лазера:
1, 3 – зеркала; 2 – рубиновый стержень; 4 – кожух; 5 – источник напряжения; 6 – лампа-вспышка

Активный элемент 2, изготовленный из рабочего вещества, устанавливают между зеркалами 1, 3. Зеркало 1 полностью отражает все направленные на него лучи, а зеркало 3 является полупрозрачным. Для накачки энергии применяют газоразрядную лампу-вспышку 6, которая для большего облучения кристалла находится вместе с ним внутри отражающего кожуха 4, выполненного в форме эллипса. При размещении лампы и кристалла в фокусах эллипса создаются оптимальные условия равномерного освещения активного элемента. Лампа-вспышка питается от импульсного источника 5 высокого напряжения.

Твердотельные полупроводниковые лазеры.

В лазерах данного типа в качестве излучающего свет вещества используется полупроводниковый элемент.

В полупроводниковых лазерах возбуждение осуществляется при инжекции носителей заряда через р-п-переход, поэтому их называют инжекционными. Лазером такого типа является полупроводниковый

квантовый генератор на р-п-переходе в арсениде галлия. Акцепторными добавками в арсениде галлия служат цинк, кадмий, индий и др., донорными примесями – теллур, селен и др.

Жидкостные лазеры разработаны на основе растворов редкоземельных ионов в некоторых неорганических жидкостях. В лазерах непрерывного и импульсного действия в качестве активной среды используются также растворы органических красителей. Главное преимущество жидкостных лазеров – возможность циркуляции жидкости с целью ее охлаждения, что обеспечивает получение больших энергий и мощностей излучения в импульсном и непрерывном режимах.

В жидкостных лазерах в резонатор вместо стеклянного стержня устанавливают кювету с раствором. Инверсия населенности происходит за счет накачки от импульсных ламп; КПД преобразования энергии оптической накачки в энергию генерации достигает 50 %.

Лазеры, работающие на неорганических активных жидкостях, характеризуются большими импульсными энергиями при средней мощности и генерируют излучение с узким спектром частот. Широкие спектральные линии люминесценции органических красителей дают возможность изготавливать лазеры с непрерывной перестройкой длин волн излучения в диапазоне до нескольких сотен ангстрем. Заменяя органические красители, можно добиться перекрытия всего видимого и части инфракрасного участков спектров.

Газовые лазеры. Устройство лазеров данной конструкции существенно проще рассмотренных выше. Стеклянную трубку наполняют специальной активной газовой смесью, атомы или молекулы которой могут определенное время находиться в метастабильном состоянии: аргон, неон, криптон, ксенон, смеси гелия и неона, углекислый газ с добавкой азота и др. В ее торцы впаивают два электрода и к ним подводят напряжение от источника питания. В трубке возникает газовый разряд. Меньшая плотность и более высокая однородность газов, по сравнению с твердыми телами и жидкостями, не вызывают искажения светового луча, его рассеяния и потерь энергии. По этой причине направленность лазерного излучения в газах существенно увеличивается, достигая предела, обусловленного дифракцией.

В газоразрядных лазерах инверсия населенностей обеспечивается благодаря возбуждению молекул электронным ударом и резонансной передачей энергии возбуждения. Для передачи энергии возбуждения в состав газа вводят молекулы азота N_2 , которые сами возбуждаются электронным ударом. В режиме тлеющего разряда, как правило, до 90 % молекул азота переходят в возбужденное состояние. Азот активно накапливает энергию возбуждения и в процессе неупругих столкновений без препятствий передает ее молекулам CO_2 . Высокая инверсия населенностей обеспечивается введением в рабочую смесь

гелия He. Он облегчает условия возникновения разряда и способствует опустошению нижних лазерных уровней молекулы углекислого газа.

Лазеры большой мощностью часто применяются в технологических процессах сварки, закалки, резки и сверления различных материалов без возникновения в них механических напряжений, с очень высокой точностью и качеством обработки. Лазерами можно обрабатывать материалы любой твердости: металлы, алмазы, рубины.

Лазерная резка предусматривает разделение материала под воздействием выделяющейся в нем теплоты с поддувом в зону резки газа. Поддув удаляет продукты разрушения металла. Данный способ резки особенно эффективен при обработке дорогих металлов и сплавов, так как дает минимальные отходы. Он широко применяется в электронной и микроэлектронной промышленности при производстве полупроводников и интегральных схем. Лазерная резка успешно применяется в легкой промышленности; раскрой тканей, кожи и другие операции. Освоены технологические процессы лазерного изготовления глухих и сквозных отверстий при производстве алмазных фильер, рубиновых часовых камней и других элементов.

Лазерная сварка оказалась наиболее эффективна в микроэлектронике. Она незаменима при соединении плоских выводов с монтажом печатных плат. Лазерной сваркой осуществляют герметизацию металлических корпусов интегральных схем. Кратковременность нагрева и высокая локальность при ее использовании позволяют понизить температуру в очень чувствительных к нагреву элементах интегральных схем.

Лазерной сваркой можно соединять металлы с различными свойствами, и даже с неметаллами. Она с успехом может применяться для сварки крупногабаритных деталей и узлов.

Технологический процесс лазерной обработки делится на ряд стадий: поглощение световой энергии твердым телом; нагрев материала без разрушения, в том числе плавление; разрушение материала путем испарения и выброса его расплавленной части; остывание по окончании обработки.

В состав лазерной технологической установки, согласно ее назначению, кроме лазера может входить целый ряд специфических блоков и устройств. Структурная схема промышленной лазерной установки показана на рисунке 5.14.

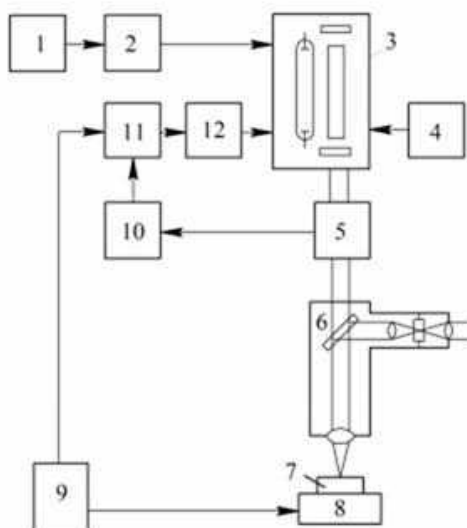


Рисунок 5.14 – Структурная схема промышленной лазерной установки:

1 – зарядное устройство; 2 – ёмкостный накопитель; 3 – лазерная головка; 4 – система охлаждения; 5 – датчик контроля энергии излучения; 6 – оптическая система; 7 – изделие; 8 – стол; 9 – система программного управления; 10 – система стабилизации энергии излучения; 11 – система управления; 12 – блок поджига

Широкое применение лазерной обработки обусловлено её уникальными возможностями: передачей энергии в виде светового луча на значительные расстояния в любой оптически прозрачной среде; отсутствием механического и электрического контактов между источником энергии с изделием в зоне обработки; наличием высокой концентрации энергии в точке нагрева и др. Лазерные технологии позволяют осуществлять нагрев металла без его разрушения, включая плавление; разрушение металла путем испарения, резку и сварку металла; прошивку отверстий и т. д.

Лазерное излучение в последнее время широко применяется в медицине, в горном деле и в других областях.

Глава 6. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

6.1 Характеристика процессов электроэрозионной обработки материалов

Развитие теории и практики преобразования электрической энергии в другие виды позволили разработать методы электрофизического и электрохимического воздействия электрического тока на обрабатываемый материал с целью его размерной обработки, придания особых свойств и для других целей. Так были созданы специальные методы обработки.

Для формообразования деталей из электропроводящих материалов большие возможности возникают в процессе электроэрозионной обработки (ЭЭО), с помощью которой можно обрабатывать материалы высокой твердости и прочности, придавая им заданную форму.

Основы электроэрозионной обработки разработаны советскими учеными супругами Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко в 1943 году.

Электроэрозионная обработка (Electric discharge machining – EDM, англ.) – обработка, заключающаяся в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под действием электрических разрядов в результате электрической эрозии.

Электрическая эрозия – разрушение поверхности электродов, сопровождающееся съемом металла при прохождении между электродами электрических разрядов.

Электрический разряд – пробой в газе или жидкости.

Режим электроэрозионной обработки – совокупность параметров, при которых выполняется электроэрозионная обработка.

К параметрам относят частоту и форму импульсов, их скважность, ток, напряжение, скорость движения подачи.

Понятие скважности в качестве параметра режима ЭЭО задают только в станках российского производства.

Под скважностью понимают отношение периода повторения импульсов к их длительности.

Такое понятие в технологических инструкциях к импортному оборудованию не применяется. В них указываются только режимы настройки генератора импульсов (положение регулятора мощности и максимальная величина тока в импульсе, которые обеспечат заданную шероховатость после обработки, либо требуемую производительность процесса).

Все станки для электроэрозионной обработки делятся на две большие группы:

– станки для объемного копирования (включая координатно-прошивочные и контурной обработки);

– проволочно-вырезные станки.

В пределах каждой группы можно выделить более мелкие подгруппы станков, предназначенные для выполнения определенного вида работ. Например, отдельную подгруппу координатно-прошивочных станков образуют установки для прошивания отверстий («супердрели» по японской, «дрели» по швейцарской классификации), в другую подгруппу входят 4-х–8-ми координатные станки для контурной обработки заготовок и т. д.

В зависимости от размеров обрабатываемых деталей электроэрозионные станки делятся на следующие подгруппы:

– станки для обработки мелких деталей в электронной промышленности, точном машиностроении и приборостроении, часовой промышленности и др. отраслях;

– классические станки для обработки деталей в станкостроении, машиностроении, инструментальном производстве и др., когда вес детали колеблется в пределах от нескольких килограммов до сотен килограммов;

– крупногабаритные станки для обработки деталей весом 3–20 т и более, при получении полостей в которых могут использоваться электроды весом более 5 т.

Станки для объемного копирования и вырезные установки в зависимости от достигаемой точности обработки делятся на следующие типы:

– крупногабаритные электроэрозионные установки нормальной точности;

– установки повышенной точности;

– прецизионные электроэрозионные установки.

Станки нормальной точности при обработке заготовок в стандартных рабочих жидкостях обеспечивают точность размеров на детали в пределах 5–10 мкм и параметры шероховатости поверхностей 0,7–0,8 мкм за 2–3 прохода. Точность, которую обеспечивают при обработке станки второго типа, составляет ± 3 мкм, а шероховатость поверхностей – 0,6–0,8 мкм. Прецизионные электроэрозионные установки обеспечивают точность обработки в пределах $\pm 1,5$ мкм. Шероховатость поверхностей колеблется в пределах 0,17–0,7 мкм. При использовании специальных сред параметры шероховатости поверхностей деталей, обработанных на приведенном выше оборудовании, составляют от 0,04 до 0,08 мкм.

Некоторые производители электроэрозионного оборудования для удовлетворения многократно возросших потребностей микроэлектроники предлагают вырезные станки (например, модели от

фирмы Sodick), которые обеспечивают точность обработки в пределах $\pm 0,1$ мкм.

В зависимости от применяемых диэлектрических жидкостей оборудование для электроэрозионной обработки подразделяется на следующие группы:

- станки, на которых обработка (преимущественно вырезная) осуществляется в воде;
- станки, обеспечивающие обработку в углеводородном диэлектрике;
- станки, оснащенные комбинированными диэлектрическими системами.

Следует отметить, что при обработке деталей в воде достигается значительно бóльшая, по сравнению с обработкой в углеводородных диэлектриках, производительность обработки. Однако при использовании углеводородных сред можно добиться более высокого качества обработанной поверхности.

В зависимости от способа подачи рабочей жидкости в межэлектродный промежуток (МЭП) применяют электроэрозионные установки, работающие:

- при погружении детали и инструмента в диэлектрическую жидкость (станки с ванной для погружной обработки);
- при струйной подаче диэлектрика через межэлектродный промежуток;
- при отсосе продуктов обработки из зоны обработки.

На станках для ЭЭО реализуют следующие режимы обработки.

Электроискровая обработка – режим электроэрозионной обработки, протекающий при длительности импульса тока 0,01–1 мкс, энергии разряда 4–5 Дж, скважности 5–10 и частоте следования импульсов до 10 МГц.

Электроискровая обработка применяется преимущественно при выполнении черновой и последующих видов обработки на вырезных станках, а также при чистовой и доводочной обработке заготовок на станках для объемного копирования (прошивочных) и выполняется при прямой полярности включения электродов.

Электроимпульсная обработка – режим электроэрозионной обработки, протекающий при длительности импульсов тока 0,1–100 мкс, энергии разряда до десятков Дж, скважности до 5 и частоте следования импульсов от десятков Гц до десятков кГц.

Электроимпульсная обработка применяется при черновой обработке заготовок на станках для объемного копирования и осуществляется при обратной полярности включения электродов.

Полярность – возможный вариант подключения электрода-инструмента и заготовки к полюсам генератора импульсов, определяющий условия разрушения включенных в цепь электродов.

Прямая полярность – вариант подключения электродов, при котором ЭИ подключен к отрицательному полюсу, а заготовка – к положительному полюсу генератора импульсов.

Обратная полярность – вариант подключения электродов, при котором ЭИ подключен к положительному, а заготовка – к отрицательному полюсу генератора импульсов.

Один из электродов является обрабатываемой заготовкой, другой электрод – инструментом. Разряды производятся периодически, импульсно, так, чтобы среда между электродами восстановила свою электрическую прочность. Для уменьшения износа электрода-инструмента подаются униполярные импульсы технологического тока. Полярность зависит от длительности импульса, поскольку при малой продолжительности импульса преобладает эрозия (износ) анода, а при большой длительности импульса преобладает эрозия (износ) катода. На практике используются оба способа подачи униполярных импульсов: с подключением заготовки к положительному полюсу генератора импульсов (т. н. включение на прямую полярность), и с подключением заготовки к отрицательному полюсу (т. н. включение на обратную полярность).

Физическая модель единичного импульсного электрического разряда и стадии его протекания могут быть представлены следующим образом (рис. 6.1).

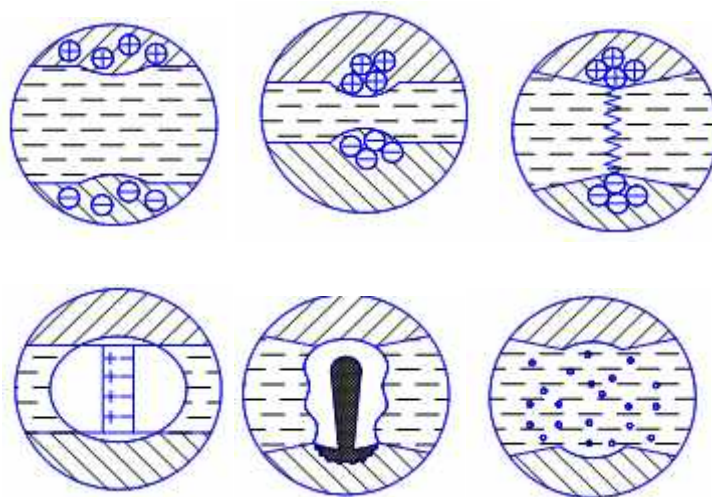


Рисунок 6.1 – Стадии протекания единичного импульсного электрического разряда при электроэрозионной обработке

Электрические заряды концентрируются на поверхностях электрода-инструмента и заготовки. Между ними существует электрическое поле, напряженность которого наиболее интенсивна в точке, где межэлектродный зазор между рабочими поверхностями электродов минимален. Напряженность электрического поля возрастает

до тех пор, пока не превысит некоторого предельного значения. В этот момент скачкообразно нарушается прочность диэлектрика и происходит пробой межэлектродного промежутка, проводимость значительно возрастает и наблюдается его ионизация. Пробой является начальной стадией разряда, вызывающего эрозию электродов. При пробое частицы, находящиеся в зоне разряда, ориентируются определенным образом и формируют канал разряда. В результате пробоя между электродами вначале протекает искровой разряд. После этого напряжение падает, а поступление тока на этом участке межэлектродного промежутка продолжается на протяжении всего разряда. Затем образуется плазма, которая выплавляет металл с электродов, появляется газовый пузырь, пары металлов выдавливаются в МЭП, происходит восстановление слоя рабочей жидкости в зазоре между электродами.

После прекращения импульса тока пары и капли металла и газа осаждаются в диэлектрической жидкости. Возможны различные механизмы удаления металла с поверхности электродов. Наиболее эффективными следует считать: удаление металла с поверхности электрода в капельном состоянии; при испарении и капельном выбросе продуктов эрозии; а также взрывное испарение материала электродов. В результате действия каждого разряда на поверхностях электродов в общем случае образуются эрозионные лунки, имеющие форму тела вращения в виде сплюснутого эллипсоида вращения. В некоторых случаях на электродах образуются отдельные лунки правильной круговой формы, перекрывающие друг друга. Общий эрозионный эффект определяется полярностью включения электродов, электрическими и энергетическими параметрами разряда, свойствами диэлектрической жидкости, материалом электродов. При этом структура поверхности эрозионной лунки на электродах весьма неоднородна. Это связано с тем, что линии тока за время следования единичного импульсного разряда перемещаются по поверхности электродов в пределах образующегося после пробоя МЭП канала разряда. Подбирая полярность включения электродов, энергию импульса, величину тока в нём, материалы электродов, а также соответствующую диэлектрическую жидкость, можно добиться минимальной эрозии электрода-инструмента при максимальной эрозии заготовки.

В большинстве схем электроэрозионной обработки, проводимой в диэлектрической жидкости, используются следующие два метода генерирования импульсных разрядов.

Первый метод обеспечивает получение коротких импульсных разрядов большой скважности, которые применяют при обработке твердых сплавов и тугоплавких материалов.

Второй метод генерирования применяют для получения импульсов значительной длительности с малой скважностью, которые используют при обработке сталей и магнитных материалов, имеющих сравнительно невысокую температуру плавления.

Электроэрозионные вырезные станки и оборудование для прошивочной обработки обладают широчайшими технологическими возможностями и обеспечивают обработку деталей и элементов в них практически любой сложности.

К таким элементам и деталям относят сложные формообразующие полости штампов, пресс-форм, литьевых форм, матрицы штампов, экструзионные фильеры для изготовления прессованных изделий, мелкозубчатые эвольвентные зубчатые колеса, электроды из графита, используемые при прошивочной обработке, обеспечивается также конусное резание при обработке литьевой оснастки (матриц и пуансонов) и т. д.

Могут обрабатываться твёрдые сплавы, коррозионно-стойкие стали, хромоникелевые стали, в т. ч., закалённые стали.

К достоинствам электроэрозионной обработки относят:

- возможность обработки с высокой точностью токопроводящих материалов любой твёрдости;
- возможность обработки деталей сложных пространственных форм;
- возможность получения прецизионных элементов формы в детали, возможность обработки отверстий сверхмалого диаметра;
- отсутствие непосредственного контакта между деталью и инструментом, а, соответственно, и механического воздействия на обрабатываемую деталь, что увеличивает точность обработки;
- значительное снижение количества отходов по сравнению с механической обработкой, при электроэрозионном вырезании имеется возможность изготовления взаимно сопрягаемых профилей с высокой точностью, что чрезвычайно актуально в инструментальном производстве (например, при изготовлении штампов, пресс-форм, литьевых форм);
- значительное снижение трудоёмкости обработки сложных изделий из труднообрабатываемых металлов и сплавов.

К недостаткам метода можно отнести:

- при обеспечении высоких требований по точности и качеству обработки необходимо обеспечивать несколько черновых и чистовых проходов при электроэрозионной вырезке, а также необходимо изготавливать нескольких электродов для выполнения электроэрозионного объёмного копирования;
- потенциальная опасность самовозгорания при использовании рабочих жидкостей на основе углеводородных сред;

– необходимость дополнительного времени на изготовление специализированного инструмента – электродов, державок к ним, приспособлений.

Высокой эффективности использования электроэрозионной обработки можно добиться при оснащении станков системами числового программного управления. В программное обеспечение таких систем закладывают максимально возможное количество выполняемых функций, важнейшими из которых является автоматическое регулирование зазора, режимов обработки, поддержание оптимальной скорости подачи.

Одной из разновидностей электроэрозионной обработки является электроконтактная обработка материалов, выполняемая на воздухе.

Электроконтактная обработка основана на механическом разрушении или формоизменении металлических поверхностей, производимом одновременно с нагревом или расплавлением этих поверхностей электрическим током. При этом методе в месте контакта двух токопроводящих поверхностей ввиду повышенного переходного сопротивления выделяется тепло, а также образуется электрический дуговой разряд.

Удаление металла с заготовки происходит в среде диэлектрика за счет микроарзрядов, расплавляющих часть металла (рис. 6.2).

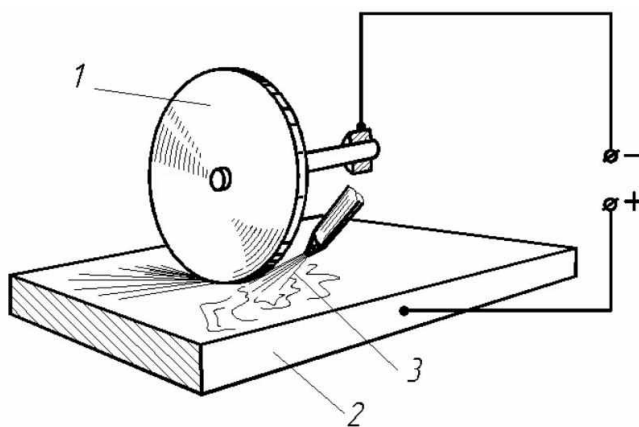


Рисунок 6.2 – Схема процесса электроконтактной обработки

При электроконтактной обработке высоколегированных сталей скорость съема металла достигает 130 кг/ч при потребляемой мощности 300 кВт. В то же время такой метод не обеспечивает высокой точности и шероховатости поверхности (после обработки $Ra = 3,2-25$ мкм). Поэтому электроконтактная обработка используется, главным образом, для выполнения грубых и неответственных операций, например, зачистка отливок и штампованных заготовок из труднообрабатываемых сплавов. Электроконтактную обработку широко применяют для резки заготовок. Удаление металла из межэлектродного промежутка

происходит в результате расплавления и частично испарения частиц металла заготовки 2 с последующим выбросом их воздушным потоком, создаваемым в межэлектродном промежутке вращающимся диском 1. В отдельных случаях используется подача жидкости 3 для его охлаждения. При зачистке слитков из нержавеющей стали с целью улучшения процесса удаления диспергированного металла при больших скоростях съема используют сжатый воздух с давлением не менее 0,35 МПа.

Электроконтактную обработку можно проводить при постоянном и переменном токе, в воздухе или жидкости (воде с антикоррозионными добавками). При обработке электрод-инструмент и заготовку полностью погружают в жидкость либо подают жидкость в межэлектродный промежуток распылением.

Обработку производят при токах до 5000 А и напряжениях холостого хода источника питания 18–40 В.

Электроконтактным методом производят получистовое точение тел вращения, чистовую резку, прошивание цилиндрических, фасонных отверстий и объёмных полостей, фрезерование, шлифование. Электроконтактной метод особенно эффективен при обработке заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов, а также чугунов высокой твёрдости, монокристаллов, материалов с высокими теплофизическими свойствами.

6.2 Сущность процессов электрохимической обработки

Электрохимическая обработка (ЭХО) – способ обработки электропроводящих материалов, заключающийся в изменении формы, размеров и (или) шероховатости поверхности заготовки вследствие анодного растворения её материала в электролите под действием электрического тока.

Электролитами называются вещества, растворы и расплавы которых могут проводить электрический ток ионами, образующимися в результате электролитической диссоциации. В отличие от металлов и полупроводников растворы и расплавы электролитов обладают ионной проводимостью.

Приоритет открытия методов электрохимической обработки металлов принадлежит русским учёным. Своё начало электрохимическая обработка берёт от процесса электрохимического полирования, предложенного ещё в 1911 г. известным русским химиком Е. И. Шпитальским.

Первые опыты В. Н. Гусева по интенсификации обработки деталей машин привели к тому, что ещё в 1928 г. удалось осуществить

электрохимическую обработку станин крупных металлорежущих станков. Тогда-то В. Н. Гусевым (в соавторстве с Л. А. Рожковым) и было предложено вести процесс ЭХО на узких (до десятых долей миллиметра) межэлектродных промежутках – МЭП, с принудительной прокачкой электролита.

В дальнейшем В. Н. Гусеву и его сотрудникам удалось разработать анодно-механический метод обработки. Затем в 1947–1950 гг. определились три разновидности обработки металлов, использующей электрохимические явления: размерная электрохимическая, анодно-механическая и анодно-абразивная. Была создана электрохимическая установка для обработки в потоке электролита, которая впервые была применена для изготовления отверстий в броневой стали. Тогда же были проведены первые опыты по обработке турбинных лопаток. Через несколько лет впервые в мировой практике было осуществлено промышленное внедрение операций электрохимического формообразования.

Широкое внедрение получили разработанные технологические процессы снятия заусенцев в деталях гидрооборудования, было предложено сложно-контурное вырезание электродом-проволокой.

Разрабатывались электрохимические станки для плоского шлифования, для двусторонней обработки и копировально-прошивочные агрегаты, работающие на постоянном токе.

В дальнейшем осуществлялся переход на импульсные и импульсно-циклические методы обработки.

Однако электрохимическое оборудование оставалось достаточно громоздким, энергоёмким и зачастую уже не соответствовало возросшим требованиям по точности формообразования.

Лишь в начале XXI века наблюдается возросший интерес к электрохимическому формообразованию. Появляются фирмы, как в России, так и за рубежом, по разработке нового оборудования. В связи с появлением высокотехнологичных отраслей промышленности (точного приборостроения, медицины и медицинской техники, авиадвигателестроения и др.) и применением новых групп высокопрочных и твёрдых материалов (в том числе, наноструктурированных), усложнением формы деталей и ужесточением требований к качеству поверхностного слоя, возникла потребность в новых технологиях электрофизической и электрохимической обработки. Реакцией на этот запрос технического прогресса явилось появление в 1998–2011 годах целого комплекса новых способов биполярной микросекундной ЭХО вибрирующим электродом, предложенных авторским коллективом ООО «ЕСМ» (г. Уфа, Россия). Особенностью этих способов состоит в том, что они осуществляются на сверхмалых (3–10 мкм) межэлектродных зазорах с использованием групп импульсов тока высокой плотности (порядка 10^2 – 10^4 А/см²). При

их реализации становится достижимым обеспечение малых погрешностей обработки (0,001–0,005 мм), создание на поверхностях деталей регулярных макро- и микрорельефов с микронном и субмикронном диапазоне, и получение оптически гладких поверхностей (Ra 0,1–0,01 мкм). И все это при существенно более высокой производительности (в сравнении с конкурирующими технологиями) на финишных операциях.

Физико-химическая сущность съёма (растворения и удаления металла) при электрохимической обработке основана на процессе электролиза. Съём металла происходит по закону Фарадея, согласно которому количество снятого металла пропорционально силе тока и времени обработки. Один из электродов (заготовка) присоединен к положительному полюсу источника питания и является анодом, а второй (инструмент) – к отрицательному; и служит катодом.

Схема процесса показана на примере электрохимического полирования (рис. 6.3).

Сущность электрохимического полирования состоит в предпочтительном растворении микровыступов поверхности, подключённой в электрохимической системе в качестве анода, чем достигается выглаживание поверхностных неровностей на детали. Удаление продуктов растворения осуществляется прокачкой электролита. При подаче напряжения на электроды начинается процесс растворения материала заготовки-анода. Растворение происходит главным образом на выступах микронеровностей поверхности в следствии более высокой плотности тока на их вершинах. Кроме того, впадины между микронеровностями заполняются продуктами растворения: оксидами или солями, имеющими пониженную проводимость. В результате избирательного растворения, т. е. большей скорости растворения выступов, микронеровности сглаживаются и обрабатываемая поверхность приобретает металлический блеск.

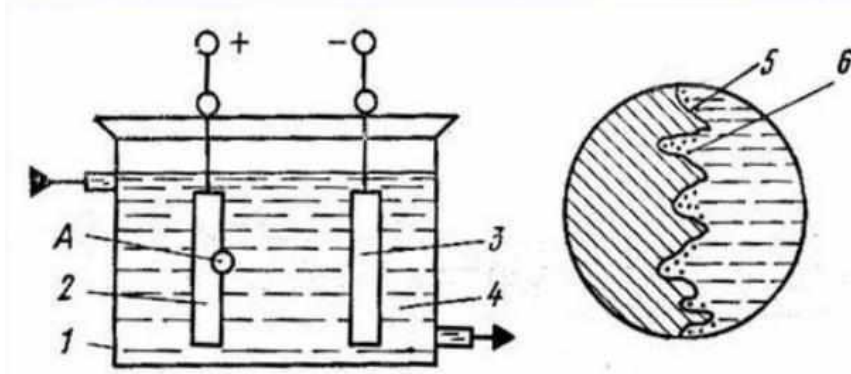


Рисунок 6.3 – Схема процесса электрохимического полирования:
 1 – ванна; 2 – деталь; 3 – электрод-инструмент; 4 – электролит;
 5 – обрабатываемая поверхность; 6 – продукты анодного
 растворения

Электрополирование улучшает электрофизические характеристики деталей, так как уменьшается глубина микротрещин, поверхностный слой обрабатываемых поверхностей не деформируется, исключаются упрочнение и термические изменения структуры, повышается коррозионная стойкость.

Электрополирование позволяет одновременно обрабатывать партию заготовок по всей их поверхности. Этим методом получают поверхности деталей под гальванические покрытия, доводят рабочие поверхности режущего инструмента, изготавливают тонкие ленты и фольгу, очищают и декоративно отделывают детали.

Особенностями электролиза являются пространственное окисление (растворение) анода и восстановление (осаждение) металла на поверхности катода. При ЭХО применяют такие электролиты, катионы которых не осаждаются при электролизе на поверхности катода. Этим обеспечивается основное достоинство ЭХО перед электроэрозионной обработкой – неизменность формы электрода-инструмента. Для стабилизации электродных процессов при ЭХО и удаления из межэлектродного промежутка продуктов растворения (шлама) применяют принудительную подачу в рабочую зону электролита, то есть прокачивают его при определенном давлении.

Технологические установки для реализации процесса ЭХО, как правило, являются узкоспециализированными и создаются под определённый технологический процесс в связи с низкой производительностью (в сравнении с другими методами формообразования, например, механической обработкой) и сложностью процесса. Однако ЭХО обладает рядом уникальных технологических свойств (постоянство формы обрабатываемого электрода, обработка твёрдых и хрупких токопроводящих сплавов, обработка которых механическими методами резания и шлифования невозможна или малопродуктивна, минимальные нагрузки на обрабатываемую заготовку позволяют обрабатывать тонкостенные, ажурные детали, отсутствие измененного поверхностного слоя в детали после обработки (оплавление, наклёп, термоупрочнение), возможность подвода исполнительного органа (электрода) в труднодоступные полости и отверстия деталей), которые позволяют осуществлять обработку деталей, не осуществимую другими известными методами обработки.

Широкое распространение электрохимические станки получили в авиационной промышленности. Распространены установки для получения рабочей поверхности пера лопатки турбореактивных двигателей (лопаточные станки). Данные станки позволяют получать готовые изделия с минимальным применением доводочных, слесарных операций, требующих больших затрат времени и высококвалифицированного персонала. Именно по этим причинам

большинство специализированных электрохимических установок уникально и изготавливается в единичном количестве.

Однако распространены и универсальные электрохимические станки, выпускаемые серийно, как правило, это копировально-прошивочные станки, позволяющие обрабатывать широкую номенклатуру деталей прямым копированием. Данные станки обладают одной координатой Z (которая осуществляет формообразование) иногда снабжаются дополнительными координатами (X и Y) для настройки и базирования взаимного расположения электрода и обрабатываемой поверхности в заготовке. Данные станки широко применяются в инструментальной промышленности для обработки штампов, пуансонов и других формообразующих элементов.

К основным видам электрохимической обработки относят:

- электрохимическое объемное копирование – электрохимическая обработка, при которой форма электрода-инструмента отображается в заготовке;

- электрохимическое прошивание – электрохимическая обработка, при которой электрод-инструмент, углубляясь в заготовку, образует отверстие постоянного сечения;

- струйное электрохимическое прошивание – электрохимическое прошивание с использованием сформированной струи электролита;

- электрохимическое калибрование – электрохимическая обработка поверхности с целью повышения её точности;

- электрохимическое точение – электрохимическая обработка, при вращении заготовки и поступательном перемещении электрода-инструмента;

- электрохимическая резка – электрохимическая обработка, при которой заготовка разделяется на части;

- электрохимическое удаление заусенцев – электрохимическая обработка, при которой удаляются заусенцы заготовки;

- электрохимическое маркирование;

- многоэлектродная электрохимическая обработка – электрохимическая обработка, осуществляемая электродами, подключенными к общему источнику питания электрическим током и находящимися во время обработки под одним потенциалом;

- непрерывная электрохимическая обработка – электрохимическая обработка при непрерывной подаче напряжения на электроды;

- импульсная электрохимическая обработка – электрохимическая обработка при периодической подаче напряжения на электроды;

- циклическая электрохимическая обработка – электрохимическая обработка, при которой один из электродов перемещается в соответствии с заданной циклограммой.

Смешанные виды электрофизико-химической обработки (ЭФХМО), включающие ЭХО:

- анодно-механическая обработка;
- электрохимическая абразивная обработка;
- электрохимическое шлифование;
- электрохимическая доводка (ЭХД);
- электрохимическое абразивное полирование;
- электроэрозионно-химическая обработка (ЭЭХО);
- электрохимическая ультразвуковая обработка и др.

6.3 Источники питания установок для электрохимической обработки

Электрохимическая обработка, основанная на анодном растворении, ведётся на постоянном, импульсном, пульсирующем или асимметричном переменном токе.

Процесс электрохимической обработки осуществляется на специальной установке, состоящей из источника питания постоянным током, системы гидрообрудования, механизма, обеспечивающего кинематику процесса (перемещение заготовки и инструмента) и контрольных устройств.

В качестве источника питания установки используется комплект электровыпрямительного оборудования. Для получения достаточно больших плотностей тока необходимы агрегаты, обеспечивающие напряжение $U = 5\text{--}30$ В. Это требует защиты и изоляции токопроводящих частей и камеры от остальной части установки. Для электрохимической обработки, требующих больших величин силы тока – $I = 10000$ А и выше, при проектировании электрической системы уделяют большое внимание разработке системы подвода тока к электродам с минимальными потерями.

Источники питания должны отвечать ряду требований:

- обеспечение необходимой точности и стабильности обработки,
- исключение разрушения электродов при коротких замыканиях,
- осуществление ступенчатого и плавного регулирования выходных величин, а также их стабилизация.

Кроме того, они должны быть экономичными, удобными в эксплуатации, малогабаритными.

Технологические возможности источников питания определяются их внешними характеристиками, которые могут быть жесткими, естественными (слабопадающими) и крутопадающими.

Структурная схема источников питания установок ЭХО (рис. 6.4) дает представление о составе электрического оборудования и принципе регулирования.

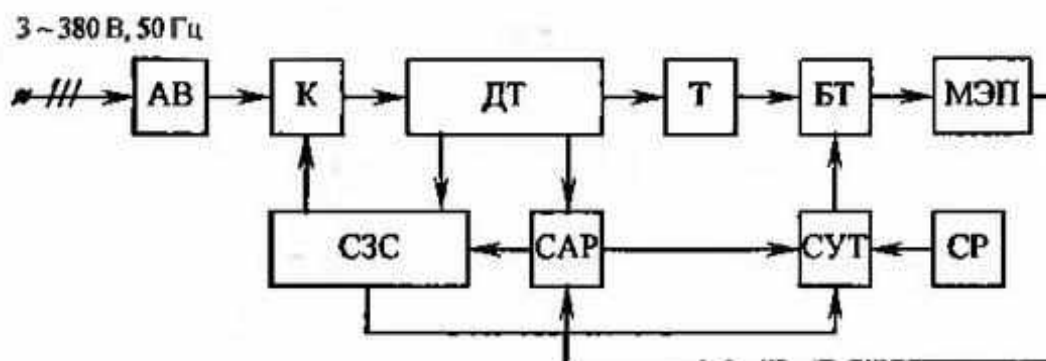


Рисунок 6.4 – Структурная схема источника питания установок ЭХО

Сетевое питание (трёхфазное напряжение 380 В, 50 Гц) подается через автоматический выключатель (АВ), главные контакты контактора (К), датчик тока (ДТ) на силовой трансформатор (Т).

Пониженное напряжение с трансформатора (Т) поступает на блок тиристоров (БТ) и далее уже выпрямленное к межэлектродному промежутку (МЭП).

Система управления тиристорами (СУТ) вырабатывает сигнал, позволяющий получить различную форму выпрямленного тока и напряжения.

Система реверсирования (СР) обуславливает смену полярности ИП.

Система автоматического регулирования (САР) предназначена для стабилизации тока и напряжения в МЭП при нормальном технологическом процессе.

Исполнительным органом системы автоматического регулирования является магнитный усилитель (МУ), обмотки управления которого воспринимают сигналы датчика тока, МЭП и опорного напряжения.

Результирующий сигнал управления с выхода МУ поступает в СУТ.

При нарушении нормального режима работы сигнал ДТ поступает в САР, что приводит к запирающему тиристорам, и в систему защиты и сигнализации (СЗС) на отключение источника от сети.

Для получения токов выше 600 А применяются источники питания с тиристорами двух вариантов.

Вариант 1 (рис. 6.5) для получения жесткой внешней характеристики источника питания.

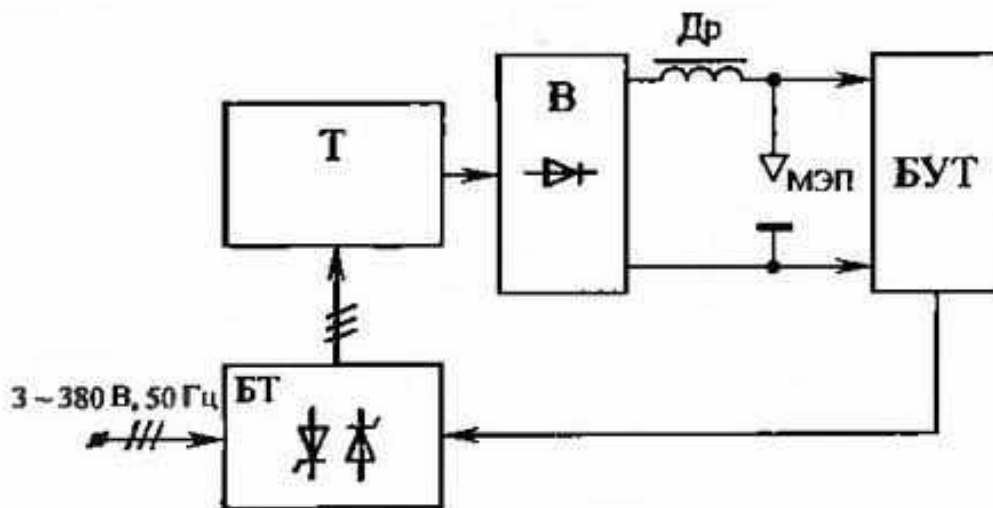


Рисунок 6.5 – Вариант 1 источника питания установок ЭХО

В этом случае блок тиристоров (БТ) управления включается в начало первичной обмотки силового трансформатора (Т), а вторичная обмотка подключена к выпрямителю (В).

Для управления тиристорами сигнал обратной связи поступает в виде выходного напряжения с МЭП на блок управления тиристорами (БУТ).

Вариант 2 (рис. 6.6) для получения крутопадающей характеристики источника питания.

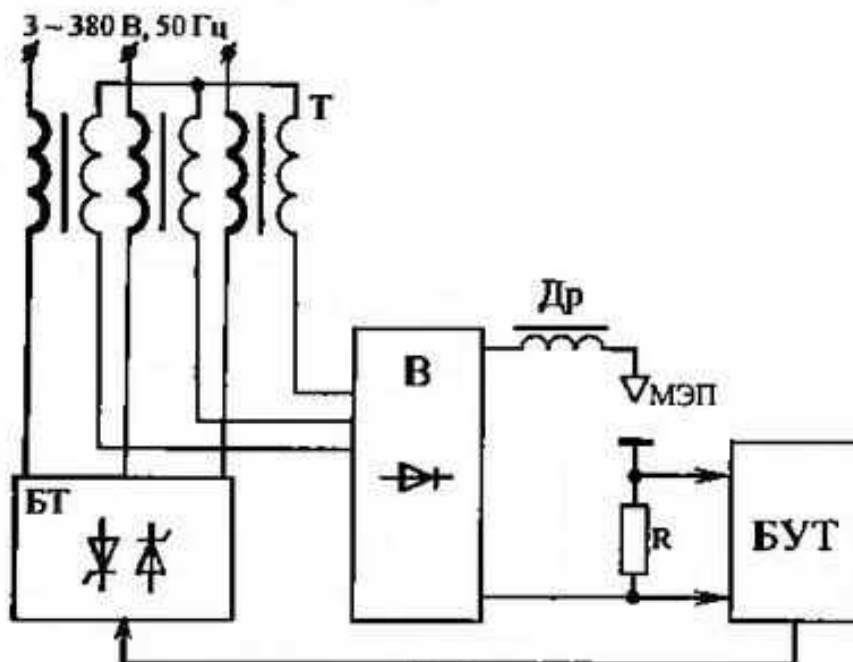


Рисунок 6.6 – Вариант 2 источника питания установок ЭХО

В этом случае блок тиристоров включается в конец первичной обмотки по трехфазной мостовой схеме, а управляющий сигнал в БУТ поступает с резистора R. Крутизна внешней характеристики определяется обратной связью по току и напряжению.

Дроссели (Др) предназначены для уменьшения пульсаций рабочего тока.

К системе гидрооборудования относят гидронасосы для подачи электролита и для прокачки охлаждающей жидкости, а также очистительные устройства (фильтры, отстойники, центрифуги). Система кинематики представляет собой устройство для относительного перемещения электрода-инструмента и заготовки; она должна иметь жесткость, достаточную для преодоления гидравлического воздействия электролита.

6.4 Прикладные электрохимические технологии

Основными разделами прикладных электрохимических технологий, кроме процессов, рассмотренных выше, являются:

- химические источники тока;
- гальванотехника (гальваностегия и гальванопластика);
- гидроэлектрOMETаллургия;
- электросинтез органических и неорганических веществ;
- электроанализ, электрокатализ;
- хемотроника и электрохимическая сенсорика;
- биоэлектрохимия;
- трибоэлектрохимия;
- электрохимические методы защиты от коррозии и технологии борьбы с коррозионными потерями.

Преимущества электрохимических технологий:

- высокая селективность (избирательность) электрохимических процессов, так как процессы окисления и восстановления на электродах протекают с участием электронов, а не сложных химических соединений, используемых в качестве реагентов;

– уникальные возможности для проведения процессов окисления и восстановления, так как в электрохимических процессах можно легко достичь необходимых значений окислительно-восстановительного потенциала, изменив ток, протекающий через электроды;

- возможность одновременного получения несколько чистых продуктов (например, при электролизе раствора NaCl получают Cl₂, H₂ и щелочь), используя диафрагмы или ионообменные мембраны в электролизерах;

– большой вклад ЭХТ в экономику, например, общая мощность химических источников тока, находящихся одновременно в эксплуатации, превышает мощность всех электростанций мира.

Недостатки электрохимических технологий:

– большой расход электроэнергии, которая затрачивается на электрохимические превращения (так, например, стоимость хлора и щелочи, производимых электролизом, составляет около 10 % общей стоимости продукции химической промышленности);

– относительно невысокая производительность электрохимических гетерогенных процессов, протекающих на границе электрод–раствор. В результате имеют место относительно высокие капитальные затраты на оборудование, здания и сооружения. В настоящее время широкое применение нашли пористые электроды, позволяющие значительно увеличить удельные поверхности, на которых осуществляются электрохимические реакции, что позволяет повысить производительность электрохимических устройств за счет повышения плотности тока, в общем случае, путем повышения «токовой нагрузки» на единицу производственной площади;

– с экологической точки зрения электрохимические производства характеризуются весьма токсичными продуктами (Cl_2 и F_2) и использованием в производстве сильно токсичных веществ: ртуть в качестве электрода, асбест в качестве диафрагменного материала и т. д. Поэтому очень важны вопросы охраны труда и техники безопасности.

Электролиз широко применяется в различных областях современной техники и технологии. С использованием электролиза в промышленных масштабах получают хлор и фтор, щелочи, хлораты и перхлораты, химически чистые водород и кислород и т. д. В цветной металлургии электролиз используется для получения металлов из руд. Электролизом расплавленных сред получают алюминий, магний, титан, цирконий, уран, бериллий и другие металлы. Для очистки металлов используют электрохимическое рафинирование. Для рафинирования (очистки) металла электролизом из него отливают пластины и помещают их в качестве анодов в электролизёр. При пропускании тока металл, подлежащий очистке, подвергается анодному растворению, т. е. переходит в раствор в виде катионов. Затем эти катионы металла разряжаются на катоде, благодаря чему образуется осадок чистого металла.

Примеси, находящиеся в аноде, либо остаются нерастворимыми (выпадают в виде анодного шлама), либо переходят в раствор электролита и удаляются.

С помощью электролиза:

– получают защитные и декоративные гальванические покрытия (гальванотехника) и оксидные пленки на поверхности металлов (анодирование);

– осуществляют электрохимическое окрашивание металлов (например, чернение, патинование);

– наносят металлические покрытия на изношенные металлические изделия для ремонтных целей и т. д.

Весьма обширная область применения электролиза – гальванотехника – область прикладной электрохимии, занимающаяся процессами нанесения металлических покрытий на поверхность как металлических, так и неметаллических изделий при прохождении постоянного электрического тока через растворы их солей. Особо следует отметить значение гальванических покрытий в высоких технологиях (НіТес), таких, как микроструктурная техника, электроника и другие.

Основная задача гальванотехники – разработка малоотходных, высокопроизводительных, ресурсосберегающих, экологически приемлемых технологических процессов, позволяющих получать покрытия с заданными свойствами.

В гальванотехнике различают два основных направления: гальваностегию и гальванопластику.

Гальваностегия – электроосаждение тонких (до десятков микрон) покрытий металлами и их сплавами с целью придания покрываемой поверхности изделий различных физико-химических свойств, декоративного вида, а также для защиты их от коррозии.

Гальванопластика – электроосаждение толстых (десятки и сотни микрон) металлических осадков для изготовления точных копий с различных предметов, клише, производства печатных плат, а также с целью восстановления изношенных деталей различного назначения.

Среди многообразных направлений электрохимии гальваностегия занимает особое место. Электроосаждение покрытий металлами и сплавами применяют в машиностроении, авиа-, ракетно- и судостроении, в энергетике и приборостроении, в радиотехнике, электронике и микроэлектронике, в сантехнике, медицинской, мебельной, ювелирной, пищевой и других отраслях промышленности.

Полученные электролитическим способом металлические гальванические покрытия выполняют самые разнообразные функции:

– защищают металлические изделия от коррозии, что в десятки и сотни раз увеличивает срок их службы;

– придают изделиям декоративный вид;

– повышают твердость, износостойкость, жаростойкость, электропроводность, в том числе, делают электропроводными неэлектропроводные детали из полимеров, керамики;

– придают изделиям магнитные свойства, обеспечивают паяемость, в том числе металлами, которые не паяются (алюминий, титан и сплавы на их основе);

– позволяют восстановить изношенные детали машин и механизмов;

– придают поверхности изделий из металлов и неметаллов свойства абсолютно черного тела или зеркала.

В приборостроении, электронике и микроэлектронике электрические схемы создаются с помощью электроосаждения металлов и сплавов. Выпуск всей современной радиотехнической и электронной аппаратуры, бытовой техники и сложнейших приборов не может быть осуществлен без специальных методов функциональной гальванотехники и электрохимии полупроводников. На их использовании основано современное производство интегральных микросхем, чипов и микрочипов, печатных плат и накопителей информации ЭВМ.

Принципиальная схема электроосаждения металла представлена на рисунке 6.7.

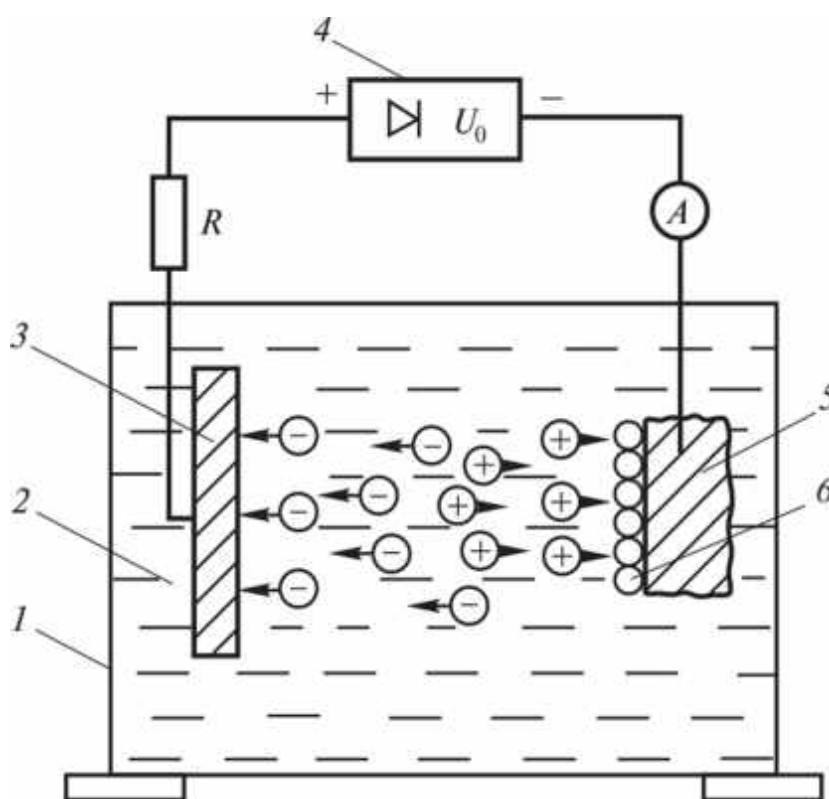


Рисунок 6.7 – Принципиальная схема электроосаждения металла:
1 – ванна; 2 – электролит; 3 – анод; 4 – источник тока; 5 – элемент поверхности изделия – катод; 6 – покрытие

Деталь, на которую необходимо осадить металл, погружается в электролит (водный раствор различных солей, состав которых зависит от того, какой металл требуется осадить), и подключается к отрицательному полюсу источника постоянного тока. В качестве анода

в электролитических ваннах часто используют металл, который при электролитическом растворении образует ионы электроосаждаемого материала. Например, при цинковании применяют цинковый электрод, при никелировании – никелевый электрод, при меднении – медный, при серебрении – серебряный и т. д. Задается необходимая сила тока, исходя из площади электрода и типа процесса. При подаче напряжения начинается окислительно-восстановительный процесс, результатом которого является растворение металла на аноде и миграция ионов этого металла в раствор и далее на покрываемую поверхность.

В основе технологий гальваностегии и гальванопластики лежит электрохимическая реакция, позволяющая получать металл, который формируется как в виде тонкого слоя (покрытия на поверхности детали), так и в виде достаточно массивного образования – изделия.

Технологический процесс гальванотехники (электроосаждения гальванического покрытия) включает три группы операций:

- подготовка поверхности металлов перед нанесением покрытия;
- процесс нанесения гальванического покрытия;
- обработка изделий после нанесения покрытия с целью улучшения некоторых, преимущественно антикоррозионных и декоративных, свойств.

Химическую и электрохимическую подготовку поверхности деталей производят в гальваническом цехе. Она включает химические и электрохимические процессы обезжиривания, травления, активирования и полирования. Заключительные операции после нанесения покрытий производят для улучшения их функциональных свойств, в основном, для повышения коррозионной стойкости и защитной способности, а также для получения декоративного внешнего вида. Для защитно-декоративной отделки гальванических покрытий применяют текстурирование, окрашивание, тонирование, полирование, пассивирование.

Текстурирование – это процесс получения на гальванопокрытии фактурных или цветовых изображений и узоров (цинк-слоит, текстурит, кристаллит, искрит, хром-агат) путём физико-химической обработки с последующим нанесением лаковой плёнки.

Окрашивание и тонирование – это получение цветных плёнок на поверхности гальванопокрытия химическим или электрохимическим методом. При окрашивании толщина этих плёнок составляет от 0,5 до 3 мкм, а при тонировании она соизмерима с длиной волны видимого света.

Повысить антикоррозионные свойства гальванопокрытия можно его промасливанием, пассивированием (хроматированием или фосфатированием). Процесс пассивирования гальванопокрытий заключается в формировании на их поверхности тонких плёнок

оксидной и оксидно-солевой природы в растворах сильных окислителей. Толщина плёнок обычно составляет около 0,5 мкм. Скорость образования плёнки и ее толщина зависит от кислотности раствора и продолжительности обработки. Продолжительность пассивирования в зависимости от состава раствора составляет от 15 с до 2 мин. Цинковые и кадмиевые покрытия не выполняют без пассивирования.

Наибольшее распространение в технике получили технологические процессы цинкования, меднения, никелирования и хромирования. Эти операции осуществляют в гальванических ваннах, используя в качестве источника тока выпрямители. Ток, подаваемый выпрямителем, может изменяться в диапазоне от десятков до тысяч ампер в зависимости от размеров обрабатываемых поверхностей и режима электролиза.

Во всех отраслях промышленности в гальванических цехах широкое применение нашли автооператорные автоматические линии с программным управлением различными типами автооператоров. На линиях этого типа можно осуществлять:

- различные технологические процессы гальванотехники (электрохимические, химические, анодно-оксидные);
- отдельные технологические процессы или несколько процессов одновременно или поочередно;
- изменение последовательности и длительности технологических операций;
- нанесение покрытий с производительностью от 1 до 200 м²/ч;
- обработку мельчайших или крупногабаритных изделий длиной до нескольких метров;
- обработку изделий на подвесках, в барабанах, корзинах или комбинированно.

Гальванопластика позволяет использовать процесс электролитического осаждения металлов и сплавов для получения сложных изделий, изготовление которых иным способом невозможно или экономически невыгодно.

Области применения гальванопластики (электроформования):

- машиностроение, авиация, космонавтика (изготовление форсунки, газового или гидравлического сопла);
- изготовление тонкостенных легких полых изделий сложной формы и высокой точности;
- изготовление деталей ракетных двигателей (например, никелевых диафрагм);
- изготовление аэродинамических труб длиной до 5 м;
- производство солнечных рефлекторов, рефлекторов для автомобилей;
- изготовление трубок Вентури, дросселей, фильтров;

– радиоэлектроника и электротехника (изготовление волноводов электромагнитных и акустических; крупногабаритных антенно-фидерных отражателей; электронных схем, электрических контактов на неметаллических материалах, устройств интегрального типа, штампов для прессования электронных компонентов из листовой фольги);

– изготовление тонкостенных листов и сетчатых изделий (медной фольги для печатных плат, никелевой фольги для теплозащитных и отражательных экранов, серебряные и медные зеркальные слои; сетки, сита и решетки с отверстиями заданной формы и размеров (до 10000 отверстий на кв. см); бесшовные сетчатые трубы, сетки для электробритв, сетчатые экраны для ламп и кинескопов);

– медицина (изготовление форм для прессования искусственных (акриловых) зубов; коронки, зубные протезы и другие виды протезирования; формы для литья оболочек протезов рук и ног, в которых воспроизводится фактура человеческой кожи; создание медицинского инструмента);

– легкая промышленность (перфорированные никелированные гильзы для окрашивания тканей, цилиндрические сетки для табачной промышленности; пресс-формы для обуви; матрицы для прессования пластмассовой галантереи (пуговицы, брошки); пресс-формы для резиновых изделий (шины, перчатки, подошвы);

– полиграфия и копии предметов искусства (гальванические стереотипы – штампы для печати на плоских и ротационных машинах, клише двусторонние для пластинок, штампы для печатных станков; валки и штампы для тиснения кожи и других материалов);

– создание копий с предметов искусства;

– создание статуй и скульптур;

– товары широкого потребления (детали пресс-форм для изготовления предметов быта: кувшины, котлы, миски, тарелки, шарообразные изделия, абажуры, корпуса авторучек, дверная фурнитура, пресс-формы для мыла, свечей, губной помады; матрицы для прессования пластмассы и резинотехнических изделий (игрушки, хозяйственные товары, контейнеры);

– изготовление медалей, монет.

Полублагородные, благородные и многие не благородные металлы получают чаще всего электролизом водных растворов (гидроэлектрометаллургия).

Гидроэлектрометаллургия – это способ (группа способов) электролитического выделения или рафинирования (т. е. электрохимической очистки) металлов из водных растворов, которые являются продуктом выщелачивания (химического растворения) полиметаллических руд или получаются в результате электрохимического (анодного) растворения продуктов пирометаллургического (огневого) их восстановления.

Гидроэлектрометаллургические процессы включают две основные стадии:

- подготовка электролита;
- извлечение металла из электролита.

Электрохимическими способами извлечения металлов из растворов являются процессы цементации и внутреннего электролиза.

Один из способов извлечения – цементация, при которой осуществляется вытеснение из раствора металла, имеющего более положительный потенциал, с помощью более электроотрицательного металла, например извлечение меди из раствора её соли с помощью цинка.

Кроме этого способа используют способ вытеснения металла водородом.

Выполняют также электроэкстракцию и электрорафинирование.

Электроэкстракция – электролиз с нерастворимыми анодами с целью электролитического извлечения металлов из растворов или расплавов, полученных после переработки (обжига, выщелачивания) руд и концентратов.

Электролитическое рафинирование металлов – электролиз с растворимыми анодами. Применяется в том случае, когда требуется очистить полученный пирометаллургическим путём черновой металл от вредных примесей или извлечь из него ценные компоненты.

На основе электрохимических эффектов созданы и используются технологии электрохимического синтеза неорганических и органических веществ (водорода, хлора, неорганических окислителей, электрохимический способ получения органических веществ).

Электрохимические методы лежат в основе различных способов защиты металлов от коррозии. Существуют также неэлектрохимические способы антикоррозионной защиты.

Эффективным неэлектрохимическим методом защиты от коррозии является повышение антикоррозионных свойств самих металлических материалов, которое осуществляется удалением из металлов и сплавов примесей, ускоряющих коррозионные процессы, а также легирование металлов.

Нанесение защитных металлических покрытий – один из самых распространенных методов борьбы с коррозией. Эти покрытия не только защищают детали от коррозии, но и придают их поверхности ряд ценных физико-механических свойств: твёрдость, износостойчивость, электропроводность, паяемость, отражательную способность, обеспечивают изделиям декоративную отделку и т. д.

Глава 7. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И УСТАНОВКИ. ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

7.1 Электромеханическая обработка

Электрохимические процессы это процессы взаимного превращения электрической энергии в механическую.

Чаще всего он представляет вид обработки поверхности деталей, который основан на одновременном термическом и механическом воздействии на поверхностный слой обрабатываемой детали. В результате значительно изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя, повышается износостойкость и микротвёрдость.

Электромеханическую обработку применяют для восстановления валов и осей с небольшим износом, а также как заключительную операцию при обработке деталей.

Схема этого способа показана на рисунке 7.1.

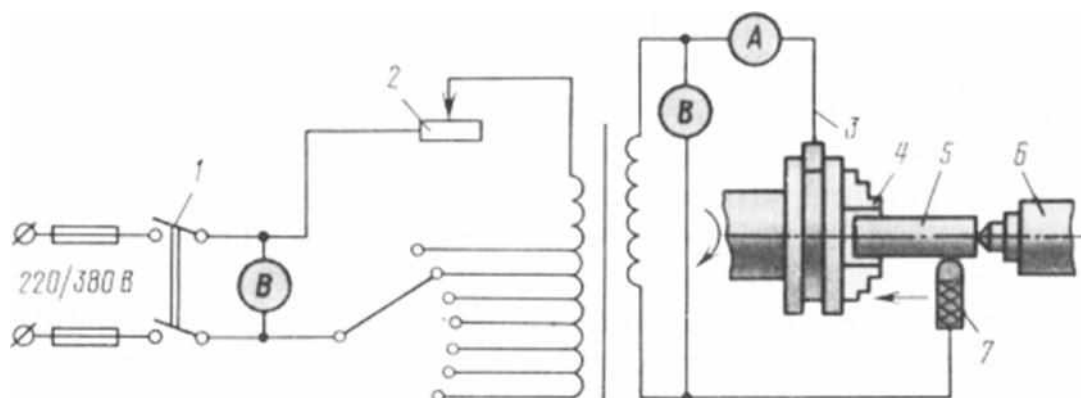


Рисунок 7.1 – Схема электромеханической обработки:
1 – рубильник; 2 – реостат; 3 – провод вторичной обмотки;
4 – патрон станка; 5 – деталь; 6 – задняя бабка станка;
7 – инструмент

К детали, установленной в патроне токарного станка и поддерживаемой центром задней бабки, через электроконтактное приспособление подводят один провод от вторичной обмотки трансформатора; другой провод подводят к инструменту, изолированно установленному в резцедержателе суппорта станка. В зону контакта детали и инструмента подводят ток 350–1300 А напряжением 2–6 В. Величину тока регулируют реостатом. Ток низкого напряжения и большой силы мгновенно нагревает металл в зоне контакта до высокой температуры (800–900 °С), в результате улучшается качество обработки, а последующий быстрый отвод теплоты внутрь детали

способствует закалке поверхностного слоя. Этим способом можно получить шероховатость поверхности как при шлифовании и одновременно значительно улучшают механические свойства поверхностного слоя обрабатываемой детали за счет его закалки на глубину до 0,1 мм.

Восстановление деталей электромеханической обработкой показано на рисунке 7.2.

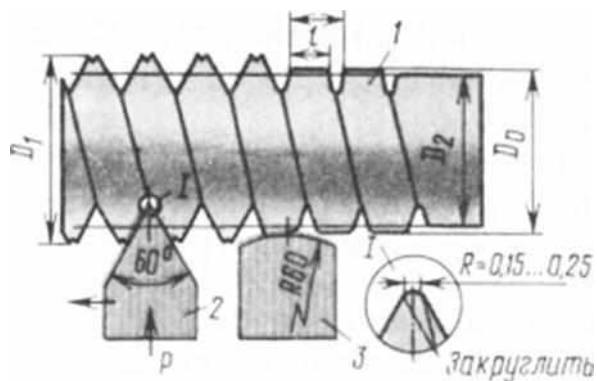


Рисунок 7.2 – Схема восстановления детали электромеханической обработкой:

1 – деталь; 2 – высаживающий инструмент; 3 – сглаживающий инструмент

Изношенную поверхность вала или оси сначала обрабатывают высаживающим инструментом. Нагретый в зоне контакта металл выдавливается, образуя выступы, аналогичные резьбе. В результате диаметр детали D_2 увеличивается до размера D . Вторым проходом сглаживающего инструмента высаженную поверхность обрабатывают до необходимого размера. Режим обработки: ток – 400–600 А, напряжение – 2–6 В.

Этим способом восстанавливают преимущественно поверхности валов неподвижных соединений (посадочные места под подшипники, шестерни, шкивы и др. элементы) с износом не более 0,25 мм. Однако восстановленная поверхность получается прерывистой, и площадь контакта уменьшается. Если площадь контакта остается более 60 % первоначальной сплошной, то прочность сопряжения с гладкой поверхностью втулки (кольца подшипника) оказывается вполне достаточной благодаря более высокой твердости, полученной при обработке, и так называемому шпоночному эффекту, возникающему за счет упругих деформаций сопрягаемых поверхностей.

Введение дополнительного металла позволяет восстанавливать электромеханической обработкой детали с износом более 0,25 мм. В высаженную винтовую канавку роликовым инструментом навивают стальную проволоку, предварительно очистив ее от грязи и оксидов

шлифовальной шкуркой. Режим навивки проволоки: ток 300–1500 А, напряжение 4–6 В, окружная скорость детали 8–1,9 м/мин. Проволока нагревается до температуры 1000–1200 °С, а под давлением ролика 400–500 Н деформируется и плотно заполняет высаженную канавку. Прочность сцепления проволоки с основным металлом достигается вследствие частичной сварки, диффузионных и других связей. При использовании проволоки диаметром 1,4 мм изношенную поверхность можно увеличить на 1,2 мм. После навивки применяют обычную механическую обработку до необходимого размера детали.

Вводить дополнительный материал при электромеханической обработке можно и несколько иным способом. В высаженную канавку навивают тонкую проволоку диаметром около 0,5 мм и затем выполняют обычное сглаживание в несколько проходов (4–6) на таком режиме: ток 350–500 А, напряжение 3,5–4,0 В, давление инструмента 300–500 Н при подаче 0,2–0,3 мм/об.

Вместо проволоки высаженные канавки можно заполнить клеями типа БФ или составами на основе эпоксидных смол. После отвердевания нанесенных составов поверхность доводят до необходимого размера обычной механической обработкой.

Преимущества электромеханической обработки – высокая производительность, возможность увеличения диаметра малоизношенных деталей без дополнительного материала, отсутствие коробления деталей, низкая себестоимость восстановления.

Основные недостатки – трудность получения в процессе обработки сплошного контакта инструмента с поверхностью, недостаточная стойкость высаживающих и сглаживающих пластин. В процессе работы необходимо строго соблюдать очередность включения вращения детали и тока. Нельзя выводить инструмент из контакта с деталью или вводить в контакт при включенном токе, так как малейшее нарушение контакта при большом токе вызывает образование дуги, а следовательно, поломку инструмента и, иногда, детали.

7.2 Сущность магнито-импульсной обработки

Магнитно-импульсная обработка (МИО) металлов представляет собой способ пластической деформации металлов, который возможен при прямом преобразовании в обрабатываемом изделии электрической энергии в механическую.

Основой магнито-импульсной обработки являются электродинамические силы, возникающие в проводящем ток изделии, находящемся в переменном электромагнитном поле.

Принцип действия этих сил заключается в следующем (рис. 7.3). Из рассматриваемого тела теоретически выделяют элементарный объем dv высотой dz , шириной dr и длиной dl , через который протекает элемент тока dI . К элементу объема детали приложено механическое усилие dF , представляющее собой электродинамическую силу

$$dF = dI[dl \cdot B], \quad (7.1)$$

где B – магнитная индукция, (Тл), в месте, где находится элемент тока;

$$B = \mu \cdot H, \quad (7.2)$$

где μ – магнитная проницаемость, Гн/м; H – напряжённость магнитного поля, А/м.

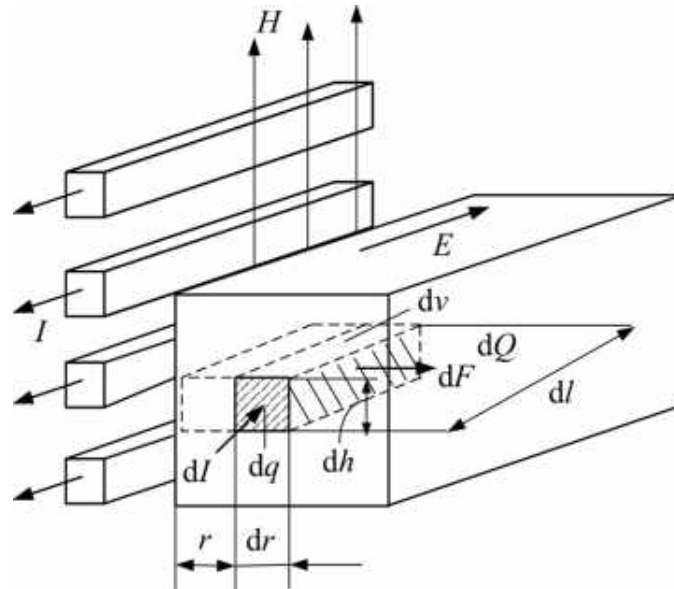


Рисунок 7.3 – Электродинамические силы в проводящем теле, помещенном в индуктор с переменным током

При протекании по индуктору переменного синусоидального тока среднюю за период электродинамическую силу можно определить как

$$dF = 1/2 \cdot Re\{dI \cdot [dl \cdot B]\}, \quad (7.3)$$

где Re указывает на то, что в расчётах нужно брать действительную составляющую из комплексного выражения в фигурных скобках; dI – элемент тока, А;

$$dI = j \cdot dq, \quad (7.4)$$

где j – плотность тока в данной точке, А/м²;

Плотность тока определяют, используя зависимость

$$j = \sigma \cdot E, \quad (7.5)$$

где σ – удельная электропроводность металла, А/мм²; E – напряженность электрического поля, В/м.

Тогда

$$dI = \sigma \cdot E \cdot dq, \quad (7.6)$$

где dq – поперечное сечение элемента тока.

Длина

$$dl = l \cdot dl, \quad (7.7)$$

С учётом изложенного выше, уравнение (7.1) следует записать в виде

$$\begin{aligned} dF &= \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}\{\sigma \cdot E \cdot dq [I \cdot l \cdot dl \cdot \mu \cdot H]\} = \\ &= dl \cdot dq \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}\{E \cdot [I \cdot l \cdot H]\} = \\ &= \mu \cdot \sigma \cdot \operatorname{Re} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot [EH] \right\} dv, \end{aligned} \quad (7.8)$$

где $dv = dl \cdot dq$ – элемент объема, занимаемый элементарным током.

Выражение в фигурных скобках уравнения (7.8) – это поток энергии, действительную часть которого (Re) обозначают через S . Тогда

$$dF = \mu \cdot \sigma \cdot S \cdot dv. \quad (7.9)$$

Общий вид выражения для удельной электродинамической силы, приложенной к единице объема проводника, будет иметь вид

$$F_{\text{уд}} = dF / dv, \quad (7.10)$$

Тогда с учётом S получают

$$F_{\text{уд}} = \mu \cdot \sigma \cdot S, \quad (7.11)$$

Из формулы (7.11) следует, что направления электродинамических усилий и потока энергии в данной точке одинаковы.

Если представить выражение (7.11) в скалярном виде и мысленно приписать iv направление потока энергии, тогда в каждой точке металла

электродинамические усилия создают давление, которое можно найти из формулы (7.11) для $F_{уд}$. Если в точке, где протекает элементарный ток dI , имеет место удельная сила $F_{уд}$, тогда к элементарному объёму $dv = dI \cdot dq$, через который проходит ток dI , приложено бесконечно малое усилие $dF = F_{уд} \cdot dv$. Бесконечно малое давление сжатия, создаваемое этим усилием, равно отношению этого усилия к площади dQ (рис. 7.3)

$$dP_{сж} = \frac{dF}{dQ} = F_{уд} \cdot dv/dQ, \quad (7.12)$$

Так как $dv = dQ\eta \cdot dI$,

$$dP_{сж} = F_{уд} \cdot dI. \quad (7.13)$$

В данной точке давление складывается из элементарных давлений, создаваемых во всех элементах dv , лежащих между рассматриваемой точкой и поверхностью металла со стороны индуктора. Поэтому давление, обусловленное электродинамическими силами,

$$P_{сж} = \int_0^r F_{уд} \cdot dr \text{ или } P_{сж} = \mu \cdot \sigma \int_0^r S \cdot dr. \quad (7.14)$$

Для вычисления $F_{уд}$ и $p_{сж}$ в каждом конкретном случае надо в уравнение (7.14) подставлять значение S , соответствующее этому варианту. Возникающие электродинамические силы и вызванные ими давления сжимают металлическое тело и обуславливают деформации его стенок.

7.3 Оборудование для магнито-импульсной обработки

Установки для магнито-импульсной обработки включают два основных узла: подготовительный (накопление энергии и формирование импульсного напряжения и тока) и технологический. К подготовительному узлу относятся генераторы импульсных токов, к технологическому – индукторы.

Генераторы импульсных токов преобразуют переменный ток промышленной частоты в импульсы токов большой амплитуды. Главными элементами генератора являются зарядное устройство, батарея конденсаторов, коммутирующее и поджигающее устройства.

В узел зарядного устройства обычно входят повышающий трансформатор, выпрямитель и пускорегулирующая аппаратура.

Батарея конденсаторов предназначена для накопления электрической энергии с дальнейшей разрядкой на технологический узел. В установках магнито-импульсной обработки для этих целей применяются импульсные конденсаторы. Они должны иметь очень малую индуктивность, их конструкция должна обеспечивать длительную работу в режиме, близком к режиму короткого замыкания. С целью уменьшения времени разрядки батареи конденсаторов и обеспечения кратковременности выделения энергии в индукторе необходимо уменьшать общую индуктивность установки путем снижения индуктивности батареи конденсаторов, ошиновки и разрядника, что приведёт к повышению эффективности магнито-импульсной обработки.

Коммутирующее устройство (коммутатор) предназначено для того, чтобы в заданный момент подавать импульс напряжения на рабочую катушку, пропускать возникающий импульсный ток за определённое время и регулировать напряжение на конденсаторах. Коммутатор должен обеспечивать возможность регулирования рабочего напряжения, пропускать значительные токи, иметь малую индуктивность и большой срок службы. В установках применяют механические, ионные и дуговые коммутирующие устройства.

Разрядники, применяемые в коммутирующих устройствах, бывают трех типов: открытые, вакуумные и газонаполненные. Более востребованными являются вакуумные и газонаполненные разрядники. Они характеризуются широким диапазоном регулирования рабочего напряжения, возможностью изменения давления в разряднике и способностью коммутировать значительную энергию. Электрическая схема двухэлектродного газонаполненного разрядника показана на рисунке 7.4.

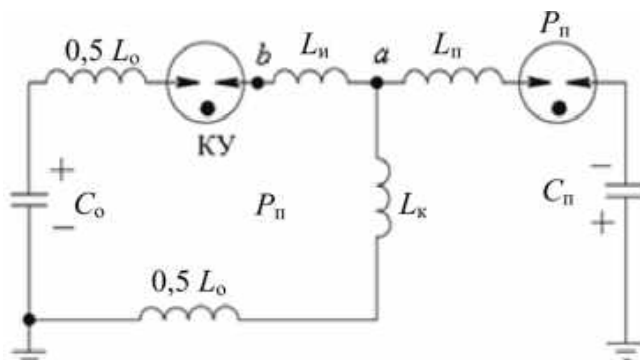


Рисунок 7.4 – Схема двухэлектродного разрядника:

a, b – контрольные точки схемы; L_k – индуктивность колебательного контура; L_0 – основная индуктивность; L_n – индуктивность поджигающего контура; C_0 – основная емкость; C_n – поджигающая емкость; KU – коммутирующее устройство; P_n – вспомогательный разрядник поджиг

Принципиальная схема установки для МИО приведена на рисунке 7.5.

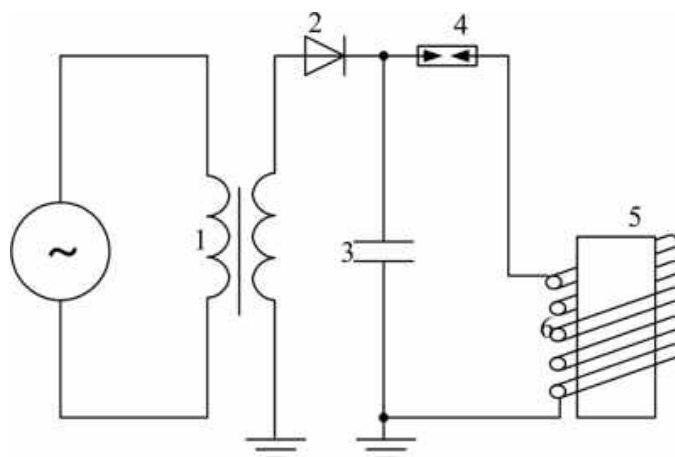


Рисунок 7.5 – Принципиальная схема электрической цепи установки для магнитно-импульсной обработки металлов:

1 – источник питания; 2 – выпрямитель; 3 – батарея конденсаторов; 4 – коммутирующее устройство; 5 – изделие; 6 – индуктор

При разрядке конденсатора ёмкостью C импульс тока на индуктивную катушку L имеет длительность и форму, определяемые параметрами разрядного контура R , L и C . Выделяемая энергия в цепи L и R при разряде конденсатора определяют по формуле

$$W_{\text{разр.}} = \frac{L \cdot I^2}{2} + B \cdot I^2 \cdot \tau, \quad (7.15)$$

Так как $R \ll L$, то

$$W_{\text{разр.}} = 0,5 \cdot I^2 (L_{\text{уст}} + L_{\text{инд}}), \quad (7.16)$$

где $L_{\text{уст}}$ – индуктивность установки (батареи конденсаторов, ошиновки и разрядника); $L_{\text{инд}}$ – индуктивность индуктора.

Энергия, выделяющаяся в цепи, идёт на нагрев заготовки, механическую работу деформации заготовки, нагрев проводников цепи и частично рассеивается в пространстве.

Коэффициент полезного действия использования энергии батареи

$$\eta = \frac{W_{\text{инд}}}{W_{\text{разр}}} = \frac{L_{\text{инд}}}{L}, \quad (7.17)$$

где $L = X_{\text{инд}} + L_{\text{уст}}$.

Давление на обрабатываемую заготовку ($\text{кг}/\text{см}^2$) зависит от плотности энергии электромагнитного поля и вычисляется по формуле

$$p = \frac{B^2 \cdot 10^{-6}}{8\pi}, \quad (7.18)$$

где B – индукция магнитного поля.

При плавной скорости нарастания магнитного поля и значительной длительности импульса давление может проникнуть за заготовку и вызвать обратную реакцию, что существенно ослабит результирующее давление на обрабатываемый материал. Для предотвращения противодействия необходимо, чтобы длительность импульса не превышала времени деформации заготовки

$$\tau_{\text{ДЕФ}} = 2\sqrt{\varepsilon \cdot \delta} / v, \quad (7.19)$$

где ε – перемещение стенки трубчатой заготовки в направлении обжатия, см; δ – толщина стенки заготовки; v – скорость перемещения стенки, см/с.

Скорость перемещения стенки заготовки при деформации

$$v = \left[\frac{B^2}{4\pi \cdot \gamma} \right]^{1/2}, \quad (7.20)$$

где γ – плотность материала заготовки, г/см³.

При разрядке конденсатора часть электромагнитной энергии W_H используется на нагрев материала заготовки

$$W_H = \frac{B^2}{8\pi} \cdot \rho \cdot S, \quad (7.21)$$

где ρ – удельное сопротивление материала заготовки, Ом·м; S – поперечное сечение заготовки, м².

Главными преимуществами установок магнито-импульсной обработки (рис. 7.6) являются отсутствие движущихся и трущихся частей, простота управления и регулирования мощности, компактность, простота обслуживания, высокая производительность, возможность механизации и автоматизации операций обработки.

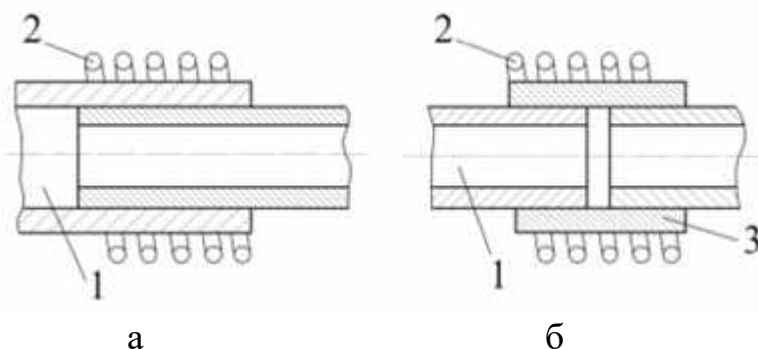


Рисунок 7.6 – Схема магнитно-импульсной обработки:
 а – соединение концов труб; б – соединение труб муфтой:
 1 – заготовки; 2 – соленоид; 3 – муфта

К недостаткам магнитно-импульсной обработки следует отнести: невысокий КПД процесса, сложность обработки деталей с отверстиями или пазами, мешающими прохождению тока, недостаточная долговечность индукторов при работе в электрических полях высокой напряжённости, а также сложность обработки деталей большой толщины.

Технологические операции, производимые при магнитно-импульсной обработке, можно разделить на три группы: обжим, раздача, плоская штамповка.

Обжим. При этой операции обрабатываемая деталь помещается внутрь индуктора, причем индуктор в поперечном сечении может быть круглым, прямоугольным, овальным и другим.

Путём обжатия производят:

- вырубку отверстий в цилиндрической заготовке;
- обжим труб для формирования шестигранника;
- обжим труб для формирования замкового соединения.

Данный метод позволяет выполнять сборочные операции, например, напрессовку кабельных наконечников. При этом методе электрическое сопротивление в переходе наконечник-кабель уменьшается, а механические характеристики становятся соизмеримыми с механическими характеристиками кабеля.

Раздача. При выполнении этой операции индуктор вводится внутрь обрабатываемой детали, а сама деталь помещается в зажимные технологические приспособления.

Детали, полученные путем раздачи:

- трубы с образованием полусферы;
- трубы с образованием конуса;
- развальцованные трубы в изоляционном материале;
- развальцованные трубы в металлических деталях.
- раздача труб в радиаторных кольцах и т. д.

Плоская штамповка. При выполнении операции обрабатываемая листовая заготовка помещается между плоским спиральным индуктором и матрицей. Листовая заготовка должна плотно прилегать к индуктору и матрице, поэтому необходимо применять прижимное приспособление. Импульсный характер воздействия позволяет пользоваться негромоздкими и простыми конструкциями прижимных приспособлений.

Матрица может быть изготовлена из металла или пластмасс. Плоская штамповка позволяет производить следующие технологические операции:

- образование кольцевых и продольных зигов;
- чеканку рисунков, надписей и т. д.;
- вырубку деталей по контуру на матрицах, имеющих форму готовой детали;
- пробивку отверстий.

Большой опыт, накопленный в отечественной и зарубежной практике в области магнитно-импульсной обработки металлов, показывает высокую эффективность этого метода и широкие его возможности.

Применение энергии импульсного магнитного поля в процессах обработки металлов давлением открывает новые пути решения ряда технологических задач: сборка разнородных металлов, сборка металлов с неметаллами, вырубка-пробивка в деталях с ограниченным подходом, деформирование малопластичных высокопрочных сплавов на основе алюминия, меди, вольфрама, молибдена и т. п.

Уменьшение металлоёмкости оснастки, снижение трудоемкости её изготовления, увеличение производительности труда, несмотря на низкую стойкость рабочего инструмента-индуктора, делают применение энергии импульсного магнитного поля для обработки металлов давлением экономически выгодным, особенно при мелкосерийном и опытном производстве.

Рассматривая вопрос о целесообразности перевода той или иной технологической операции на магнитно-импульсный метод, необходимо произвести тщательный технико-экономический анализ, сопоставление этого метода с другими видами импульсной обработки (обработкой взрывом, электрогидравлической обработкой и др.), а также с обычным прессованием.

7.4 Получение и использование ультразвука

Ультразвуковыми называются упругие колебания материальной среды с частотой, превышающий предел слышимости (15–20 кГц).

Теоретические аспекты ультразвука изучает акустика, которая, как раздел физики, получила значительное развитие уже в XIX

столетии. Основы теории колебаний и нелинейной акустики были разработаны Дж. У. Релеем. Более глубокое исследование ультразвуковых колебаний стало возможным после открытия эффекта магнитострикции (Дж. П. Джоулем) и пьезоэлектричества (П. Кюри).

Магнитострикцией называют способность ферромагнитных металлов и сплавов изменять размеры поперечного сечения и длину сердечника в переменном магнитном поле. К таким материалам относят никель, железокобальтовые сплавы (пермендюр), железоалюминиевые сплавы (альфер), ферриты и др. материалы.

При возникновении электромагнитного поля размеры поперечного сечения сердечника уменьшаются, а так как объём его остается постоянным, то длина сердечника увеличивается. При исчезновении поля первоначальные размеры сердечника восстанавливаются.

При ультразвуковой обработке используются колебания электромагнитного поля с частотой в указанных выше пределах. Амплитуда колебаний сердечника составляет 5–10 мкм. Для увеличения амплитуды колебаний к сердечнику крепят длинный тонкий стержень – концентратор (резонансный волновод переменного поперечного сечения), что позволяет получить амплитуду колебаний его торца до 50...80 мкм. К концентратору крепят рабочий инструмент – пуансон.

В конце 50-х годов XX века исследователи обнаружили, что если торец ультразвукового излучателя приблизить к поверхности детали, то поверхность в месте контакта торца излучателя с деталью разрушается, причем форма полученного углубления повторяет рельеф торца излучателя. Это позволило создать новую разновидность размерной обработки, названную ультразвуковой.

Ультразвуковые колебания могут распространяться в любых упругих средах: жидких, твёрдых, газообразных. Различают три вида ультразвуковых волн – продольные, поперечные и поверхностные. В твёрдых телах могут распространяться волны всех трёх видов, в жидких и газообразных – только продольные волны разрежения–сжатия.

Важной особенностью ультразвука является возможность концентрации энергии при сравнительно небольших амплитудах колебаний, так как плотность потока энергии пропорциональна квадрату частоты. Ультразвуковые волны большой интенсивности сопровождаются рядом эффектов. Так, распространению ультразвуковых волн в газах и жидкостях сопутствует движение среды, которое называется акустическим течением.

К числу важных явлений акустического течения относится кавитация, заключающаяся в росте в ультразвуковом поле пузырьков из имеющихся субмикроскопических зародышей газа или пара в жидкости, которые начинают пульсировать с частотой ультразвука и захлопываются в положительной фазе давления. При захлопывании

пузырьков газа возникают большие давления, порядка тысяч атмосфер, и образуются сферические ударные волны. Возле пульсирующих пузырьков возникают акустические микротоки. Ультразвуковые явления в кавитационном поле используются при получении эмульсий, аэрации жидкостей, очистке поверхностей от загрязнений, обезжиривании и травлении, ультразвуковом диспергировании, акустическом эмульгировании и т. д.

Основными параметрами ультразвуковых колебаний являются: длина волны λ – расстояние между двумя смежными точками, находящимися в одной фазе; амплитуда колебаний A – наибольшее смещение колеблющейся точки от положения равновесия; частота колебаний f – количество колебаний в единицу времени; период колебаний T – время распространения волнового движения на расстояние, равное длине волны; средняя скорость колебательных движений V ; скорость распространения звуковых волн C .

Физическая сущность ультразвуковой обработки основана на ударном воздействии торца инструмента на вершины наиболее крупных абразивных зёрен (рис. 7.7 а). Этот метод состоит из двух основных процессов: ударного вдавливания абразивных зёрен, вызывающего появление трещин и отделение небольших частиц хрупкого материала; циркуляции и смены абразива в рабочей зоне. Происходит хрупкое разрушение обрабатываемых материалов и одновременно вязкое разрушение инструмента.

При ударе торца инструмента по абразивным зернам вершины зёрен вдавливаются в поверхностные слои детали и инструмента (рис. 7.7 а).

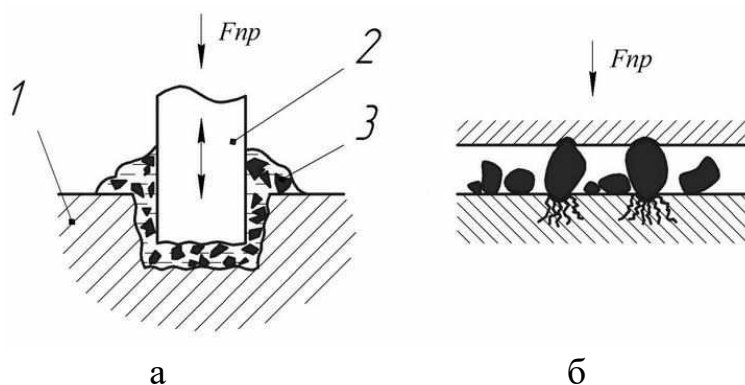


Рисунок 7.7 – Схемы ультразвуковой обработки:
 а – процесс резания; б – разрушение материала при ультразвуковой обработке:

1 – деталь; 2 – инструмент; 3 – суспензия с абразивом

Внедрение частиц абразива в инструмент приводит только к пластическим деформациям, и в поверхностном слое обрабатываемой детали возникает сетка напряжений (рис. 7.7 б). Под влиянием

напряжений, создаваемых последующими ударами торца инструмента, происходит расширение микротрещин и образование новых. Возникает зона разрушения от деления частиц в тот момент, когда максимальные касательные напряжения в зоне вдавливания превосходят сопротивление сдвигу. Несущая абразив вода расширяет микротрещины, облегчает образование сколов, доставляет новый абразив в зону обработки, а также охлаждает инструмент и деталь.

Количественной оценкой целесообразности ультразвуковой обработки материала является критерий хрупкости

$$\tau_x = \varepsilon_p / \sigma_p, \quad (7.22)$$

где ε_p – сопротивление материалов сдвигу; σ_p – сопротивление на отрыв.

Наиболее эффективно обрабатываются материалы первой группы (табл. 7.1), у которых коэффициент хрупкости $t_x \geq 2$. Мягкие материалы: медь, свинец, стали и др., у которых коэффициент хрупкости $t_x < 1$ ультразвуковой обработке не подлежат.

Таблица 7.1 – Области применения ультразвуковой обработки

Группа материала	Материал	Критерий хрупкости	Вид деформации	Характер разрушения	Область применения
I	Стекло, ситалл, кварц, керамика, феррит, германий, агат и др.	$t_x \geq 2$	Упругая	Хрупкий	Изготовление деталей из керамики, стекла, кварца, ферритов, минералов. Обработка полупроводниковых материалов
II	Вольфрам и его сплавы, твёрдые сплавы, закаленные на высокую твердость, цементованные стали, титановые сплавы	$1 < t_x < 2$	Упруго-пластическая	Хрупкий после упрочнения в результате микропластических деформаций	Изготовление фильер штампов, высадочных матриц, деталей сложной формы из вольфрама и твёрдых сплавов
III	Медь, свинец, мягкие стали и др.	$t_x < 1$	Пластическая	Разрушение практически не наблюдается	Ультразвуковой метод нецелесообразен

Все технологические характеристики – производительность процесса, качество поверхности, точность обработки, износ инструмента – зависят от технологических и акустических параметров, физико-механических свойств обрабатываемого материала, зернистости абразива, кинематической схемы станка, площади поверхности инструмента, силы прижима, глубины обработки.

Главное движение при размерной ультразвуковой обработке – колебания инструмента. Средняя скорость главного движения

$$V = 4f \cdot A/10^3, \text{ м/с} \quad (7.23)$$

Подача может быть продольной, поперечной, круговой. В зависимости от вида подач, а так же формы поперечного сечения инструмента, можно реализовать различные кинематические схемы ультразвуковой размерной обработки (рис. 7.8).

Наложение ультразвуковых колебаний осуществляется на инструмент вдоль оси (рис. 7.8 а, б, г, к), либо на заготовку (рис. 7.8 е, ж), либо одновременно на инструмент и заготовку (рис. 7.8 в, д, з, н). Очевидно, наложение УЗК возможно при использовании специального технологического оборудования, оснащенного мощной ультразвуковой (УЗ) аппаратурой для наложения УЗК на шпиндель станка, либо коренной его модернизацией.

В зонах контактного взаимодействия формообразующего инструмента с заготовкой, как правило, всегда находится СОЖ, воздействие ультразвуковых колебаний (УЗК) на которую вызывает кавитацию. Использование кавитации СОЖ возможно при шлифовании, сверлении, развёртывании, зенкерования, а так же при обработке различных поверхностей заготовок другими методами с применением СОЖ.

Эффект воздействия УЗК на инструмент или заготовку в процессе резания может проявиться в следующем:

- периодическом изменении величины и направления вектора действительной скорости резания;
- периодическом изменении углов инструмента, толщины срезаемого слоя;

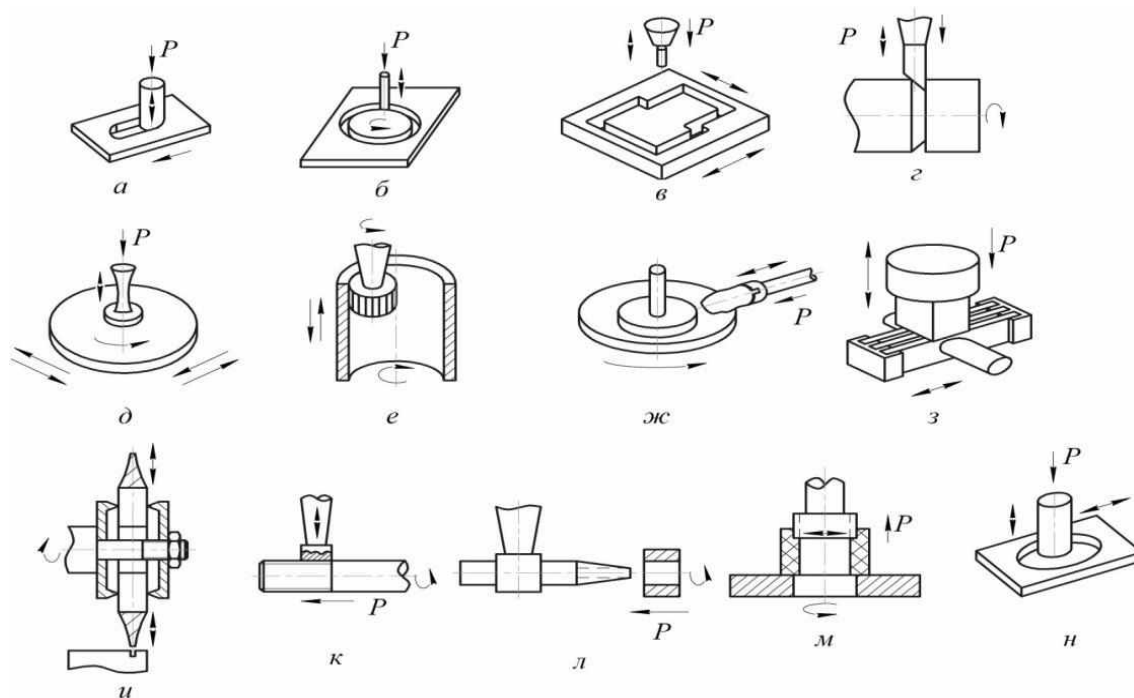


Рисунок 7.8 – Основные схемы выполнения технологических операций ультразвуковой размерной обработки заготовок: а – прорезание пазов; б – вырезание дисков; в – обработка заготовок сложного фасонного контура; г – точение; д – плоское шлифование торцом круга; е – внутреннее планетарное шлифование; ж – прорезание паза и разрезание вращающимся дисковым инструментом; з – разрезание многолезвийным ленточным инструментом; и – разрезание дисковым излучателем; к – нарезание наружной резьбы гребёнкой; л, м – нарезание внутренней резьбы; н – обработка эллиптического отверстия

– изменении характера приложения нагрузки – зона стружкообразования и режущий инструмент вместо статической испытывают знакопеременную динамическую нагрузку;

– изменении формирования поверхностного слоя детали в процессе обработки заготовки;

– улучшении условий проникновения СОЖ в зону резания;

– изменении контактных взаимодействий на рабочей поверхности режущих инструментов, приводящих к уменьшению деформаций в зоне стружкообразования и сил резания.

Наибольшее применение размерная ультразвуковая обработка получила при изготовлении деталей из стекла, кварца, флюорита, ферритов и других металлокерамических материалов, а так же полупроводниковых материалов (германия, кремния). В таблице 7.2 приведены режимы ультразвуковой обработки некоторых материалов.

Таблица 7.2 – Технологические режимы ультразвуковой обработки различных материалов

Обрабатываемый материал	Производительность S , мм/мин	Относительный износ инструмента q , %	Шероховатость Ra , мкм	Точность обработки, мм
Стекло, ситалл	5–20	0,5–1	1,25–5	0,02–0,1
Керамика 22ХС, ЦМ332	2–6	2–10	0,63–2,5	0,05–0,1
Твёрдые сплавы ВК	0,05–0,3	40–100	0,32–2,5	0,02–0,05
Германий, кремний, феррит	3–8	1–2	0,63–1,25	0,03–0,10
Закалённая сталь	0,05–0,1	120–200	0,32–2,5	0,03–0,10
Жаропрочные сплавы	0,02–0,03	150–200	0,63–2,5	0,08–0,10

Причинами, ограничивающими применение ультразвуковой обработки деталей из хрупких материалов, являются сравнительно небольшие глубина, площадь обработки и большой износ инструмента.

Поэтому этот метод наиболее целесообразен при изготовлении неглубоких отверстий сложной формы. Глубокие отверстия подвергают ультразвуковой обработке специальным алмазным инструментом без подвода СОЖ.

Ультразвуковые установки, используемые для размерной обработки материалов (рис. 7.9) содержат: генератор электрических колебаний 1, акустический преобразователь 2, ультразвуковую колебательную систему 3, систему подачи и отвода охлаждающей жидкости и суспензии с абразивом 4.

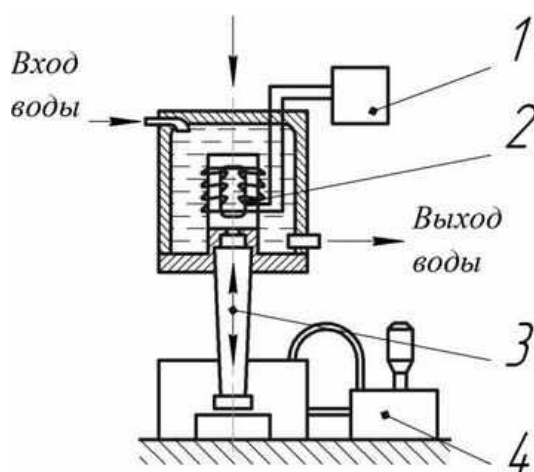


Рисунок 7.9 – Схема установки для ультразвуковой размерной обработки

В качестве инструментов используют концентраторы, форма которых показана на рисунке 7.10 а–в.

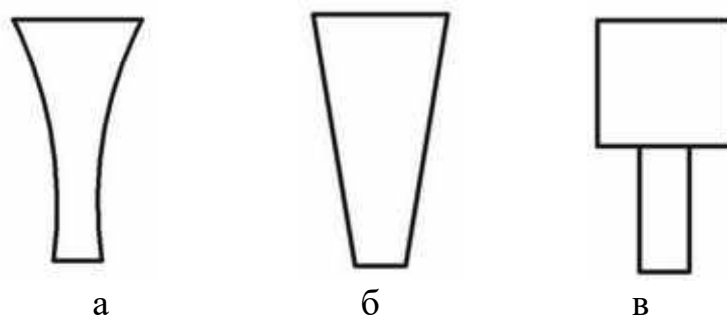


Рисунок 7.10 – Схемы ультразвуковых концентраторов:
а – экспоненциального, б – конического; в – ступенчатого

Ультразвуковые генераторы предназначены для преобразования электрического тока промышленной частоты (50 Гц) в ток высокой частоты.

Акустический преобразователь предназначен для преобразования электрических высокочастотных колебаний в механические. Для целей размерной обработки преимущественно применяются магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи.

В магнитострикционных преобразователях используется эффект продольной магнитострикции, заключающийся в изменении длины сердечника из ферромагнитного материала, помещенного в магнитное поле. Простейший магнитострикционный преобразователь представляет собой сердечник, выполненный в виде стержня или рамки с обмоткой возбуждения. При прохождении по обмотке переменного электрического тока в сердечнике наводится переменное магнитное поле, и возникают упругие деформации, вызывающие продольные колебания сердечника.

Для уменьшения потерь на токи Фуко металлические сердечники набирают из штампованных тонких пластин или наматывают из тонкой ленты. Магнитострикционные преобразователи выполняются с водяным охлаждением. Их максимальный электроакустический КПД в диапазоне частот 20–30 кГц составляет 50–70 %. С повышением частоты колебаний его значение уменьшается.

Магнитострикционные преобразователи изготавливают также из ферритов. Потери на вихревые токи у них практически отсутствуют. Поэтому сердечники из ферритов выполняют монолитными. Для их подмагничивания используют пластины ферритовых постоянных магнитов, которые вставляют или вклеивают в магнитопровод преобразователя. Электроакустический КПД ферритовых

преобразователей достигает 80...85 %. Они не требуют высокого напряжения питания и принудительного водяного охлаждения.

В пьезоэлектрических преобразователях используется пьезоэлектрический эффект, сущность которого состоит в том, что в кристаллах с определённым типом решёток под действием электрического тока возникают внутренние напряжения, пропорциональные напряжённости электрического поля. В результате размеры кристалла изменяются в соответствии с изменением электрического тока.

Все пьезоэлектрические материалы подразделяются на естественные и искусственные. Естественные – это кварц, сегнетовая соль, турмалин; искусственные – керамики титаната бария ЦТС-19 и титаната свинца ЦТС-23.

Преобразователи из кварца дорогие, а их размеры ограничены. Пьезокерамика значительно дешевле и требует меньших возбуждающих напряжений.

Колебательная система предназначена для передачи возникающих в преобразователе колебаний к рабочим узлам установки и в конечном итоге к обрабатываемой поверхности. В состав колебательной системы входят волновод, концентратор, инструмент.

Кроме размерной обработки ультразвуком применяют для сварки практически всех металлов и сплавов, применяющиеся в промышленности. Лучше всего свариваются пластичные металлы с близкими значениями предела прочности. Предпочтительно ультразвуковую сварку применять для соединения металлов, обладающих низким электрическим сопротивлением и высоким коэффициентом теплопроводности, сварка которых другими методами затруднена.

С помощью ультразвуковой сварки можно соединять неметаллические материалы, например, различные пластмассы и керамику. Возможна сварка неметаллических материалов с металлами.

Ультразвуком можно сваривать термопластичные пластмассы. Сварка термопластичных пластмасс происходит в вязко-текучем состоянии при температуре выше температуры размягчения, но ниже температуры разложения, при небольшом статическом давлении. Так как пластмасса обладает малой теплопроводностью, то она достигает вязко-текучего состояния только в тонком поверхностном слое. Поэтому сварка осуществляется за доли секунды. Полимерные материалы свариваются не только при малых толщинах, но и при толщине, превышающей 10 мм.

При помощи ультразвуковых колебаний можно сваривать метилметакрилат, полиэтилен, винипласт, хлорвинил, капрон, нейлон, фторопласт. Ультразвуковой сваркой можно соединять также разнородные пластмассы.

Одним из существенных достоинств ультразвуковой сварки является отсутствие нагрева значительных объёмов до температур плавления и сопутствующих изменений физико-химических свойств. Это позволяет получать сварные соединения со стабильными электро- и теплопроводностью, коррозионным сопротивлением, механическими свойствами. Структура зоны сварки в основном соответствует структуре свариваемого материала. Прочность соединения практически равна прочности основного металла либо превышает её.

Статические усилия при ультразвуковой сварке намного меньше усилий, применяемых при холодной сварке. Вследствие этого деформации образцов незначительны и составляют 5–10 % вместо 60–80 % при холодной сварке давлением. Поэтому с помощью ультразвуковой сварки можно соединять детали весьма малых толщин.

Большое место ультразвуковая сварка занимает в радиоэлектронике (ультразвуковая микросварка). Она имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами сварки при изготовлении полупроводниковых приборов и микросхем. Ультразвуковая микросварка позволяет получать соединения однородных и разнородных материалов, применяющихся в микроэлектронике. Ультразвуковая сварка применяется для соединения проволочных (диаметр 10 мкм) и ленточных (толщина 70–100 мкм) выводов из золота, алюминия и других металлов в самых различных полупроводниковых приборах и интегральных схемах.

Ультразвуковая микросварка используется в электровакуумной и электротехнической промышленности. Большую группу соединений составляют различные электрические выводы к изделиям, соединения медных деталей, контактов, реле, коллекторов.

Наряду с достоинствами ультразвуковая сварка имеет ряд недостатков, основными из которых являются следующие:

– затруднительность сварки материалов толщиной более 2,5 мм. При одинаковой толщине свариваемых деталей качественная сварка получается при толщинах не более 2–2,5 мм;

– недостаточно удовлетворительная воспроизводимость показателей прочности соединения при всех одинаковых условиях.

Из экономических соображений ультразвуковую сварку применяют для соединения лишь определённых металлов. Целесообразность применения ультразвуковой сварки связана прежде всего с прочностными характеристиками получаемых соединений. Например, ультразвуковая сварка меди обеспечивает прочность соединения в 2 раза выше по сравнению с электроконтактной, при этом затраты энергии в 10 раз меньше.

Сваривают металлы толщиной, не более (мм): алюминий – 3, медь – 2, сталь – 1,3, латунь – 1. Металлы молибден, кобальт, тантал,

вольфрам, бериллий толщиной 0,5–0,75 мм могут свариваться лишь в определённых условиях.

Находит широкое применение штамповка с применением ультразвука. Холодная штамповка с наложением ультразвука позволяет осуществить все виды формоизменений: осадку, выдавливание, листовую штамповку.

При этом сравнительный анализ изменения удельной деформирующей силы при объёмной штамповке в обычных условиях и с наложением ультразвука на пластически деформируемый металл свидетельствует о том, что в последнем случае деформирующая сила значительно снижается.

Например, при осадке с истечением в полость при наложении ультразвука удельная сила деформирования снижается в среднем в 4 раза для алюминия, для меди – в 3 раза и стали – в 2 раза.

Основными причинами снижения удельной силы трения при штамповке с наложением ультразвука являются уменьшение сил контактного трения и особенно – напряжений текучести деформируемого металла.

Применение ультразвука при глубокой вытяжке стаканов диаметром 6,4 мм обеспечивает значительное (в 2–3 раза) снижение деформирующей силы, при этом высота стаканчика увеличивается вдвое.

При вытяжке цилиндрических стаканчиков диаметром 14 мм из стали и меди, когда ультразвуковые колебания подводили к матрице, снижение деформирующей силы вытяжки составило для стали 15–20 %, а для меди – 40 %. При наложении ультразвука на пуансон снижение деформирующей силы, необходимой для вытяжки стаканчика из стали, составило 12–14 %.

Таким образом, в зависимости от способа подведения ультразвука к очагу деформации ультразвуковые колебания могут в большей или меньшей степени интенсифицировать процесс пластического течения металла.

Следует отметить, что области применения ультразвуковых колебаний не ограничивается перечисленными выше направлениями. Ультразвуковые колебания низкой интенсивности (условно до 1 Вт/см²) применяют для создания приборов для контроля химических характеристик различных материалов и сред, работа которых основана на изменении скорости УЗ колебаний в среде и позволяет определять:

- концентрацию бинарных смесей;
- плотность растворов;
- степень полимеризации полимеров;
- наличие в растворах примесей, газовых пузырьков;
- скорость протекания химических реакций;
- жирность молока, сливок, сметаны;

– дисперсность в гетерогенных системах и др.

Разрешающая способность современных УЗ приборов 0,05 %, точность измерений скорости распространения на образцах длиной 1 м составляет 0,5–1 м/с (скорость в металле более 5000 м/с). Практически все измерения проводятся методом сравнения с эталоном.

Находят применение приборы для контроля физико-химических характеристик, основанные на измерении затухания ультразвука. Такие приборы позволяют осуществлять измерение вязкости, измерение плотности, состав, содержание примесей, газов и т. п. Используемые методики также основаны на методах сравнения с эталоном.

Созданы и используются ультразвуковые расходомеры жидкостей в трубопроводах. Их действие также основано на измерении скорости распространения УЗ колебаний вдоль потока жидкости и против потока. Сравнение двух скоростей позволяет определить скорость потока, а при известном сечении трубопровода – расход.

Охранные УЗ устройства основаны на измерении различных параметров УЗ полей (амплитуды колебаний при перекрытии пространства между излучателем и приемником, изменении частоты при отражении от движущегося объекта и т. п.).

Измерители температуры газов и пожарные сигнализаторы работают на изменении скорости распространения ультразвука при изменении температуры среды или появлении дыма.

Для ряда областей разработаны и используются приборы ультразвукового неразрушающего контроля. Неразрушающий контроль является одним из основных технологических приёмов обеспечения качества готовых материалов и изделий из них.

Главными достоинствами по сравнению с другими методами неразрушающих испытаний являются:

– обнаружение дефектов, находящихся глубоко внутри материала, что стало возможным благодаря улучшенной проникающей способности. Ультразвуковое обследование проводится до глубины нескольких метров. Контролю подвергаются различные изделия, например: длинные стальные стержни, роторные штампованные заготовки и т. д.;

– высокая чувствительность при обнаружении чрезвычайно малых дефектов длиной несколько миллиметров;

– точное определение местоположения внутренних дефектов, оценка их размера, характеристика направления, формы и природы;

– достаточность доступа только к одной из сторон изделия;

– контроль процесса электронными средствами, что обеспечивает почти мгновенное выявление дефектов;

– объемное сканирование, что позволяет обследовать объем материала;

– отсутствие требований по мерам предосторожности, связанным со здоровьем;

– портативность оборудования.

В настоящее время, как следует из литературных источников, сформировано новое направление в химии – ультразвуковая химия. Изучая химические превращения, происходящие под действием ультразвука, ученые установили, что он не только ускоряет окисление, но в некоторых случаях обеспечивают восстанавливающее действие. Таким образом восстанавливается железо из окислов и солей.

Получены хорошие положительные результаты по интенсификации с помощью ультразвука следующих химико-технологических процессов:

– полимеризация, деполимеризация, окисление, восстановление, диспергирование, эмульгирование, коагуляция аэрозолей, гомогенизация, пропитка, растворение, распыление, сушка, горение, дублирование и др.;

– электроосаждение, при котором осаждающийся металл приобретает мелкокристаллическую структуру, уменьшается пористость. Таким образом, осуществляют меднение, лужение, серебрение. Процесс при использовании ультразвука протекает быстрее и качество покрытия выше, чем в обычных технологиях.

Ультразвук используют при получении эмульсий вода–жир, вода–эфирные масла, вода–ртуть. При этом барьер несмешиваемости таких сред преодолевается только благодаря ультразвуку.

Полимеризация (соединение молекул) – степень полимеризации регулируется частотой ультразвуковых колебаний.

Диспергирование обеспечивает получение сверхтонких пигментов для изготовления красителей.

Ультразвуковая сушка осуществляется без нагревания биологически активных веществ и используется в пищевой и фармакологической промышленности.

Ультразвук обеспечивает интенсификацию процессов распыления жидкостей и расплавов в распылительных сушилках, благодаря чему получают металлические порошки из расплавов. Такие распылительные устройства не содержат вращающихся и трущихся деталей.

УЗ усиливает эффективность горения жидкого и твердого топлива в 20 раз.

Пропитка через капилляры пропитываемого материала с применением ультразвука протекает в сотни раз быстрее. Такой эффект используется при производстве рубероида, шпал, цементных плит, текстолита, гетинакса, пропитке древесины модифицированными смолами.

Ультразвук широко применяют в ряде технологических процессов в металлургии.

Известно, что металлы при плавлении поглощают газы алюминия и его сплавы. 80 % всех газов в расплавленном металле приходится на долю H_2 . Это приводит к ухудшению качества металла. Газы удаются с помощью УЗ, что позволило создать специальный технологический цикл и широко использовать его при производстве металлов.

УЗ способствует закалке металлов, а в порошковой металлургии УЗ способствует формованию частиц изготавливаемого материала. При этом отпадает необходимость в уплотнении при большом давлении.

Применение ультразвука позволяет реализовать следующие технологии:

- удаления парафина со стенок нефтяных скважин;
- исключать взрывы метана в шахтах за счёт его распыления;
- выполнять обогащение руд (флотационный метод с применением УЗ).

Ультразвук также применяют в сельском хозяйстве, в пищевой промышленности и др. отраслях.

7.5 Электрогидравлическая обработка

Процесс электровзрывной (электрогидравлической) обработки относится к методу обработки давлением.

Возникновение высокого давления в результате действия высоковольтного электрического разряда между погруженными в непроводящую жидкость электродами называется электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ). Результатом энергии импульсной ударной волны, распространяющейся вокруг канала разряда в рабочей среде, является давление до 300 МН/м^2 .

Электрический разряд в жидкости – это способ преобразования электрической энергии в механическую, который совершается без промежуточных звеньев и с высоким КПД. Электрическая схема электрогидравлического эффекта показана на рисунке 7.11.

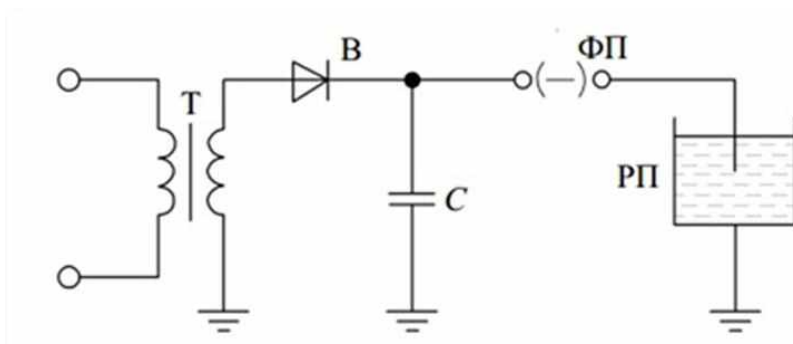


Рисунок 7.11 – Электрическая схема осуществления электрогидравлического эффекта

Элементами схемы являются повышающий трансформатор Т, выпрямитель В, накопитель энергии С, формирующий промежуток ФП и разрядный промежуток РП.

Высоковольтный искровой разряд в жидкости характеризуется очень быстрым преобразованием запасенной в накопителе электрической энергии в тепловую, световую, механическую и т. д. В момент пробоя в практически несжимаемой жидкости протекает электрогидравлический удар, что ещё больше усиливает действие электрического взрыва. В процессе образования и развития искрового канала в жидкости выделяют следующие три стадии.

1) При появлении высокого напряжения в разрядном промежутке жидкости в течение некоторого времени t_1 напряжение на нём остается практически постоянным. Затем в зависимости от параметров контура и начального напряжения оно резко падает (рис. 7.12).

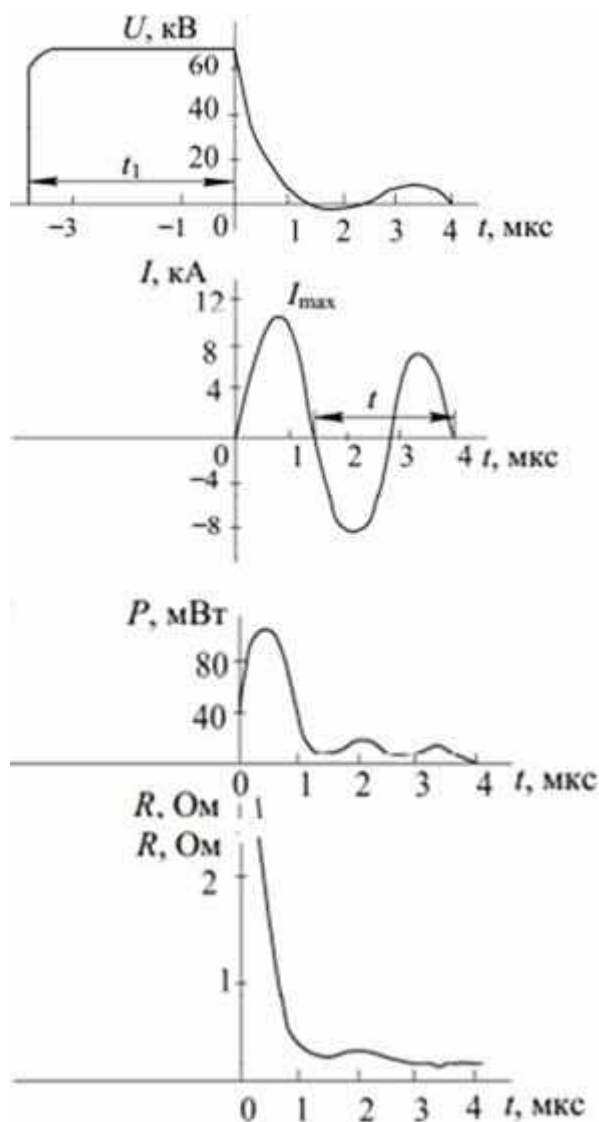


Рисунок 7.12 – Зависимости напряжения, тока, мощности и сопротивления канала разряда от времени

Образование канала разряда при высоких напряжениях на рабочих электродах обусловлено появлением лидеров, которые вызывают потоки электронных лавин, срывающихся с отрицательного и устремляющихся к положительному электроду. В начале пробоя образуется несколько лидерных каналов, которые затем сливаются в один общий канал.

Промежуток времени t_l характеризует лидерную стадию разряда и определяется электрохимическими свойствами жидкости, напряжением, формой и размерами электродов. Чем больше уровень напряжения, меньше длина рабочего промежутка и площадь положительного электрода, тем меньше t_l . На рисунке 7.12 представлены зависимости тока, напряжения, мощности и сопротивления канала разряда от времени.

Лидерная, или стримерная, стадия продолжается от момента приложения напряжения к разрядному промежутку до образования токопроводящего канала между электродами.

2) Яркая вспышка – результат пробоя межэлектродного промежутка. Во время вспышки выделяется большая часть запасенной в конденсаторе энергии. Эта стадия ограничивается малым временем протекания и значительным световым излучением. После пробоя межэлектродного промежутка его сопротивление резко падает, а ток при этом резко возрастает. Плотность тока в канале разряда достигает до 10^6 А/см² и выше. Плотность выделяющейся в канале энергии очень велика, это приводит к разогреву окружающей среды, ее диссоциации и ионизации. В результате вспышки в канале разряда образуется плазма температурой 15000–20000 К.

Спонтанный нагрев плазмы разрядным током вызывает повышение давления в канале и его расширение. Мгновенное расширение канала в прилегающей жидкости вызывает ударную волну, распространяющуюся от канала разряда в виде зоны сжатия с крутым передним фронтом. Фронт ударной волны, сначала неотделимый от стенки канала, через некоторое время отделяется от нее, так как скорость распространения ударной волны в среде существенно выше скорости расширения канала разряда. При удалении фронта волны от канала скорость ее распространения приближается к звуковой, а давление на фронте волны падает из-за рассеивания энергии.

3) При снижении тока в разрядном контуре и достаточной мощности источника искровой разряд может перейти в стадию дугового разряда. Это приводит к уменьшению плотности тока в канале и температуры плазмы в нем. При дуговом разряде ток поддерживается за счет термоэлектронов катода. В канале образуется пар за счет превращения остывающей плазмы в пар и испарения части жидкости из окружающих канал разряда слоев. Канал разряда превращается в парогазовую сферу. По мере увеличения газовой сферы давление в ней

понижается и становится меньше гидростатического. Окружающие газовую сферу слои воды продолжают двигаться по инерции. По достижении максимального размера сфера начинает сжиматься. Таких циклов «расширение–сжатие» может быть несколько.

Первоначальная форма канала разряда, возникшего в результате высоковольтного пробоя жидкости, зависит от формы лидера, замыкающего электроды. Поэтому такой канал почти всегда искривлен. Возникающий разряд с помощью взрывающейся проволоочки образует канал, который имеет форму прямого цилиндра со сферическими торцами.

Стартовый диаметр канала при высоковольтном пробое воды составляет несколько десятых долей миллиметра. При возбуждении же разряда проволочкой начальный диаметр канала разряда зависит от диаметра проволоочки. Материал используемых проволочек и их размеры заметно влияют как на значение, так и на характер выделяемой энергии при высоковольтном разряде в жидкости.

При увеличении диаметра проволоочки максимум мощности электрического разряда растет до определенного значения, а затем убывает.

Исходный материал и размеры технологических проволочек влияют на гидродинамические параметры разряда, на давление и скорость образующейся при разряде ударной волны. Размер проволочек обусловлен оптимальными параметрами разряда, как по электрическим, так и по гидродинамическим показателям процесса.

Рабочим веществом, как правило, служит техническая вода. Электрический разряд протекает в герметичной камере. В окрестности канала разряда происходит почти мгновенное испарение жидкости, образуется ударная волна – это источник силы для деформации заготовки, а также высокое давление в возникающем газопаровом пузыре.

Энергия разряда может достигать десятков килоджоулей, а длительность составляет несколько десятков микросекунд, мгновенная сила тока достигает 50 кА при длине разрядного промежутка в несколько сантиметров.

Скорость фронта ударной волны заметно превышает скорость звука в воде и доходит до 3000 м/с (скорость звука в воде составляет 1500 м/с).

Начальная скорость стенок газового пузыря может быть больше 100 м/с, наибольший радиус пузыря – несколько сантиметров, максимальное давление в нем – до 10^{10} Па.

Размеры обрабатываемых листовых заготовок толщиной до 5 мм могут превышать один метр.

При электрическом взрыве конденсатор разряжается на проводник в виде тонкой проволоки (или нескольких проволок, фольги

или сетки). Проводник располагают в диэлектрической жидкости. Начальное напряжение разряда в данном случае несколько киловольт (значительно меньше, чем в первой разновидности процесса).

При протекании тока большей силы проводник нагревается и происходит его взрывное испарение. В качестве материалов проводников применяют медь, нихром, константан – сплав меди (основа) плюс 40 % никеля и 1,5 % марганца. Длина прямой проволоки – до нескольких десятков сантиметров, диаметр – 0,1–0,3 мм.

Схема осуществления электровзрывной обработки приведена на рисунке 7.13.

Быстрая деформация заготовки 1 вызывается силами F_3 , действующими на её поверхности. Заготовка деформируется и при ударе о стенки матрицы 2.

Силы F_3 создаются вследствие взрывного испарения некоторого вещества 3 при пропускании через него кратковременного импульса тока I . Жидкость 4 служит для передачи механических усилий к заготовке 1, фиксируемой уплотняющими деталями 6.

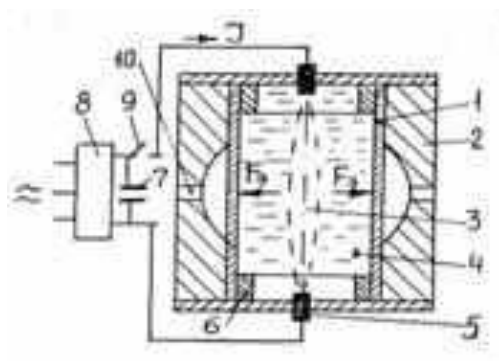


Рисунок 7.13 – Схема электровзрывного формообразования:
 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – вещество; 4 – жидкость;
 5 – электроды; 6 – уплотняющие детали; 7 – конденсаторная батарея; 8 – выпрямитель; 9 – переключатель; 10 – отверстие для удаления воздуха

Импульсный ток получается при разряде конденсаторной батареи 7, которая подсоединяется к электродам 5 с помощью переключателя 9. Конденсаторы предварительно заряжаются до высокого напряжения от выпрямителя 8. При деформации заготовки воздух из полости матрицы 2 удаляется через отверстие 10.

Начальная энергия конденсатора подсчитывается по формуле:

$$E_c = \frac{C \cdot U_c^2}{2}, \quad (7.24)$$

где C – ёмкость батареи конденсаторов, Φ ; U_c – напряжение на обкладках конденсатора, В.

Напряжение на обкладках конденсатора должно быть достаточным для пробоя межэлектродного промежутка. Когда напряжение достигнет пробивного значения, в разрядной цепи быстро нарастает сила тока I . В жидкости возникает канал разряда и газопаровой пузырь. Вследствие высокого давления в рабочей камере заготовка 1 деформируется и заполняет полость в матрице 2.

Механизм пробоя рабочей среды в общем такой же, как и при электроэрозионной обработке. Однако техническая вода обладает некоторой электропроводностью, благодаря чему происходит ее местное вскипание еще тогда, когда напряжение на электродах меньше пробивного. Поэтому заметная часть энергии расходуется ещё до пробоя (из-за электропроводности воды).

Электровзрывная обработка применяется как для формообразования, так и для разделения заготовки (штамповки, гибки, чеканки, вытяжки, раздачи, а также для дробления хрупких материалов, очистки крупных отливок от пригара, резки, развальцовки труб).

Достоинства электрогидравлического формообразования:

- простота оснастки;
- равномерность нагружения заготовки;
- сохранение исходного качества поверхности листовой заготовки;
- возможность изготовления разнообразных деталей из заготовок одного вида;
- не нужны дополнительные операции;
- оборудование легко встраивается в автоматические линии.

Электрогидравлические установки в зависимости от назначения различаются устройством камер, расположением заготовки, конфигурацией электродов. Ударная волна может иметь сферическую, цилиндрическую или плоскую форму.

Применяют ещё одну разновидность электровзрывной обработки – электрический взрыв в вакууме электропроводного материала (обычно металлической проволоки) с целью нанесения покрытия. Покрытия наносят на различные материалы (в том числе керамику и стекло) без предварительного нагрева изделия.

Этим способом изготавливают детали рентгеновской аппаратуры и электронных приборов, цилиндров автомобильных двигателей и др.

Кроме перечисленных способов с помощью электрогидравлического эффекта выполняют очистку литья от формовочной земли в воде, благодаря чему исключается пылеобразование. Очищаемые отливки помещают в бак. После установки электродов относительно деталей очистку от формовочной земли производят серией импульсов. Применение многоэлектродных

трехфазных установок обеспечивает обработку одновременно нескольких отливок.

Формообразование представляет собой процесс получения фасонных изделий из тонколистового материала с использованием направленных ударных волн высокой интенсивности, возникающих в жидкости при импульсном электрическом разряде. Главными факторами формообразования методом электрогидравлического разряда (ЭГР) являются сверхвысокие ударные гидравлические давления, мощные кавитационные процессы и ультразвуковое излучение.

С целью получения заданных по форме изделий создаются определенные формы волн: с острым фронтом, сферические и др. Это достигается различным расположением электродов, а также различными формами проволочек, накоротко закорачивающих межэлектродный промежуток. Форму фронта ударной волны приводят в соответствие с формой рабочей полости матрицы. Для этого проволоку, закорачивающую концы электродов, изгибают так, чтобы разряд следовал по возникшему плазменному каналу проводимости.

При использовании электрогидравлического эффекта выполняют тонкое измельчение, при котором материал диспергируется или разрушается волной, возникающей в жидкости. Эффективная способность волны зависит от параметров разрядного контура, а энергия импульса – от напряжения и ёмкости накопителя энергии.

Для измельчения различных минеральных сред применяются специальные электрогидравлические вибраторы (ЭГ-вибраторы). Они просты и надежны в работе, их конструкция представляет собой систему «цилиндр–поршень». Корпус вибратора заполнен водой. От источника питания на электроды вибратора подается высоковольтный импульс, вызывающий искровой разряд между ними, благодаря чему в жидкости возникает импульс давления, заставляющий поршень перемещаться вдоль своей оси. В результате движения поршня в полости цилиндра возникает разрежение, и под действием атмосферного давления поршень возвращается в исходное положение. Так осуществляется возвратно-поступательное движение поршня, которое характеризуется механическим импульсом, направленным на обрабатываемое изделие. Частота движения поршня задается частотой электрических разрядов.

Таким образом, электрический разряд в жидкости – это способ преобразования электрической энергии в механическую, которое совершается без промежуточных звеньев и с высоким КПД. Искровой высоковольтный разряд в жидкости мгновенно преобразует накопленную энергию в тепловую, световую, механическую и др. Несжимаемость жидкости приводит к электрогидравлическому удару, который многократно усиливает действие электрического разряда.

7.6 Устройство и работа электростатических установок

Электростатические технологии успешно применяются в различных технологических процессах: при обеспыливании промышленных выбросов, электроосмотическом опреснении воды, разделении суспензий, эмульсий, сыпучих смесей, окраске металлических изделий и др.

Ниже приведено устройство и работа электрических фильтров.

Электрофильтр состоит из следующих основных элементов (рис. 7.14):

- системы подготовки газов для подачи в электрофильтр, в которую входят блоки увлажнения газа и выравнивания профиля скоростей;

- источника питания, состоящего из повышающего трансформатора в комплекте с регулирующим автотрансформатором и высоковольтным выпрямителем.

Схема воздействия электрического поля на частицы вещества в электрофильтрах включает две стадии:

- предварительная бесконтактная зарядка частиц;
- осаждение частиц за счет кулоновского взаимодействия их зарядов с электрическим полем.

Принципиальная схема действия электрофильтра заключается в следующем. От источника питания на коронирующий и осадительный электроды подается высокое напряжение постоянного тока. Между электродами возникает неоднородное электрическое поле. Необходимая разность потенциалов для создания коронного разряда в электрофильтре определяется по известному значению напряжённости E_0 для соответствующей конструкции электрофильтра. По мере повышения напряжения после возникновения коронного разряда ток быстро увеличивается. При чрезмерном повышении напряжения коронный разряд может перейти в искровой. Рабочие токи в электрофильтре составляют 0,1–1 мА на 1 м длины электрода.

По достижении разности потенциалов между электродами электрофильтра 50–80 кВ напряженность электрического поля может сообщить свободным электронам и ионам газа скорость выше критической. Энергия таких электронов может быть достаточной для ударной ионизации нейтральных частиц. Образующиеся при этом ионы и свободные электроны также разгоняются электрическим полем до критических значений и ионизируют другие атомы и молекулы. Этот процесс нарастает лавинообразно. Данная ионизация называется коронированием.

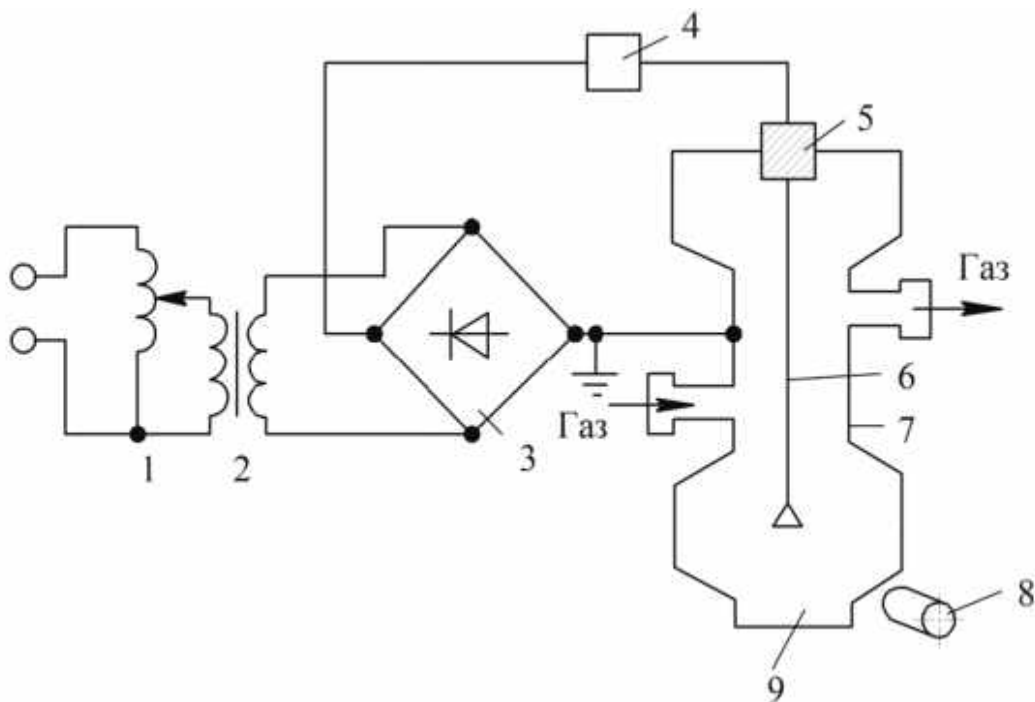


Рисунок 7.14 – Принципиальная схема электрофильтра:
 1 – регулирующий автотрансформатор; 2 – повышающий трансформатор; 3 – высоковольтный выпрямитель; 4 – кабель с ограничительным сопротивлением; 5 – изолирующий ввод;
 6 – коронирующий электрод; 7 – осадительный электрод;
 8 – механизм встряхивания; 9 – бункер

После образования коронного разряда в электрофильтре возникают две зоны. Первая расположена вокруг коронирующего электрода, она заполнена положительно и отрицательно заряженными ионами и электронами. Вторая занимает пространство между коронирующим и осадительным электродами, она заполнена только отрицательными ионами и электронами. По этой причине при прохождении через полость электрофильтра запыленного газа большинство пылинок получает отрицательный заряд и направляется к положительному осадительному электроду 7. Осадительные электроды периодически встряхивают специальным механизмом 8, и осевшая на них пыль осыпается в бункер 9.

Энергию электрического поля, необходимую для сепарации частиц в электрофильтре, можно теоретически определить при рассмотрении процесса перемещения частицы в газах на расстояние до осадительного электрода под действием силы электрического поля.

Так как эффективность электрофильтра повышается с ростом значения тока и амплитудного (эффективного) значения напряжения, необходимо стремиться к увеличению полезной мощности, расходуемой на работу электрофильтра. Для достижения эффективной

работы электрофильтра потребляемая им мощность не должна ограничиваться. Электрофильтр даже большого размера, очищающий около $100 \text{ м}^3/\text{с}$ дымовых газов ($360000 \text{ м}^3/\text{ч}$) от золы при расходе электроэнергии около $0,83 \text{ МДж}$ на $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,23 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на 1000 м^3), потребляет всего 83 кВт . Ограничение потребляемой мощности дает небольшую экономию энергии, но ведёт к существенному снижению степени очистки газов.

Экономический эффект от применения электрофильтров весьма значителен: пыль, улавливаемая электрофильтром, порой представляет большую ценность, поскольку в ней могут содержаться серебро, медь, никель, сурьма, цинк, свинец, магний и другие ценные вещества.

Экологический и гигиенический эффект электрофильтров трудно переоценить, так как тепловые электростанции, предприятия металлургической промышленности выбрасывают в воздух огромное количество всевозможных газов, загрязняющих атмосферу и окружающую среду.

В состав агрегата питания электрофильтров входят: регулятор напряжения, повышающий трансформатор, выпрямитель и интегратор. По принципу действия среди них различают источники тока и источники напряжения. При питании фильтра от источника тока ток коронного разряда практически остается постоянным, а выходное напряжение изменяется пропорционально сопротивлению нагрузки. При питании от источника напряжения ток коронного сильно зависит от напряжения.

Агрегаты питания электрофильтров снабжены устройствами автоматического регулирования напряжения от U_{min} до U_{max} и поддерживающими его в пределах пробивного и сниженного на заданное значение ограничение энергии, выделяющейся при дуговых разрядах в электрофильтре аварийного отключения агрегата; сигнализации работы агрегата.

Источник питания (рис. 7.15) состоит из повышающе-выпрямительного блока с высоковольтным переключателем и панели управления. Блок включает в себя высоковольтный повышающий трансформатор Tr и высоковольтный выпрямитель D . Отрицательный полюс выпрямителя соединен с коронирующими электродами электрофильтра, а положительный полюс и осадительные электроды заземлены. Магнитный усилитель MU , включенный последовательно с первичной обмоткой трансформатора, позволяет в широких пределах регулировать высокое напряжение за счёт изменения тока подмагничивания.

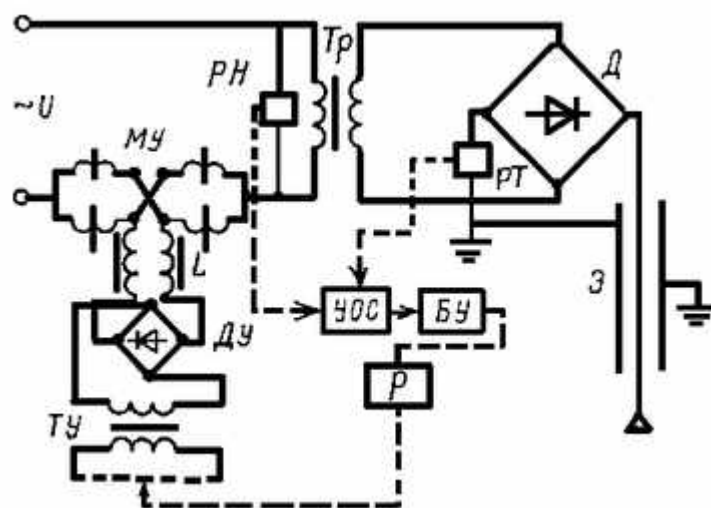


Рисунок 7.15 – Схема источника питания электрофильтра типа АИФ

Во время работы регулятор напряжения P по команде блока управления БУ понижает или повышает напряжение на первичной обмотке трансформатора управления TU , чем регулирует напряжение высоковольтного трансформатора Tr .

При возникновении искровых разрядов напряжение на электрофильтре автоматически резко снижается, что приводит к снижению тока. После этого искровые разряды прекращаются. Если возникает устойчивая электрическая дуга, срабатывает максимально-токовое реле PT , а из-за резкого увеличения падения напряжения на магнитном усилителе отключается реле напряжения PH , в обоих случаях срабатывает реле защиты.

В некоторых источниках питания электрофильтров осуществляется экстремальное регулирование, при котором ведется непрерывный автоматический поиск электрического режима, соответствующего максимальному уровню среднего значения напряжения на электродах фильтра.

При возникновении дугового разряда между электродами управляющее устройство на $0,01-0,02$ с полностью снимает с них напряжение, а затем напряжение плавно восстанавливается до прежнего уровня. При прекращении тока происходит деионизация дугового канала в электрофильтре за время порядка $0,01$ с. Схема такого источника питания с тиристорами показана на рисунке 7.16. Тиристорный силовой блок $З$ выполняет функции коммутирующей аппаратуры и плавного регулирования напряжения на входе повышающего трансформатора.

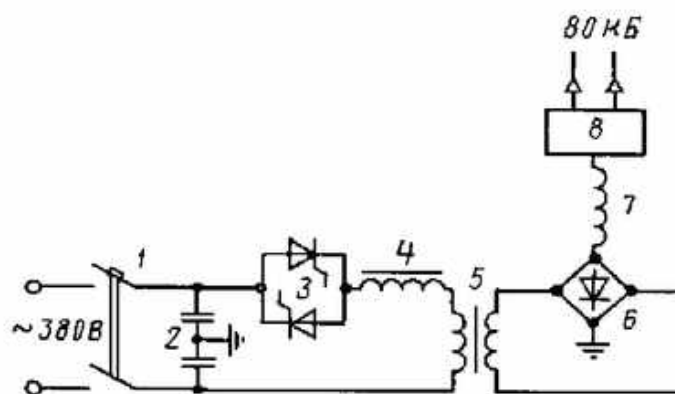


Рисунок 7.16 – Принципиальная электрическая схема источника питания типа АТФ:

- 1 – сетевой автомат; 2 – фильтр защиты от помех; 3 – силовой тиристорный блок; 4 – реактор, ограничивающий броски тока при переходных процессах и подавляющий высшие гармоники; 5 – повышающий трансформатор; 6 – кремниевый выпрямитель; 7 – сглаживающий реактор; 8 – высоковольтное распределительное устройство

Конструкцию электрофильтра в каждом конкретном случае определяют технологические условия его работы: состав и свойства очищаемых газов и содержащихся в газах взвешенных частиц, температура, давление и влажность очищаемых газов, требуемая степень очистки и другие требования.

Как правило, электрофильтры подразделяют на две группы: однозонные, в которых зарядка и осаждение частиц происходят в одной зоне, там, где расположены коронирующая и осадительная системы; двухзонные: в первой зоне располагается коронирующая система – ионизатор, во второй – осадительная система (осадитель).

По форме осадительного электрода электрофильтры подразделяют на трубчатые и пластинчатые. Трубчатый электрофильтр изготавливают из стальных труб – осадительных электродов. По оси труб натянута проволока – коронирующий электрод. Пластинчатый электрофильтр собирают из ряда параллельных металлических пластин или частого ряда проволок, являющихся осадительными электродами. Между рядами этих электродов подвешивают проволочные коронирующие электроды.

В корпусе пластинчатого электрофильтра может быть размещено несколько независимых, последовательно расположенных систем электродов (электрических полей). По числу полей такие электрофильтры называются двух-, трёх-, четырёх- и многопольными. Пластинчатые электроды способны улавливать и жидкие, и твердые частицы. Электрическое поле в них слабее, чем в трубчатых, но они

проще в изготовлении и встряхивать электроды в них значительно легче, чем в трубчатых.

Кроме основного оборудования электрофилтры имеют узлы подвода, распределения и отвода газов. Они должны обеспечивать равномерное распределение газов по сечению электрофилтра, а также входные и выходные коллекторы, имеющие сечение, соответствующее количеству пропускаемых газов на отдельных участках. Для регулирования пропускной способности газов через секции электрофилтров, на выходе установлены дроссельные заслонки. Кроме этого, на выходе, как правило, делают плавный переход от сечения электрофилтра к сечению газопровода или дымовой трубы.

Корпус трубчатых осадительных электродов иногда выполняют из двух частей: нижней – входной коробки с бункерами и верхней – выходной коробки. В такой конструкции осадительные электроды расположены открыто между коробками.

Корпус изготавливают из стали, алюминия и других металлов, а также из кирпича, железобетона и других материалов. При необходимости его футеруют и снабжают теплоизоляцией.

Коронирующие электроды имеют особую форму для создания интенсивного однородного коронного разряда. Они должны обладать механической прочностью и жесткостью для обеспечения продолжительной службы (что особенно важно в условиях вибрации и раскачивания под влиянием сил электрического поля, воздействия механизма встряхивания и движущегося газового потока), а также стойкостью в газовой среде, которая может иметь высокую температуру и содержать агрессивные вещества.

Конструкции коронирующих электродов подразделяют на две группы:

– к первой группе относятся электроды, которые не имеют фиксированных разрядных точек. При отрицательной короне точки разряда распределяются по поверхности электрода в зависимости от состояния этой поверхности и режима работы электрофилтра. Такие электроды применяются как в трубчатых, так и в пластинчатых электрофилтрах;

– ко второй группе относятся электроды с фиксированными точками разряда по их длине. Такими точками на поверхности электрода могут быть острия или шипы и даже колючая проволока. Применяются также электроды из ленты, уголка со штампованными зубцами или шипами. Такие электроды используются в пластинчатых электрофилтрах.

Осадительные электроды трубчатых электрофилтров выполняют из труб круглого, квадратного или шестигранного сечения. Осадительные электроды мокрых пластинчатых электрофилтров изготавливают в виде гладких пластин.

Надежная работа электрофильтров зависит от состояния электродов, большинство которых эксплуатируется при повышенной температуре и в условиях агрессивной пылегазовой среды. Поэтому эти узлы изготавливают из материалов высокого качества – конструкционных и специальных сталей, электроды обязательно подвергают термообработке для исключения деформации при изменении температуры во время работы. Для мокрых электрофильтров осадительные электроды можно изготавливать из угля, графита, дерева, кирпича, пластмасс и т. д. Для удаления с электродов осажденной пыли, в мокрых электрофильтрах применяют брызгалки и форсунки: с их помощью периодически или непрерывно промывается поверхность электродов. Коронирующие электроды промывают через надетые на них воронки.

В сухих электрофильтрах для удаления с электродов осевшего продукта применяют механизмы встряхивания: ударно-молотковый, пружинно-кулачковый, магнитно-импульсный и др.

Для подключения высокого напряжения к осадительным электродам прокладывают стальную шину положительной полярности, которую в нескольких местах присоединяют к контуру заземления. Разрывы шины положительной полярности от выпрямителя к электрофильтру недопустимы, в противном случае прикосновение человека к шине положительной полярности выпрямителя может вызвать поражение работника электрическим током. Для предотвращения такой ситуации линия положительной полярности выпрямителя снабжена искровым предохранителем – прямым ответвлением к заземлению через определенный воздушный промежуток. При разрыве цепи этот промежуток пробивается искрой, и ток в цепи заземления восстанавливается автоматически.

К коронирующим электродам ток подводится по высоковольтному бронированному одножильному кабелю.

В случае близкого расстояния от подстанции до электрофильтров к ним можно подводить напряжение по стальным шинам диаметром 10–12 мм, расположенным на опорных изоляторах внутри защитных кожухов или подобных конструкциях.

Установки, основанные на явлении электроосмоса, применяются для очистки воды, выделения растворенных в ней веществ, получения питьевой воды для населения и пресной воды для промышленности.

Установка электроосмотического опреснения воды позволяет очищать морскую воду и получать из неё пресную. Установка разделена на 10–12 самостоятельных ячеек (рис. 7.17).

В воду помещают электроды 2, на которые подают высокое напряжение постоянного тока. Растворенные в воде соли (Na_2SO_4 , CaSO_4 , CaHCO_3) диссоциируют на катионы Na^+ , Ca^{2+} , H^+ , движущиеся к катоду 8, и анионы SO_4^{2-} , HCO_3^- , направляющиеся к аноду 6. В

катодном отделении 8 вода становится щелочной, а в анодном – кислой, и по трубам 1 она отводится поочередно через все 10–12 ячеек опреснительного устройства. По мере обеднения очищаемой воды солями сопротивление раствора постепенно, от ячейки к ячейке, растёт. По этой причине к электродам ячеек от источника постоянного тока подводится напряжение, увеличивающееся от 55 до 220 В от ячейки к ячейке по мере роста сопротивления раствора.

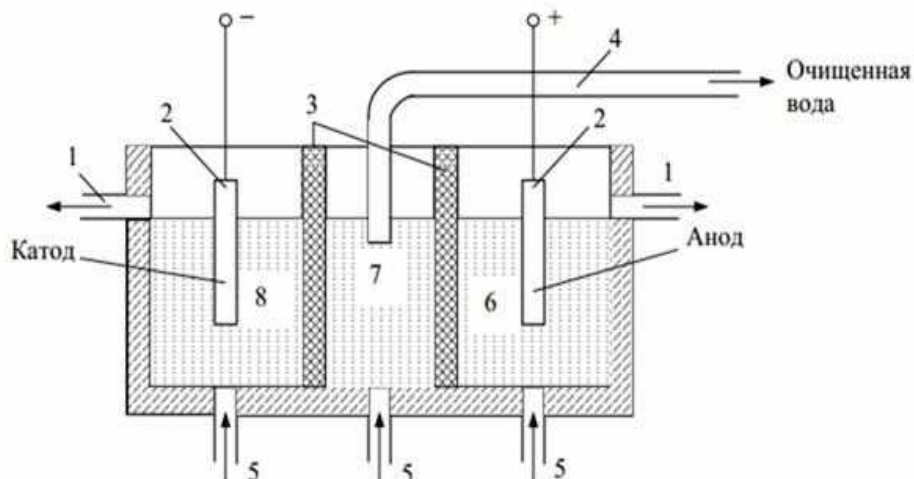


Рисунок 7.17 – Схема установки электроосмотического опреснения воды:

- 1 – труба для отвода кислой среды; 2 – анод; 3 – диафрагмы;
- 4 – труба для отвода очищенной воды; 5 – трубы для подачи воды;
- 6, 7, 8 – отделения для опреснения воды

Установки, предназначенные для разделения суспензий, используют явление электрофореза.

Электрофорез – это электрокинетическое явление перемещения частиц дисперсной фазы (коллоидных или белковых растворов) в жидкой или газообразной среде под действием внешнего электрического поля.

Установки применяют в промышленности для обезвоживания каолина (глины) при очистке его от примесей (пирита, слюды, кварца и т. д.). Загрязненный каолин смешивают с водой, добавляют жидкое стекло и после отстаивания удаляют грубые частицы. Водную суспензию каолина направляют через разделительную установку. В ней в результате электрофореза твёрдые частицы суспензии перемещаются в направлении вращающегося анода и осаждаются на фильтровальном сукне, покрывающем анод. Очищенная от каолина вода направляется к катоду и затем в слив. Отложения каолина собираются на плавно перемещающемся сукне анода.

Разделение эмульсий каучука (латекса) также основано на применении электрофореза. В эмульсии каучука, помещенной в электростатическое поле, частицы получают отрицательный заряд и в процессе электрофореза движутся к металлической сетке, служащей анодом. Осажденный на сетке влажный каучук промывается водой над ванной, на дне которой расположен катод, просушивается на столе, после чего сухой каучук срезают с металлической сетки специальным ножом.

Разделение сыпучих смесей в электрическом поле проводят в установках, предназначенных для очистки семян различных культур от примесей (рис. 7.18).

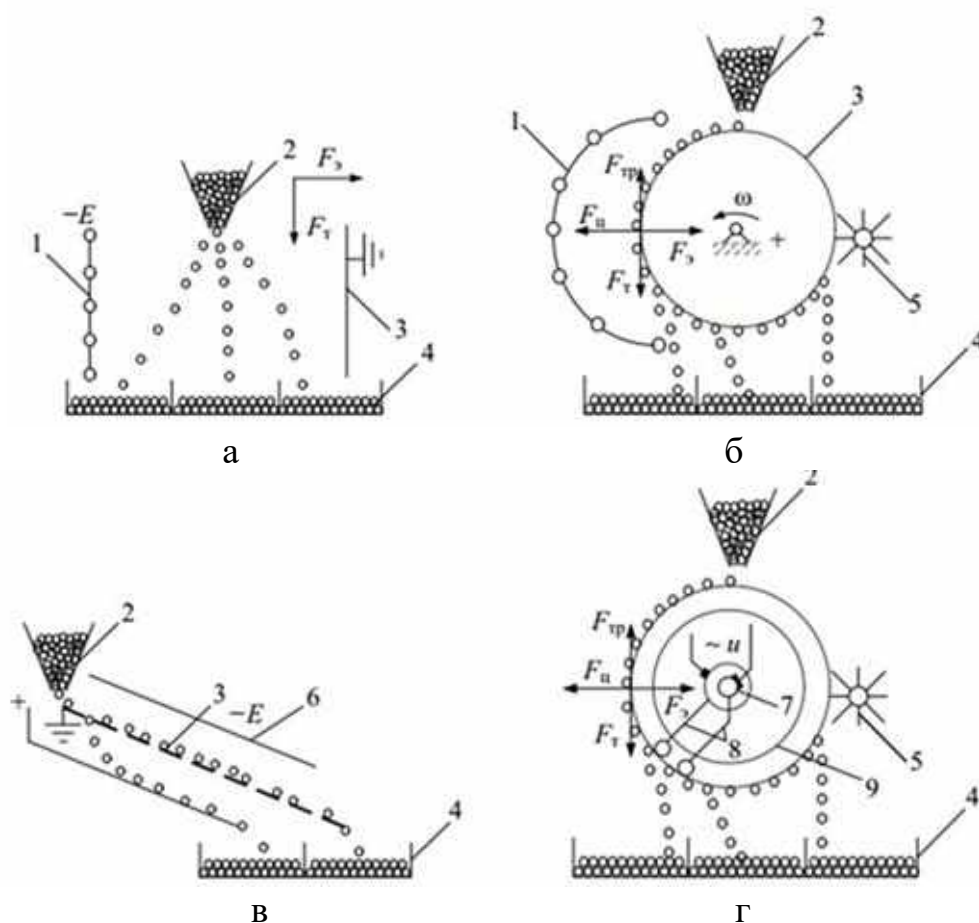


Рисунок 7.18 – Схемы установок для разделения сыпучих смесей:

а – камерная; б – барабанная; в – решетчатая;

г – диэлектрический сепаратор;

1 – коронирующий электрод; 2 – бункер-дозатор; 3 – осадительный электрод; 4 – приемные бункера; 5 – щетка; 6 – плоский электрод;

7 – токопроводящие кольца; 8 – провода; 9 – диэлектрический цилиндр; $(-E)$ – силовые линии электрического поля; $F_{Э}$ – сила электрического поля;

F_T – сила тяготения; $F_{Ц}$ – центробежная сила;

$F_{тр}$ – сила трения; ω – направление вращения; U – напряжение на электрофильтре

Направляясь из бункера-дозатора в поле коронного разряда, семена заряжаются, ориентируются вдоль силовых линий поля F_3 и под их воздействием перемещаются от коронирующего электрода к осадительному. Их перемещение зависит от вида и электрофизических свойств семян. Наличие этих свойств у очищаемых семян позволило создать зерноочистительные машины камерного, барабанного и решетчатого типов. Обработанные в электрическом поле семена отличаются повышенными всхожестью, энергией прорастания, выживаемостью и урожайностью. Диэлектрический сепаратор семян получает питание непосредственно от сети переменного тока. Электрическое поле создается параллельно намотанными в один слой на диэлектрическом барабане изолированными проводами. Семена высыпаются на барабан тонким слоем. Электрическое поле удерживает семена на поверхности барабана в зависимости от их диэлектрической проницаемости. При вращении барабана центробежная сила отрывает семена от барабана в разных местах его нижней части, что позволяет из одной и той же партии семян выделить фракции одинакового качества.

Окраска металлических изделий в высоковольтном электрическом поле относится к эффективным способам защиты поверхностей деталей и для придания им привлекательного внешнего вида и заключается в следующем (рис. 7.19). На заземленном конвейере 1 подвешивают подготовленные под окраску изделия 2. Конвейер движется от входа камеры к её выходу 3. Внутри камеры сверху и снизу конвейера на изоляторах 5 подвешены рамы с металлическими стенками 6, соединенными с высоковольтными выпрямителями 4 и являющимися коронирующими электродами. При заданном напряжении между сетками и конвейером начинается коронный разряд.

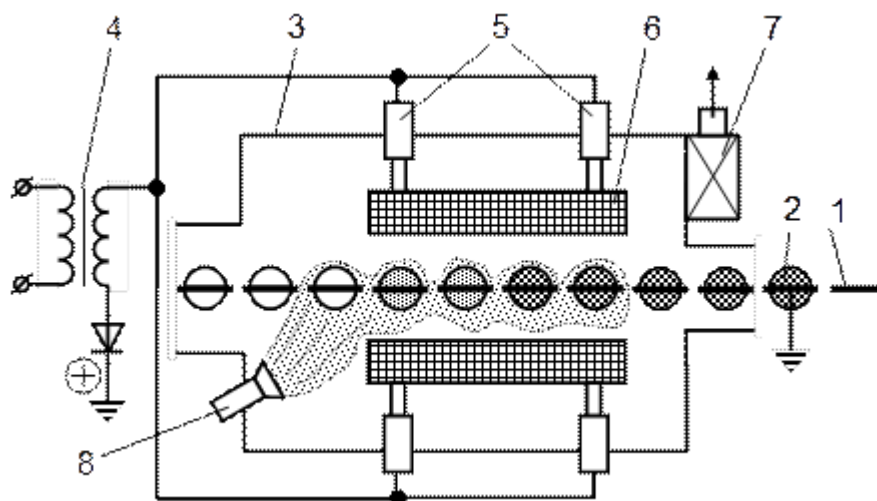


Рисунок 7.19 – Схема установки для окраски изделий в электростатическом поле

Подаваемые пневматическими распылителями через сопло 8 частицы краски заряжаются в электрическом поле и, превратившись в отрицательные ионы, движутся к положительно заряженным изделиям (аноду). Заряженные частицы падают на изделие со всех сторон и равномерно окрашивают плотным слоем краски всю его поверхность. Вытяжной вентилятор 7 удаляет из камеры пары растворителей и обеспечивает заданный состав атмосферы.

В электрическом поле можно окрашивать изделия I и II групп сложности, изготовленные из различных материалов, с применением стационарных и ручных установок. Особенно приемлем этот способ при окрашивании мелких изделий не очень сложной формы: деталей приборов, авто-, вело- и мотодеталей, электротехнических изделий, фурнитуры, бытовой техники, мебели, обуви и др. Его используют и при окрашивании средне- и крупногабаритных изделий, таких как кузова и кабины автомобилей, железнодорожные и трамвайные вагоны, автобусы. Хорошие результаты получены как при массовом, серийном производстве, так и при окрашивании единичных изделий. При применении стационарных установок существенно улучшаются санитарно-гигиенические условия труда, и повышается общая культура производства.

Нанесение лакокрасочных материалов в электрическом поле высокого напряжения – очень экономичный метод. Он позволяет значительно сократить потери лакокрасочных материалов, автоматизировать процесс окраски и легко сочетать его с терморadiационной сушкой, повысить культуру производства и уменьшить стоимость окрасочных работ.

Хорошо распыляются в электрическом поле только те лакокрасочные материалы, которые обладают определенными электрическими свойствами.

Конструкции установок для электроокрашивания весьма разнообразны, однако все они содержат следующие основные узлы: электростатический распылитель, дозирующее устройство, источник высокого напряжения постоянного тока, включающий электростатический генератор и кенотронный выпрямитель, искропредупреждающее (или предохранительное) устройство, окрасочную камеру.

Электростатический распылитель – один из важных элементов установок. В зависимости от способа распыления лакокрасочных материалов находят применение электростатические распылители с неподвижной коронирующей кромкой, пневмоэлектростатические, электроультразвуковые, гидроэлектростатические.

Наибольшее распространение при окрашивании изделий в электрическом поле получили электромеханические распылители, в первую очередь, чашечные. Они компактны, просты по устройству и

надежны в эксплуатации. Рабочим органом таких распылителей служит коронирующая насадка в виде чаши диаметром 50–150 мм.

При больших объемах окрасочных работ установки комплектуют несколькими распылителями (от 2 до 6), которые спаривают механизмами, обеспечивающими их качание или возвратно-поступательное перемещение в вертикальной плоскости. Расстояние от коронирующей кромки до изделия обычно составляет 200–300 мм.

Более направленное перемещение аэрозоля лакокрасочного материала, чем электромеханические распылители, создают пневмоэлектростатические распылители и позволяют лучше прокрашивать углубления в изделиях.

Распыление красок в них осуществляется с помощью струи сжатого воздуха, подаваемого под давлением 0,05–0,4 МПа. Производительность по окраске распылителей разных типов колеблется от 30 до 300 г/мин.

Весьма производительны щелевые электростатические распылители, длина коронирующей кромки которых равна соответственно 500 и 700 мм, а производительность по краске достигает до 120 г/мин. Они особенно хорошо зарекомендовали себя при окраске крупногабаритных изделий и объектов с несложным профилем поверхности: железнодорожных и трамвайных вагонов, тепловозов, вагонов метро и др.

Источниками постоянного тока высокого напряжения в автоматизированных установках обычно служат высоковольтная выпрямительная установка, каскадный или роторный генераторы, повышающий напряжение с 6 до 45 кВ.

Питание электростатических и электродинамических распылителей жидкими лакокрасочными материалами обеспечивается с помощью дозирующего устройства.

Способом электростатического распыления можно наносить различные виды лакокрасочных материалов: грунтовки, лаки и эмали алкидные, мочевиноформальдегидные, меламиноалкидные, масляно-стирольные, эпоксидные (одноупаковочные) и др.

При электроокрашивании запрещается использовать материалы повышенной вязкости, двухкомпонентные с ограниченной жизнеспособностью, содержащие в качестве пигмента или наполнителя металлические порошки. Не рекомендуется применять материалы, в состав которых входят растворители с температурой вспышки ниже – 4 °С (перхлорвиниловые, нитроцеллюлозные, полиэфирные и некоторые другие).

Хорошо наносятся лакокрасочные материалы, у которых проницаемость $\varepsilon = 6–10$, удельное объёмное сопротивление $\rho_V = 5 \cdot 10^4 – 5 \cdot 10^5$ Ом·м. Для разведения этих материалов применяют разбавители марки РЭ. Толщина однослойных покрытий при нанесении составляет

18–25 мкм. При использовании распылителей с высокой частотой вращения чаши можно применять лакокрасочные материалы с бóльшей вязкостью, при этом на 25–30 % возрастает толщина получаемых однослойных покрытий.

Наилучшие результаты в отношении степени осаждения краски, равномерности и толщины красочного слоя получаются при следующих условиях работы установок для окрашивания:

- соблюдении потенциала коронирующих электродов в пределах 85–100 кВ;

- присоединении коронирующих электродов к отрицательному полюсу при заземлении окрашиваемого предмета;

- оптимальном расстоянии между коронирующим электродом и окрашиваемым предметом 200–250 мм;

- применении коронирующих электродов в виде одиночных тонких проволок диаметром 0,3 мм, поставленных параллельно направлению движения предмета. Электроды в виде сетки дают значительно худшие результаты;

- распылении краски под давлением воздуха в краскораспылителе 0,07–0,1 МПа, причем угол факела должен быть наибольшим. Степень осаждения краски повышается при надевании на выходное отверстие краскораспылителя круглой насадки диаметром 35 мм и длиной 55 мм (благодаря образуемому при этом перепаду сечений).

Направление факела должно быть параллельно проволокам коронирующих электродов. Сопло распылителя следует устанавливать не посередине расстояния между электродом и предметом, а несколько ближе к изделию. В продольном направлении сопло следует располагать на расстоянии 150–200 мм от зоны электрического поля. Струя краски должна быть широкой и плоской с малой скоростью полета частиц.

Окрашивание в электрическом поле с применением воздушного распыления краски имеет следующие преимущества:

- достигается значительная экономия лакокрасочных материалов (до 40–50 %) по сравнению с обычными способами воздушного распыления;

- создаётся возможность нанесения слоя краски любой практически необходимой толщины;

- обеспечивается равномерность получаемого покрытия;

- достигается полная автоматизация процесса окрашивания, исключая необходимость пребывания рабочего в зоне распыления краски и тем самым резко улучшаются санитарно-гигиенические условия труда;

- повышается производительность окрашивания;

- достигается значительная экономия электроэнергии (около 50 %) на сжатие воздуха (в связи с применением более низкого

давления воздуха) и вентиляцию камеры (в связи с малыми скоростями воздуха при вентилировании камеры).

К недостаткам этого способа следует отнести:

- сложность окрашивания внутренних труднодоступных поверхностей;

- необходимость соблюдения строгого противопожарного режима и строгих мер техники безопасности;

- необходимость применения сжатого воздуха для распыления краски;

- необходимость применения специальных экранов или проводящих вставок при окрашивании деталей из непроводящих материалов (пластмасса, дерево и др.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электротехнология : Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/Электротехнология> (дата обращения: 17.10.2025). – Текст : электронный.
2. История электротехники : Глава 7. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ / ВикиЧтение. – URL: <https://tech.wikireading.ru/15770> (дата обращения: 17.10.2025). – Текст : электронный.
3. Электротехнологические установки (лекции) : Промышленность и производство / Мир Знаний. – URL: <https://mirznanii.com/a/195577-3/elektrotekhnologicheskie-ustanovki> (дата обращения: 17.10.2025). – Текст : электронный.
4. Бабокин, Г. И. Энерготехнологические установки : учебное пособие / Г. И. Бабокин. – Москва : Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2023. – 220 с. // Znanium : электронная библиотечная система. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2147947> (дата обращения: 17.10.2025). – Текст : электронный.
5. Гардин, А. И. Электротехнологические промышленные установки. Практикум : учебное пособие / А. И. Гардин, О. Ю. Малафеев, С. Н. Юртаев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 292 с. // Znanium : электронная библиотечная система. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2102084> (дата обращения: 10.09.2025). – Режим доступа: по подписке. – Текст : электронный.
6. Давыдов, Д. А. Источники питания электротехнологических установок и комплексов : учебное пособие / Д. А. Давыдов, Е. К. Пыльская, Т. Ю. Дунаева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 116 с. // Znanium : электронная библиотечная система. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2172496> (дата обращения: 14.10.2025). – Текст : электронный.
7. Давыдов, Д. А. Информационно-измерительные системы электротехнологических установок и комплексов : учебное пособие / Д. А. Давыдов, Е. К. Пыльская. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 168 с. // Znanium : электронная библиотечная система. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2172491> (дата обращения: 14.10.2025). – Текст : электронный.
8. Давыдов, Д. А. Вспомогательные системы электротехнологических установок : учебное пособие / Д. А. Давыдов, А. В. Чигурова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 128 с. // Znanium : электронная библиотечная система. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2172486> (дата обращения: 14.10.2025). – Текст : электронный.

9. Макаров, А. Н. Электротехнологические установки [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Н. Макаров, А. Ю. Соколов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 288 с. // Znanium : электронная библиотечная система. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1836532> (дата обращения: 10.09.2025). – Текст : электронный.

10. Миронова, А. Н. Электрооборудование и электроснабжение электротехнологических установок : учебное пособие / А. Н. Миронова, Ю. М. Миронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ИНФРА-М, 2026. – 470 с. – (Высшее образование). // Znanium : электронная библиотечная система. – URL: <https://znanium.ru/catalog/product/2213433> (дата обращения: 14.10.2025). – Текст : электронный.

11. Крежевский, Ю. С. Электротехнологические установки : учебное пособие / сост. Ю. С. Крежевский. – Ульяновск : УлГТУ, 2016. – 83 с.

12. ГОСТ 19108–81. Электронагреватели трубчатые (ТЭН) для бытовых нагревательных электроприборов. Общие технические условия (с Изменениями N 1, 2) = Tubular heating elements (THE) for household electric appliances. General specifications : государственный стандарт : издание официальное : взамен ГОСТ 19108–73 : дата введения 1983-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1990 (переиздание с изм.). – 20 с.

13. ГОСТ 13268–88. Электронагреватели трубчатые = Tubular electric heaters : государственный стандарт : издание официальное : взамен ГОСТ 13268–83 : дата введения 1990-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 13 с.

14. Сафонов, В. И. Электротехнологические установки : учебное пособие / В. И. Сафонов. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 124 с.

15. Богданов, С. П. Расчет печей сопротивления [Текст] : методические указания / С. П. Богданов. – Санкт-Петербург : СПбГТИ(ТУ), 2006. – 36 с.

16. Нагреватели. Методика и примеры расчета / «Метотехника. – URL: https://www.metotech.ru/art_nagrev_1.htm (дата обращения: 24.04.2025). – Текст : электронный.

17. ГОСТ 12766.1–90. Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Технические условия (с Изменением N 1) = High electric resistance wire of precision alloys. Specifications : взамен ГОСТ 12766.1–77 : межгосударственный стандарт : издание официальное : дата введения 1991-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2004 (переиздание с изм.). – 16 с.

18. Лабораторная работа №2. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ / MyLektsii.ru. – URL: <https://mylektsii.ru/2-34993.html> (дата обращения: 18.10.2025). – Текст : электронный.

19. Автоматизация управления электрическими печами / ELEKROLIBRARY.INFO. – URL: <http://www.electrolibrary.info/12-avtomatizaciya-upravleniya-elektricheskimi-pechami.html?ysclid=mgusbjbf2a997042827> (дата обращения: 10.10.2025). – Текст : электронный.

20. Принцип действия и области применения индукционного нагрева / Школа для электрика. – URL: <http://electricalschool.info/main/electrotehnolog/2266-princip-deystviya-i-oblasti-primeneniya-indukcionnogo-nagreva.html> (дата обращения: 18.10.2025). – Текст : электронный.

21. Сущность индукционного нагрева / ТЕСЛАЙН Индукционное оборудование ТВЧ [Электронный ресурс]. – URL: <https://tesline.ru/stat-i/sushhnost-indukcionnogo-nagreva?ysclid=mgusq6ncsv82415968> (дата обращения: 19.10.2025). – Текст : электронный.

22. Схемы основных типов индукционных нагревателей / ТЕСЛАЙН Индукционное оборудование ТВЧ. – URL: <https://tesline.ru/stat-i/shemy-osnovnyh-tipov-indukcionnyh-nagrevateley?ysclid=mh20vb7u6g963928896>. (дата обращения: 22.10.2025). – Текст : электронный.

23. Расчет основных параметров системы индуктор-деталь индукционной установки / Индукционный нагрев ТВЧ : Статьи. – URL: <http://elisit.ru/materiali/?pid=115> (дата обращения: 22.10.2025). – Текст : электронный.

24. Режимы и оптимальная частота высокочастотного индукционного нагрева / Студопедия. – URL: https://studopedia.ru/26_104053_rezhimi-i-optimalnaya-chastota-visokochastotnogo-induktsionnogo-nagreva.html?ysclid=mi5x1azn4i641788436 (дата обращения: 19.11.2025). – Текст : электронный.

25. Теплосодержание углеродистых сталей / Термист. Термомеханическое упрочнение арматурного проката. Технология, средства, разработка. – URL: https://www.termist.com/luo/tab1/sw_wa/i_ot_t_01.htm (дата обращения: 19.11.2025). – Текст : электронный.

26. Индукционный и диэлектрический нагрев. Индукционная плавка в печи. Виды диэлектрических установок / Электрические машины : Статьи. ETI.SU. – URL: https://eti.ru/articles/elektricheskie-mashini/elektricheskie-mashini_1454.html?ysclid=mi5x87ejn3883697564 (дата обращения: 19.11.2025). – Текст : электронный.

27. Электродуговые печи / StudIzba.com. – URL: <https://studizba.com/lectures/inzhenerija/jelektrotehnologicheskie-ustanovki/40992-jelektrodugovye-pechi.html> (дата обращения: 09.11.2025). – Текст : электронный.

28. Дуговые электрические печи. Виды, устройство дуговых электрических печей / ЭлектроТехИнфо. – URL: https://eti.ru/articles/elektricheskie-mashini/elektricheskie-mashini_1457.html?ysclid=mi5xpxr6ge487652553 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

29. Дуговая печь косвенного действия / StudRef.com. – URL : https://studref.com/528846/tehnika/dugovaya_pec_kosvennogo_deystviya?ysclid=mi5xvrz7u0260752072 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

30. Плазменная технология / Технологии производства. – URL: <https://proiz-teh.ru/plazmennaja-tehnologija.html>. (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

31. ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ / ЛЕКЦИЯ. – URL: <https://lektsia.com/1x44f.html?ysclid=mi5yho99n7208794579> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

32. Дуговые плазмотроны / Stufiles. – URL: https://studref.com/528859/tehnika/dugovye_plazmotrony?ysclid=mi5ymbc7mf230164017 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

33. Плазменная резка. Сущность и схема процесса / StudRef . – URL: https://studref.com/529002/tehnika/plazmennaya_rezka?ysclid=mi5ysskb642438185 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

34. КОНСТРУКЦИИ ДУГОВЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ / Lechmania.ru. – URL: <https://lectmania.ru/1x83b.html> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

35. Сущность процесса ручной плазменной резки, виды и выбор оборудования / Производство оборудования для термической резки : ПУРМ. – URL: <https://purm.ru/2020/07/09/sushhnost-processa-ruchnoj-plazmennoj-rezki-vidy-i-vybor-oborudovaniya/?ysclid=mi5zi8yniy251470155> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

36. Савицкий, В. В. Электроэрозионные методы обработки материалов : учебное пособие для студентов спец. "Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов" учреждений, обеспечивающих получение высшего образования / В. В. Савицкий ; УО "ВГТУ". – Витебск : УО "ВГТУ", 2006. – 276 с. – Спс. лит. – ISBN 985-6655-74-9. – URL: <http://rep.vstu.by/handle/123456789/1407>. – Текст : электронный.

37. Электрохимическая обработка / Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрохимическая_обработка (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

38. Электрохимические и электрофизические установки / Электроспец. – URL: http://www.elektrospets.ru/oborudovanie_elektrotekhnologicheskikh_ustanovok_elektrokhim_elektrofiz_ustanovki_elektrokhimicheskie_ustanovki.php (дата обращения: 18.12.2020). – Текст : электронный.

39. Физико-химические процессы при осаждении металлов / Теория и технология формирования неорганических покрытий ; StudRef.com. – URL: https://studref.com/678706/tehnika/fiziko_himicheskie_protssesy_osazhdenii_metallov?ysclid=mi60ao8bto209679138 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

40. Электромеханическая обработка / Строй-Техника.ру : Строительные машины и оборудование, справочник. – URL: https://stroy-technics.ru/article/elektromekhanicheskaya-obrabotka?ysclid=mi60lauvno_912263159 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

41. Электрохимико-механические установки. – URL: https://studme.org/301197/tehnika/elektrohimiko_mehanicheskie_ustanovki?ysclid=mi60phae_9c73887350 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

42. Технологическое оборудование магнитно-импульсной обработки. Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения / StudRef.com. – URL: https://studref.com/528889/tehnika/tehnologicheskoe_oborudovanie_magnitno_impulsnoy_obrabotki?ysclid=mi60szdhna732289584 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

43. Лекция №12 Магнитно-импульсная обработка / Cyberpediq. Информационный ресурс. – URL: <https://cyberpedia.su/9x9c17.html> (дата обращения: 29.12.2020). – Текст : электронный.

44. Ультразвуковая обработка материалов / Современные Технологии Производства ; extxe.com. – URL: <https://extxe.com/2192/ultrazvukovaja-obrabotka-materialov/?ysclid=mi60xp4t6r116891486> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

45. Лекция №5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ / Студопедия. – URL: https://studopedia.ru/19_259213_leksiya--ultrazvukovaya-obrabotka-materialov.html?ysclid=mi60zulnn1728953169 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

46. Электрогидравлическая обработка материалов / ЭлектроТехИнфо : ETI.SU. – URL: https://eti.su/articles/elektricheskie-mashini/elektricheskie-mashini_1466.html?ysclid=mi611n94ke549399048 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

47. Устройство и работа электростатических установок / StudRef.com. – URL: https://studref.com/528895/tehnika/ustroystvo_rabota_elektrostaticheskikh_ustanovok?ysclid=mi613jx4e5669000583 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

48. Электростатические установки. Электрофильтры / ЭлектроТехИнфо ETI.SU. – URL: https://eti.su/articles/elektricheskie-mashini/elektricheskie-mashini_1468.html?ysclid=mi6161jxtl66074365 (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

49. Электростатические технологические процессы / МегаЛекции. – URL: <https://megalektsii.ru/s75011t3.html?ysclid=mi617hfnb691384382> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

50. 8.3. Электростатическое распыление / Pulver : Порошковые краски. – URL: <https://vseokraskah.net/lakokraska/8-3-elektrostaticheskoe-raspylenie.html?ysclid=mi619d2bdj634754882> (дата обращения: 18.11.2025). – Текст : электронный.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Конспект лекций

Составитель:
Савицкий Василий Васильевич

Редактор *Р.А. Никифорова*
Корректор *А.С. Прокопюк*
Компьютерная вёрстка *В.В. Савицкий*

Подписано к печати 27.03.2026. Формат 60x90^{1/16}. Усл. печ. листов 16,4.
Уч.-изд. листов 20,1. Тираж 9. Заказ № 71.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на МФУ издательского сектора учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.