

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Станки и инструмент»

621.9(07)  
П 58

Л.М. Попов

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ**  
Компьютерный текст лекций



Челябинск  
2006

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Станки и инструмент»

621.9(07)  
П 58

Л.М. Попов

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ**

Компьютерный текст лекций

Издание второе, переработанное

Челябинск  
2006

УДК 621.9.04(075.8)

Попов Л.М. Физико-химические методы обработки: Компьютерный текст лекций. — 2-е изд., перер. — Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. — 97 с.

© Л.М. Попов, 2004. — Изд-во Южно-Уральского государственного университета.

В тексте лекций изложены сущность, основные закономерности, технологические показатели и сведения об оборудовании и инструменте электроэрозионного, электрохимического, ультразвукового, комбинированных и лучевых методов обработки, в конце приведен список рекомендуемой литературы [1–15].

Текст лекций предназначен для студентов машиностроительных специальностей.

Ил. 70, список лит. — 15 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией механико-технологического факультета.

Рецензенты: А.К. Ольховацкий, А.В. Чурсин.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ .....	4
2. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА	
2.1. Сущность и основные закономерности .....	5
2.2. Технологические показатели электроэрозионной обработки .....	9
2.2.1. Производительность .....	10
2.2.2. Точность .....	12
2.2.3. Состояние и качество обработанной поверхности .....	15
2.3. Типовые технологические операции	
2.3.1. Объемное копирование .....	17
2.3.2. Прошивание щелей, пазов и отверстий .....	20
2.3.3. Вырезание непрофилированным электродом-проволокой .....	27
2.3.4. Электроэрозионное легирование .....	32
2.3.5. Электроконтактная обработка .....	34
2.4. Оборудование и инструмент .....	36
2.4.1. Оборудование для электроэрозионной обработки .....	37
2.4.2. Генераторы импульсов .....	41
2.4.3. Электроды-инструменты, рабочие жидкости .....	44
2.4.4. Регуляторы межэлектродного промежутка .....	46
2.4.5. Достижения зарубежного станкостроения .....	49
3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	
3.1. Механизм и закономерности формообразования .....	52
3.2. Типовые технологические операции .....	58
3.3. Оборудование и инструмент	
3.3.1. Типовая структура оборудования .....	64
3.3.2. Электроды-инструменты .....	67
3.3.3. Электролиты .....	70
4. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ .....	72
4.1. Электрохимикомеханические методы .....	72
4.2. Анодно-механическая обработка .....	77
5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА	
5.1. Физическая сущность .....	78
5.2. Ультразвуковая размерная обработка .....	82
5.3. Ультразвуковая очистка .....	86
5.4. Ультразвуковая сварка .....	87
6. ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ	
6.1. Светолучевая (лазерная) обработка .....	89
6.2. Электронно-лучевая обработка .....	94
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	97

## 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Физико-химические методы обработки следует рассматривать как одну из областей современной электротехнологии, которая основана на применении электрической энергии для непосредственного или опосредованного использования при формообразовании поверхностей.

Современная электротехнология обработки материалов имеет весьма широкий спектр применения, включая, в том числе, электросварку, электронагрев, электроосаждение металла, но для целей съема и удаления металлических и неметаллических материалов используют следующие физико-химические методы:

- электрофизические методы обработки;
- электрохимические методы обработки.

Под электрофизическими и электрохимическими методами размерной обработки понимают совокупность электрических, электромагнитных и электрохимических процессов или различных сочетаний теплового, механического или химического воздействия на твердое тело с целью придания ему заданных формы и размеров.

В соответствии с принятой классификацией и в зависимости от вида воздействия на обрабатываемый материал указанные методы обработки можно разделить на три большие группы.

*Первая*, наиболее многочисленная группа, охватывает методы, в которых используется тепловое воздействие на обрабатываемый материал. В эту группу входят электроэрозионная, электронно-лучевая и лазерная обработки.

*Вторая* группа объединяет методы, основанные на химическом и электрохимическом воздействии на обрабатываемый материал. В нее входят многочисленные разновидности электрохимической обработки, основанные на анодном растворении материала и методы химического фрезерования, основанные на растворении материала кислотами и щелочами.

Третья группа включает методы импульсного механического воздействия на обрабатываемый материал. Это ультразвуковая обработка.

Общими характерными особенностями физико-химических методов обработки, которые обеспечивают их преимущество, по сравнению с механической обработкой, являются:

- независимость производительности от твердости и вязкости обрабатываемого материала; исключение составляет ультразвуковой метод, который можно применять только при обработке преимущественно хрупких материалов;
- возможность копирования сложной формы по всей поверхности заготовки при достаточно простой кинематике — поступательном перемещении инструмента;

- возможность введения энергии большой мощности в рабочую зону, что обеспечивает высокую производительность обработки;
- осуществление обработки практически без силового воздействия инструмента на деталь, что позволяет выполнить инструмент из легкообрабатываемого материала, а также обрабатывать детали нежесткой конструкции, или нежестким инструментом;
- простота автоматизации оборудования и возможность многостаночного обслуживания.

Основной недостаток методов электротехнологии по сравнению с механической обработкой — высокая энергоемкость.

Методы электротехнологии целесообразно применять в следующих случаях:

- когда обрабатываемый материал плохо поддается механической обработке, например, при формообразовании жаропрочных, нержавеющей, магнитных, титановых и твердых сплавов, полупроводниковых материалов, ферритов, керамики и минералов;
- на операциях, выполнение которых традиционными методами вызывает значительные трудности, например, при изготовлении криволинейных каналов, соединительных каналов и отверстий в труднодоступных местах пневмо- и гидроаппаратуры, при изготовлении цельных роторов с лопатками;
- для изготовления деталей, не допускающих силового воздействия инструмента на заготовку, например, тонкостенных деталей приборов, деталей из хрупких материалов, а также для клеймения и маркирования режущего инструмента;
- для механизации и автоматизации таких операций, как удаление заусенцев, изготовление шаблонов, изготовление вырубных штампов;
- с целью значительного сокращения числа операций по сравнению с механической обработкой при изготовлении деталей сложной формы;
- для снижения затрат на инструменты, например, для изготовления отверстий малого диаметра, клеймения и маркирования деталей высокой твердости, изготовления сложных поверхностей [4].

## 2. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

### 2.1. Сущность и основные закономерности

Явление электрической эрозии, т.е. разрушение контактов под действием электрических разрядов, известно давно. В частности искровые и дуговые разряды возникают при разрыве или отключении электрических цепей. Электрическая эрозия — очень вредное явление в энергетике, сокращающее срок службы и надежность электрических устройств.

Советские ученые Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко впервые использовали эффект электрической эрозии для направленного удаления металла. С этой целью они поместили электроды (инструмент и заготовку) в

жидкий диэлектрик, который охлаждал образующиеся продукты электрической эрозии и не позволял им оседать на противоположный электрод. В качестве генератора импульсов они использовали батарею конденсаторов 2 (рис. 2.1), заряженных от источника постоянного тока [1].

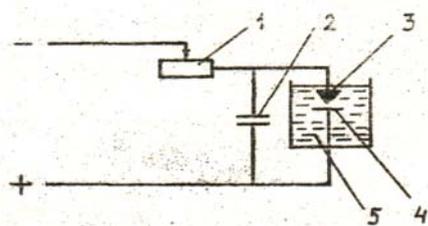


Рис. 2. 1

Время зарядки конденсаторов регулировалось реостатом 1. При перемещении электрода-инструмента 3 в направлении к заготовке 4 при определенном зазоре, называемом межэлектродным промежутком, возникали электрические разряды, а образующиеся продукты обработки попадали в диэлектрическую жидкость 5 и оседали на дно ванны. Таким образом, происходило копирование профиля электрода на заготовке.

Этот эффект в 1943 г. был признан изобретением, которое имело выдающееся значение, т.к. этим самым был создан совершенно новый метод формообразования поверхностей.

Первоначально для осуществления электроэрозионной обработки применялись исключительно искровые разряды, создаваемые конденсатором в так называемом RC-генераторе. Поэтому новый процесс называли *электроискровой обработкой*.

Позднее были разработаны специальные генераторы импульсов, благодаря которым обработку можно было производить не на коротких искровых импульсах, а на более длительных искродуговых и дугowych разрядах. Чтобы отличить новые условия процесса, его стали называть *электроимпульсной обработкой*.

В дальнейших исследованиях этих видов обработки был выявлен так называемый полярный эффект, при котором эрозия одного электрода, больше чем эрозия другого. Существенное влияние на полярный эффект имеет длительность электрического разряда. Так, при коротких импульсах тепловая энергия преимущественно выделяется на аноде, что естественно приводит к большей его эрозии. При увеличении длительности импульса наступает обратное изменение теплового потока и соответственно эрозии электродов, при которой больше изнашивается катод.

Поскольку электрод-инструмент должен подвергаться меньшей эрозии, чем обрабатываемая заготовка, то принята следующая полярность:

— при электроискровой обработке принимается прямая полярность, т.е. электрод — катод (–), заготовка — анод (+);

— при электроимпульсной обработке — обратная полярность (электрод — “+”, обрабатываемая заготовка — “–”) [1].

Явления, протекающие в результате электрических разрядов, рассмотрены в работах Б.Н. Золотых, А.Л. Лифшица, Ю.С. Волкова и др. Согласно выдвинутых ими гипотез процесс единичного электроэрозионного разряда включает следующие последовательно протекающие стадии, представленные на рис. 2.2 (см. с. 7) [6].

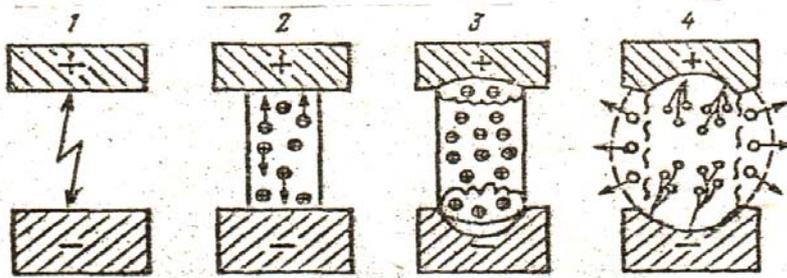


Рис. 2.2

*Стадия 1* — пробой межэлектродного промежутка, в процессе которого в диэлектрической среде образуется канал сплошной проводимости.

*Стадии 2 и 3*, на которых формируется канал разряда, представляющий собой быстро расширяющуюся зону сквозной проводимости, заполненную плазмой из электронов и ионов с очень высокой температурой.

Это приводит к частичному испарению, а также расплавлению поверхностей анода и катода, а за счет сжатия практически несжимаемой диэлектрической жидкости в канале создается высокое давление (до 20 МПа), а также газовый пузырь, расширяющийся с большой скоростью.

*Стадия 4.* В образовавшемся газовом пузыре давление намного превосходит атмосферное, что приводит к перегреву расплавленного металла выше его температуры плавления. После окончания разряда давление в газовом пузыре падает ниже атмосферного и происходит его схлопывание. Перегретый токопроводящий материал взрывообразно вскипает, что приводит к его выбросу с поверхностей электродов.

Разряд образует на поверхностях электродов лунки, которые увеличивают на локальном участке размер межэлектродного промежутка. Большое количество таких лунок, размеры которых определяются энергией и длительностью единичных разрядов, формирует геометрию межэлектродной полости.

После разряда в течение некоторого времени происходит остывание столба канала и деионизация вещества плазмы в межэлектродном промежутке. Электрическая прочность межэлектродного промежутка восстанавливается. Время деионизации жидкого диэлектрика составляет  $10^{-6} \dots 10^{-2}$  с. Оно зависит от энергии предшествующего разряда. Следующий разряд обычно возникает уже в новом месте, между двумя другими ближайшими точками электродов. Длительность интервалов между импульсами должна быть достаточной для удаления из зоны разряда продуктов эрозии, а также газового пузыря, являющегося главным препятствием для возникновения и повторения следующих разрядов. В связи с этим частота разрядов с возрастанием их энергии снижается.

Так происходит до тех пор, пока разряды не удалят с поверхности электродов все участки металла, которые находятся на расстоянии пробоя при величине приложенного напряжения. Когда расстояние между электродами превысит пробивное напряжение, для возобновления разрядов электроды должны быть сближены. Обычно электроды сближают в течение всего времени обработки так, чтобы электрические разряды не прекращались. Если поверхность одного электрода меньше, чем поверхность

другого, то под действием непрерывно повторяющихся разрядов происходит разрушение большего электрода на участке, воспроизводящем форму меньшего электрода.

Величина подводимой электрической энергии и частота электрических импульсов оказывают решающее влияние на развитие единичного электрического разряда. При подаче синусоидального импульса напряжения на электроды (рис. 2.3) на участке 0–1 напряжение увеличивается до  $U_{пр}$ , при котором нарушается диэлектрическая прочность промежутка. Среднее напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка, почти линейно зависит от величины этого промежутка и на чистовых режимах составляет 40...50, а для черновых — 70...80 вольт.

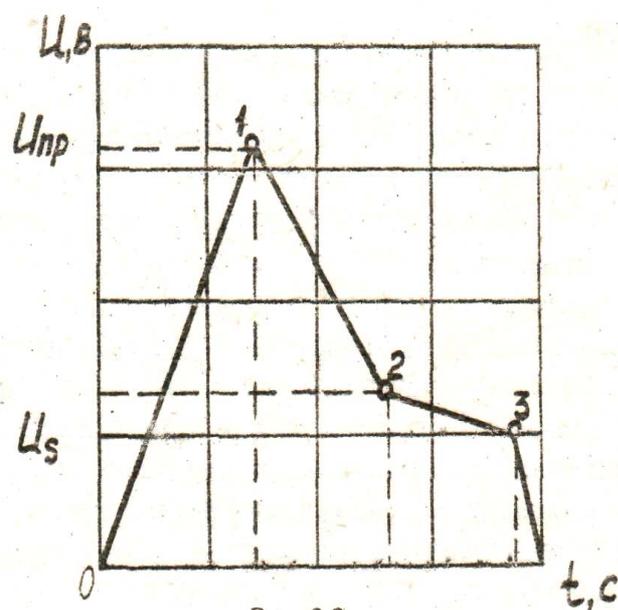


Рис. 2.3

Участок 1–2 соответствует искровой стадии разряда, для которой характерно быстрое снижение напряжения на промежутке до 25...35 В и столь же быстрое увеличение тока в цепи. Участок 2–3 соответствует дуговой стадии разряда, на которой незначительно снижаются напряжение и ток в цепи. При падении напряжения  $U_s$  ниже 15...20 В разряд прекращается. При обработке короткими импульсами высокой частоты дуговая стадия разряда может отсутствовать, и разряд прекращается сразу после искровой стадии. Количество удаляемого материала на дуговой стадии разряда и размеры образующихся лунок значительно больше, чем на искровой стадии [4].

При электроэрозионной обработке используются электрические импульсы различной формы, но одной полярности, называемые иногда униполярными импульсами.

Импульс характеризуется амплитудным значением или амплитудой напряжения  $U_m$  и тока  $I_m$  (рис. 2.4, см. с. 9). При электроэрозионной обработке амплитуда напряжения может изменяться от нескольких вольт до сотен вольт, а амплитуда тока от долей ампера до нескольких тысяч ампер.

Основными параметрами электрических импульсов, подаваемых к межэлектродному промежутку, являются их частота повторения, длительность, амплитуда и скважность, а также форма, определяющие максимальную мощность и энергию. Форма и параметры импульсов оказывают существенное влияние на износ электрода-инструмента, производительность и высотные параметры шероховатости обработанной поверхности.

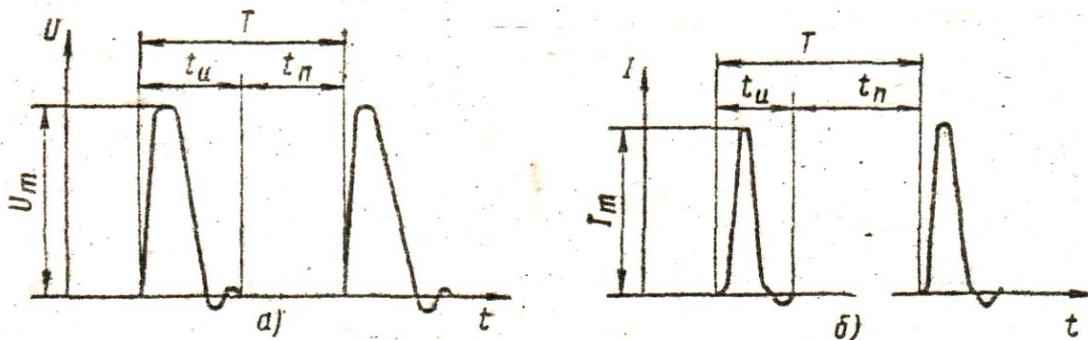


Рис. 2.4

Обозначим частоту повторения импульсов, т.е. их число в секунду, через  $f$ . Тогда « $T$ » будет являться периодом:

$$T = \frac{1}{f}$$

Он определяет промежуток времени, через который следует очередной импульс (рис. 2.4, а). Период  $T$  состоит из двух частей — длительности импульса  $t_n$  и интервала (паузы) между двумя смежными импульсами  $t_u$  (рис. 2.4, б).

Одной из характеристик электроэрозионного процесса является скважность импульсов  $q$ , которой показывают отношение периода  $T$  к длительности импульса  $t_n$ . В зависимости от режима обработки диапазон скважностей может колебаться в пределах от 1 до 30.

Форма импульсов может быть различной. Напряжение и ток могут изменяться по гармоническим кривым. График напряжения и тока может быть остроугольным, прямоугольным или пилообразным или другой, более сложной формы. Форма импульса зависит от выходных параметров установки, формирующей импульсы (генератора импульсов), а также от параметров электрической цепи, к которой подключены электроды.

## 2.2. Технологические показатели электроэрозионной обработки

Для осуществления процессов и операций электроэрозионной обработки (ЭЭО) существуют два основных типа оборудования:

— электроэрозионные копировально-прошивочные станки, на которых осуществляют прошивание различных отверстий, пазов, окон, а также объемное копирование профиля электродов при изготовлении разнообразной инструментальной оснастки;

— электроэрозионные вырезные станки, на которых непрофилированным электродом-инструментом в виде проволоки диаметром 0,03...0,3 мм, непрерывно перемещаемой через межэлектродный промежуток, вырезают в плоских заготовках фигуры любого требуемого профиля.

Для возможности оценивать эффективность указанного оборудования рассмотрим основные технологические показатели процессов ЭЭО [1].

### 2.2.1. Производительность

При объемном копировании производительность процесса электроэрозионной обработки оценивается отношением объема удаленного металла ко времени обработки и выражается в мм<sup>3</sup>/мин.

Если бы удалось вести процесс при постоянной энергии импульсов, то производительность можно было бы оценить как произведение энергии импульсов на их частоту. На практике условия протекания каждого отдельного импульса могут отличаться из-за различий в состоянии межэлектродного промежутка и размера зазора, несоответствия между числом импульсов, выработанных генератором и реализуемых в зазоре, а также по каким-либо другим причинам. При расчете производительности

$$Q = \psi a A_{\text{и}} f,$$

где  $A_{\text{и}}$  — энергия импульса, Дж.;

$\psi$  — коэффициент, учитывающий количество холостых импульсов:

$$\psi = f/f_{\text{г.и}} \text{ (здесь } f_{\text{г.и}} \text{ — частота импульсов, вырабатываемых генератором);}$$

$f$  — частота импульсов, вызывающих эрозию.

При малой частоте  $\psi \approx 0,85$ , при большой  $\psi \approx 0,75$ .

$a$  — объем металла, удаляемый одним или несколькими импульсами с суммарной энергией 1 джоуль.

Если частоту выразить через длительность импульса, то расчет производительности можно выразить:

$$f = \frac{1}{qt_{\text{и}}}, \quad Q = \frac{\psi a A_{\text{и}}}{qt_{\text{и}}},$$

где  $q$  — скважность;  $t_{\text{и}}$  — время импульса.

Обычно для черновых операций используют импульсы с энергией более 1 Дж, для чистовых — 0,1...1 Дж, для отделочных — менее 0,1 Дж.

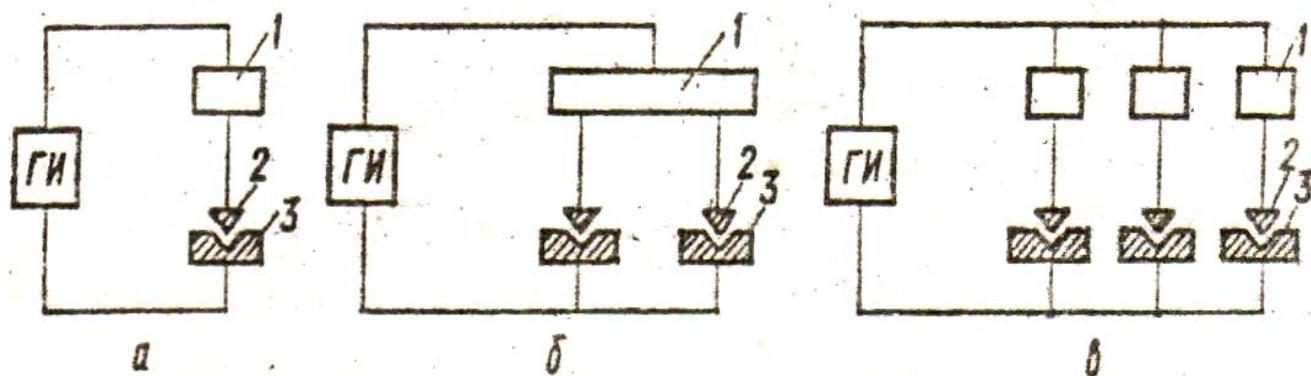
При малой площади обработки число участков, на которых возможен разряд, значительно меньше, чем число импульсов, поступающих от генератора, так как часть площади перекрыта газовыми пузырями от предшествующих разрядов. Время существования газового пузыря в 5...10 раз больше, чем длительность импульса. А разряд через газ возможен только при более высоком напряжении, поэтому часть импульсов генератора не вызывает эрозии. Снижается коэффициент  $\psi$ ,  $a$ , следовательно, и производительность  $Q$ . Если увеличивать площадь обрабатываемой поверхности, то скорость съема металла будет возрастать, но в дальнейшем произойдет ее снижение. Это объясняется тем, что с течением времени ухудшаются условия удаления продуктов обработки из межэлектродного промежутка. Все большее число импульсов генератора не будет вызывать эрозии из-за накопления газов и металлических частиц в пространстве между электродами.

Количество продуктов обработки зависит также от энергии импульсов, их числа и времени действия, т.е. от мощности, реализуемой в межэлектродном промежутке. При малой мощности количество расплавленного металла невелико, с ростом подводимой мощности оно возрастает, но при этом увеличивается и количество продуктов обработки, которые тормозят процесс съема металла. Для получения высокой производительности необходимо правильно выбрать сочетание площади обрабатываемой поверхности и мощности. Такой выбор выполняют с помощью пространственных диаграмм в координатах сила тока — площадь обработки — производительность. Глубина лунки, получаемой на заготовке после каждого импульса, при одинаковых условиях обработки зависит от свойств обрабатываемого металла (температуры плавления, температуропроводности и т.д.). Обрабатываемость оценивают отношением массы снятого исследуемого металла к массе металла, снятого с заготовки из стали 45 при одинаковых условиях обработки. Сталь 45 выбрана как наиболее широко применяемый конструкционный материал.

Вольфрам при прямой полярности имеет коэффициент обрабатываемости 0,7; молибден — 0,8; алюминий — 1,5; магний — 2,5. Обрабатываемость железа близка к единице. Чугун имеет низкую обрабатываемость из-за включений свободного графита. Жаропрочные сплавы имеют низкую температуропроводность и теплосодержание поэтому в расплавленном состоянии обрабатываются лучше стали 45.

Для повышения производительности на практике используют следующие решения:

- применяют прокачку жидкости через электрод для принудительного удаления продуктов электроэрозии через межэлектродный промежуток;
- наложение вибраций на электрод, что способствует разрушению образующихся при обработке шлаковых мостиков, а также лучшему удалению шлака;
- использование многоконтурной обработки при изготовлении полостей на крупногабаритных штампах, пресс-формах и т.д. Для этого электрод-инструмент разделяют на несколько изолированных друг от друга секций (рис. 2.5).



Под контуром понимают электрическую цепь питания с одним (рис. 2.5, а) или несколькими (рис. 2.5, б) электродами-инструментами, в которых можно поддерживать режим, отличный от режима других контуров. В контуре имеется сопротивление 1 для независимого регулирования режима в нем. Повышение производительности при многоконтурной обработке достигается за счет сокращения количества холостых импульсов.

При обработке непрофилированным электродом-проволокой под производительностью понимают отношение площади, прорезанной электродом, ко времени обработки. Производительность выражается в  $\text{мм}^2/\text{мин}$ . При таком выражении производительность практически не зависит от диаметра электрода-проволоки, поскольку с увеличением диаметра проволоки увеличивается и предельная мощность, которую можно подвести для формообразования. При использовании дистиллированной воды в качестве рабочей жидкости при обработке заготовок толщиной 20 мм на легких режимах, позволяющих получить шероховатость обработанных поверхностей  $R_a = 1,25 \dots 0,32$  мкм, производительность составляет:

- для твердых сплавов —  $6 \dots 12$   $\text{мм}^2/\text{мин}$ ;
- для сталей —  $5 \dots 8$   $\text{мм}^2/\text{мин}$ .

При обработке на грубых режимах производительность при обработке стали может достигать  $35$   $\text{мм}^2/\text{мин}$ , при обработке твердого сплава —  $18 \dots 20$   $\text{мм}^2/\text{мин}$ .

### 2.2.2. Точность

Под точностью обработки деталей понимается степень соответствия ее формы и размеров чертежу. Отклонения от формы и размеров называются погрешностью. Электроэрозионному процессу присущи те же систематические и случайные погрешности, что и механической обработке. Их природа и способы снижения рассматриваются в курсе “Технология машиностроения”. Так же как и при механической обработке, на размеры погрешностей оказывают влияние состояние технологической системы, погрешности установки, базирование инструмента, внутренние напряжения в материале заготовки, ее нагрев при обработке. В случае электроэрозионной обработки жесткость технологической системы не зависит от режима обработки, но на нее существенное влияние оказывает давление жидкости при прокачке рабочей среды.

При ЭЭО на точность изготовления деталей влияют:

- точность изготовления электрода-инструмента;
- износ электрода-инструмента вследствие эрозии;
- погрешности формы и размеров углубления на заготовке относительно электрода-инструмента.

В процессе обработки форма и размеры электрода-инструмента нарушаются из-за износа. Казалось бы, целесообразным выполнять его с широкими допусками. Однако окончательный профиль углубления формируется неизношенным участком электрода-инструмента, поэтому элек-

трод-инструмент изготавливают на 1...2 квалитета точнее, чем обрабатываемые детали. Допуски на размеры электрода--инструмента составляют обычно 0,015...0,1 мм, что соответствует требованиям к изготовлению металлорежущих инструментов.

Износ на различных участках инструмента различен. На рис. 2.6 показано изменение числа разрядов при прошивании в заготовке 1 отверстия сложной формы электродом-инструментом 2. Возможное число импульсов, реализуемых в промежутке, показано стрелками, число которых в местах сопряжения поверхностей иное, чем на прямолинейных участках.

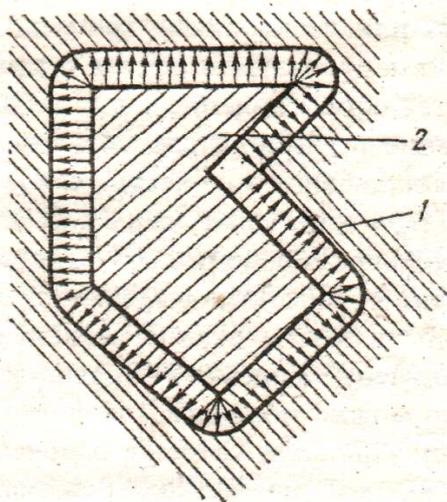


Рис. 2.6

Так, на участках электрода-инструмента, имеющих вогнутость, число разрядов меньше, следовательно, износ на них будет выражен слабее. Если учесть условия выноса продуктов обработки из промежутка, то различия в износе отдельных участков еще более возрастут.

На рис. 2.7 (см. с. 14) показан характер износа электрода-инструмента 1 при прошивании отверстия в заготовке 2. До вскрытия отверстия обработка велась концевым участком 3, который вследствие эрозии потерял свою первоначальную форму, показанную пунктирной линией.

Если прекратить прошивание сквозного отверстия по ходу процесса, то оно будет коническим. Для придания ему цилиндрической формы электрод-инструмент перемещают до тех пор, пока не прекратятся боковые разряды и не сформируется отверстие с диаметром  $d_d$ , большим, чем диаметр  $d_n$  электрода-инструмента, на двойной размер бокового зазора  $s_6$ .

Если необходимо обработать глухое углубление, то на конечной стадии обработки электрод-инструмент приходится заменять новым.

Следовательно, на точность электроэрозионной обработки большое влияние оказывает износ электрода-инструмента.

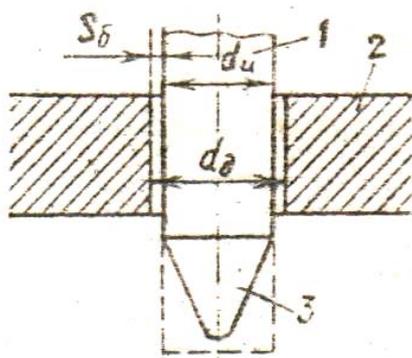


Рис. 2.7

Для большинства режимов обработки износ составляет:

— в случае схемы прошивания сталей на электроискровом режиме медными и латунными электродами — 30...95% от объема снятого с заготовки металла;

— при обработке на электроимпульсном режиме медно-графитовыми электродами-инструментами — 0,1...4,0%.

Для снижения влияния износа электрода-инструмента используют следующие мероприятия:

- изготавливают инструмент из материала, стойкого к эрозии, например из вольфрама, меднографита или коксографитовых композиций;
- используют так называемые безизносные схемы, при которых часть материала с заготовки или из рабочей среды осаждается в процессе ЭЭО на электроде-инструменте, компенсируя тем самым его износ;
- заменяют изношенные участки электрода-инструмента путем продольного перемещения, как например, при прошивании сквозных отверстий и обработке непрофилированным электродом, или заменяют весь инструмент;
- периодически производят правку и калибровку рабочей части электрода-инструмента.

Погрешности размеров и формы углубления в заготовках зависят в основном от нестабильности режима обработки, вызванной колебаниями напряжения в сети, изменениями скорости подачи, износом электрода-инструмента, ошибками системы программного управления, изменениями межэлектродного зазора.

Исследованиями установлено, что погрешность  $\delta_{\text{ээо}}$  при объемном копировании составляет:

$$\delta_{\text{ээо}} = \delta_{\text{и}} + \delta_{\text{спид}} + \sqrt{\delta_{\text{н}} + \delta_{\text{з}}},$$

где  $\delta_{\text{и}}$  — погрешность от износа электрода;

$\delta_{\text{спид}}$  — систематическая погрешность системы СПИД, обусловленная геометрической неточностью и температурными деформациями;

$\delta_{\text{н}}$  — случайная погрешность настройки при неточном расположении электрода относительно заготовки;

$\delta_{\text{з}}$  — случайная погрешность, вызываемая колебаниями межэлектродного зазора.

При вырезании по контуру непрофилированным электродом-инструментом (проволокой) постоянный по времени износ не влияет на точность. Однако за счет уменьшения диаметра электрода от эрозии металла уменьшается прочность проволоки, ее натяжение и способность сохранять прямолинейность при обработке. Все это определяет степень повторения на заготовке заданного контура, т.е. точность формы и размеров детали. Если непрофилированным электродом-инструментом изготавливают узкие пазы, то погрешность их размеров будет зависеть от износа проволочного электрода-инструмента. На рис. 2.8 (см. с. 15) показано влияние эрозии проволоки на ширину паза. Если бы электрод-инструмент не изнашивался, ширина паза превышала бы диаметр проволоки  $d_{\text{пр}}$  на двойной размер зазора  $s$ .

Фактически ширина паза  $b = a + 2s$ , где  $a$  — размер изношенного электрода-инструмента;  $s$  — боковой зазор.

Зазоры зависят от режима обработки, натяжения проволоки и меняются в довольно широких пределах: при обработке сталей  $s = 7...16$  мкм, при разрезании твердых сплавов  $s = 6...18$  мкм.

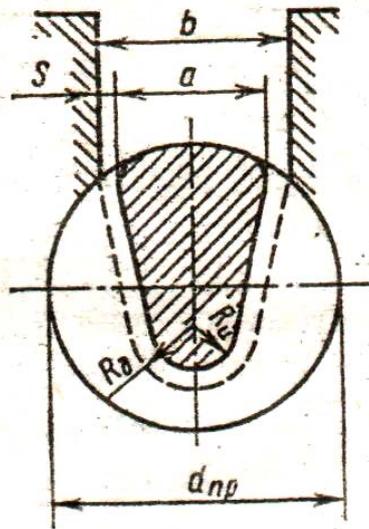


Рис. 2.8

Износ проволоки ведет к тому, что ширина паза по высоте заготовки будет различной, т.е. стенки паза имеют уклон. Этот уклон зависит от скорости движения проволоки, ее материала и диаметра, режимов обработки, толщины заготовки. Обычно уклон составляет  $1...2^\circ$ .

Износ проволоки определяет радиус скругления паза на детали  $R_d = R_{и} + s$ , где  $R_{и}$  — радиус скругления электрода-инструмента со стороны детали (рис. 2.8). Для латунной проволоки диаметром от 0,1 до 0,3 мм  $R_{д \min} = (0,2...0,35) d_{пр}$ . Это необходимо учитывать при изготовлении пазов с заданным скруглением стенок. При работе

по схемам разрезания и шлифования износ электрода-инструмента компенсируется его подачей и не оказывает заметного влияния на погрешности изготовления.

На современном уровне развития электроэрозионной обработки точность изготовления деталей на электроискровом режиме профильным электродом-инструментом достигает 6...7-го качества, непрофилированным — 5...6-го качества; в случае применения электроимпульсного режима точность изготовления соответствует 9...11-му качеству. Погрешности электроэрозионного легирования оценивают неравномерностью наносимого слоя, которая может достигать 20% его толщины.

### 2.2.3. Состояние и качество обработанной поверхности

После электроэрозионной обработки обработанная поверхность имеет специфическую шероховатость, которая образована большим количеством произвольно расположенных сферических лунок (рис. 2.9, см. с. 16). Образовавшиеся неровности, а также поверхностный слой металла  $H$  с измененным в результате теплового воздействия физико-химическим состоянием удаляют в дальнейшем слесарно-механическим способом. На представленном рисунке показано изменение диаметра лунок  $d_a$  и их глубины  $h_d$  по сравнению с теми же параметрами ( $d_1$  и  $h_1$ ) после единичного разряда. Эта разница будет зависеть от расстояния в между центрами соседних лунок.

Условия протекания разрядов на разных участках обрабатываемой поверхности различаются и реально размеры каждой лунки будут разными. Поэтому для расчетов берут средние размеры углублений, которые находят из статистических данных.



черновых режимах электрод вместе с орбитальной головкой выводят из обработанной полости в исходное положение. Задав требуемую величину эксцентриситета (радиус кругового движения) орбитальной головке, производят окончательную обработку на чистовых режимах.

— в случае обработки на электроэрозионном станке, оснащенный контурной системой ЧПУ, после чернового перехода, не выводя электрода, первоначально произвести доводку торцевой поверхности на чистовом режиме, а затем перейти на обработку боковых поверхностей на этом же режиме путем сообщения электроду орбитального движения по заданной программе с постепенным увеличением радиуса кругового движения.

## 2.3. Типовые технологические операции

### 2.3.1. Объемное копирование

Для выполнения данного вида операций обработка ведется по методу копирования профиля электрода при его поступательном перемещении на специальных электроэрозионных копировально-прошивочных станках. При этом обрабатываемый элемент на заготовке является по форме обратным отражением рабочей поверхности инструмента.

Все виды операций, выполняемых на электроэрозионных станках, осуществляются в следующей последовательности:

— заготовку устанавливают и закрепляют на столе станка, а электрод-инструмент в шпиндель станка, который имеет возможность перемещаться по трем координатам;

— выверяют положение электрода-инструмента относительно заготовки;

— рабочую зону заполняют диэлектрической жидкостью с таким расчетом, чтобы зона обработки оказалась ниже уровня жидкости на 30...100 мм в зависимости от режима обработки для исключения возможности ее воспламенения;

— набирают требуемый режим обработки, включают источник питания и осуществляют рабочий процесс.

Наиболее характерные и часто встречающиеся операции, выполняемые объемным копированием на электроэрозионных станках следующие: обработка объемных фасонных полостей и гравюр ковочных и вытяжных штампов, пресс-форм, литейных форм и т.д.

Схема электроэрозионного прошивания гравюры ковочного штампа показана на рис. 2.10 (см. с. 18). В связи с тем, что в процессе ЭЭО электродами с достаточной большой площадью образуется значительное количество продуктов эрозии в виде шлама, который должен быть удален из зоны обработки, осуществляют прокачку рабочей жидкости через электрод. Для этого в нем на расстоянии 30...40 мм друг от друга выполняют отверстия диаметром 3...4 мм.

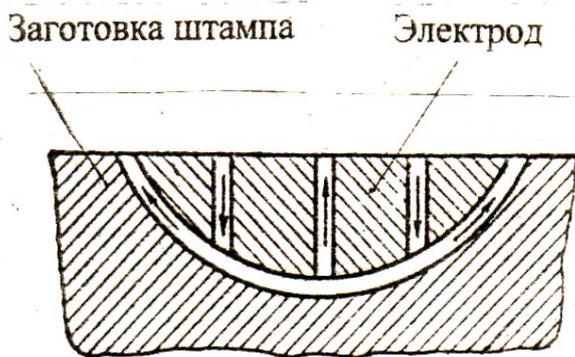


Рис. 2.10

С целью стабилизации межэлектродного промежутка рекомендуется, чтобы расстояния между отверстиями входа жидкости и выхода не отличались более чем в 2 раза. Кроме прокачки для предотвращения образования шлаковых мостиков и стабилизации процесса электроэрозионного прошивания электроду сообщают вибрацию с частотой 100 Гц.

Режим обработки выбирают, исходя из площади обработки, и изменяют его в зависимости от изменения этой площади в процессе обработки. После предварительной обработки электрод-инструмент заменяют новым (чистовым). Не доходя до получения окончательного вертикального размера на 0,4...0,5 мм, электрический режим “смягчают”. Окончательную обработку ведут на чистовых высокочастотных режимах. Эти режимы определяют по необходимой шероховатости поверхности. Иногда используют более удобный показатель интенсивности процесса — линейное перемещение электрода-инструмента. При правильном электрическом режиме для поверхности площадью 200...250 см<sup>2</sup> эта скорость лежит в пределах от 0,3 до 0,6 мм.

Для повышения производительности при обработке крупногабаритных штампов или пресс-форм используют вариант многоконтурной обработки. Для этого электрод-инструмент разделяют на отдельные секции, изолированные друг от друга, которые соединяются с источником питания по схеме, показанной на рис. 2.5 (см. с. 12).

Обработка крупных ковочных штампов — один из типичных случаев применения ЭЭО. При изготовлении штампа до 60% всей трудоемкости составляет обработка формообразующих полостей. При механической обработке эти полости получают преимущественно фрезерованием на фрезерных и копировально-фрезерных станках с последующей доводкой слесарно-ручным способом и дальнейшей термообработкой. Слесарно-механическая обработка формообразующих полостей ковочных штампов имеет следующие недостатки:

- сложность, дефицитность и высокая стоимость применяемого оборудования;
- большая трудоемкость фрезерных операций;
- низкое качество обработанной поверхности формообразующей полости после фрезерования;
- проведение закалки после фрезерования вызывает искажение размеров и формы полученных формообразующих полостей, что, в свою очередь, требует дополнительной обработки;

— образование трещин в штампах в процессе термообработки, для устранения которых требуется дополнительная слесарная обработка.

Применение ЭЭО вместо механической обработки почти полностью исключает перечисленные недостатки, дает возможность проводить обработку предварительно закаленных заготовок штампов. Наиболее широко ЭЭ обработка внедрена на предприятиях автотракторной промышленности при изготовлении штампов на шатуны и крышки шатунов, крестовины дифференциала, коленчатые валы и т.д. В инструментальном производстве ЭЭО изготавливают штампы на гаечные ключи, ножницы, плоскогубцы, ножи и т.д. Использование этого метода вместо фрезерования штампов значительно сокращает трудоемкость изготовления. Сравнительные данные по трудоемкости изготовления фрезерованием и ЭЭО приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Штамп	Трудоемкость, ч	
	Фрезерование	Электроимпульсная обработка
Шатуна двигателя	7	2,5
Крестовины карданного вала	6	1,5
Турбинной лопатки	9	3,5
Плоскогубцев	3	0,5
Ножниц	2	0,25

Электроэрозионный метод применяют также при изготовлении литейных форм и пресс-форм на пластмассовые и резиновые детали, а также при изготовлении рабочих колес турбин и компрессоров. При этом на электроимпульсную обработку изделие подается после закалки, вследствие чего устраняется искажение профиля в результате термообработки. Кроме того, после ЭЭО припуск равномернее, а высота микронеровностей меньше, чем после фрезерования. Этим сокращается объем слесарно-механических работ на 30...40% [12]. Рабочие колеса паровых и газовых турбин, а также некоторых насосов, работающих в очень тяжелых условиях, изготавливают из труднообрабатываемых материалов (коррозионностойких сталей, жаропрочных сплавов, тугоплавких материалов и т.п.). Особенно трудоемка операция механической обработки межлопаточных каналов аэродинамического профиля. Электроискровая обработка позволяет легко преодолеть эти трудности. Если лопатки установлены по периметру диска (или ротора), то для обработки его устанавливают на оправке делительного приспособления, фиксируя при обработке каждого канала и последовательно поворачивая для обработки последующих каналов. Фасонную поверхность получают копированием конфигурации электрода инструмента, который изготавливают в виде обратного отображения полости канала, но с меньшими размерами по нормали к точкам обрабатываемой поверхности. Обработку ведут электродами марок МПГ-6 или МПГ-7.

В оптимальном режиме скорость внедрения инструмента в обрабатываемый материал составляет 0,5...2 мм/мин. Обработку ведут последовательно на черновых и чистовых режимах, используя изношенный на чистовом режиме электрод-инструмент, который применялся до этого для черновой обработки.

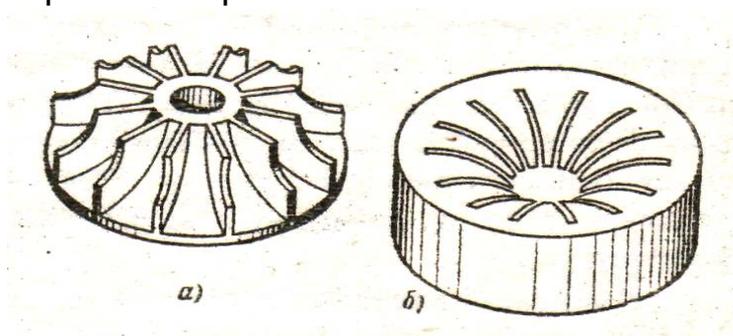


Рис. 2.11

Если лопатки расположены на торце (рис. 2.11, а), то ЭЭО производят инструментом (рис. 2.11, б), набранным из секций или изготовленным монолитным, формируя одновременно все каналы [3].

### 2.3.2. Прошивание щелей, пазов и отверстий

К таким операциям относят следующие виды работ:

- прошивание отверстий диаметром более 1 мм и глубиной не более  $12d$ ;
- прошивание отверстий диаметром более 1 мм и глубиной более  $12d$ ;
- прошивание отверстий диаметром менее 1 мм;
- прошивание пазов и отверстий с криволинейной осью;
- прошивание окон в матрицах вырубных штампов;
- удаление из деталей обломков метчиков, сверл и др. режущих инструментов;
- нарезание внутренних резьб.

Прошивание цилиндрических отверстий небольшой глубины чаще всего используется для изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов, например твердых, магнитных, жаропрочных сплавов, а также закаленных деталей, термический отпуск которых нецелесообразен [1].

Получить отверстия в постоянных магнитах механическим способом практически невозможно из-за высокой твердости (HRC 56...60) и хрупкости магнитных материалов. Отверстия диаметром 3...10 мм в магнитных материалах получают прошиванием на универсальных электроэрозионных станках. Средняя производительность при прошивании, например, отверстия диаметром 6,5 мм в сплаве ЮНДК35К5 составляет 20...25 мм<sup>3</sup>/мин (при подаче около 0,5 мм/мин). Высота микронеровностей обработанной поверхности  $R_a = 40 \div 20$  мкм, глубина измененного слоя 0,06...0,2 мм в зависимости от режима обработки.

Для получения отверстий небольшой точности применяют режим, обеспечивающий наибольшую производительность. Обработку выполняют

одним инструментом без его вращения. Прокачка рабочей жидкости обычно не используется.

Чтобы получить окончательный размер отверстия, электрод-инструмент 1 подают через кондукторную втулку 2 (рис. 2.12). Втулку выполняют из диэлектрика, а для снижения трения в нее запрессовывают кольца 3. Кольца могут быть изготовлены из электропроводных или электроизоляционных материалов. Втулка должна точно базироваться относительно заготовки 4. Для снижения погрешностей по сечениям электрод-инструмент вращают.

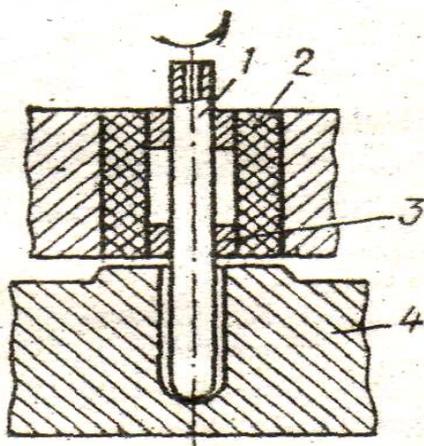


Рис. 2.12

Выбирают материал электрода-инструмента. Для закаленных сталей, жаропрочных, твердых и титановых сплавов можно использовать графитовые композиции. Для жаропрочных сплавов и сталей применяется также медь, а для титана — латунь. Однако электроды-инструменты диаметром до 4...5 мм из графитовых композиций употребляют редко из-за их хрупкости и малой прочности. Электроды-инструменты делают обычно цельными без изменения размера по длине.

При прошивании глубоких цилиндрических отверстий основная задача — это поддержание процесса и его интенсификация при значительном внедрении электрода-инструмента в заготовку, когда условия эвакуации продуктов обработки затруднены. Кроме того, скорость внедрения электрода-инструмента резко снижается из-за его вибрации, что вызывает пропуски разрядов и нестабильность процесса.

По данным чертежа устанавливают возможность получения требуемой точности и качества поверхности отверстия, делают сравнительные анализы времени для различных вариантов изготовления детали (с применением электроэрозионной и (или) механической обработки). Например, чтобы получить в жаропрочных сплавах отверстия по 6...8-му качеству точности с отношением длины к диаметру  $L/d = 20...25$ , целесообразно выполнить электроэрозионное прошивание, а затем развертывание механическим инструментом. При таком сочетании снижаются требования к электроду-инструменту, приспособлениям, можно одновременно обрабатывать сразу несколько отверстий [1].

При большой глубине отверстия ( $L/d > 25$ ) приходится выполнять их за несколько ходов, увеличивая диаметр электрода-инструмента. Во всех случаях необходима прокачка или отсос рабочей жидкости. Для глубоких отверстий нужно использовать станки с автоматическим выводом электрода-инструмента (релаксацией) из отверстия для очистки его от продуктов обработки.

Конструкция электрода-инструмента зависит от размеров отверстия и их точности, от качества поверхности. Для отверстий с отношением длины к диаметру  $L/d \leq 20$  ( $d \leq 5$  мм) можно использовать сплошной стержень, однако по мере углубления производительность обработки снижается до 10...15% от первоначальной. Необходимость периодического выведения стержня из отверстия еще больше увеличивает время прошивания, а при  $L/d > 20$  делает операцию экономически невыгодной. Использование сплошного электрода-инструмента повышает стабильность процесса, так как обеспечивается большая жесткость стержня и не образуется керн на заготовке.

При  $L/d > 20$  приходится применять электроды-инструменты в виде трубки из меди, латуни, графитовых материалов. Эта конструкция имеет меньшую жесткость, внутри трубки образуется керн, что нарушает стабильность процесса. Зато наличие отверстия позволяет проще организовать прокачку рабочей жидкости или ее отсос, сократить время обработки за счет устранения периодического выведения инструмента из углубления. Таким электродом-инструментом удается прошивать отверстия с  $L/d = 40$ , причем с увеличением диаметра это соотношение растет.

Для получения отверстий с  $L/d > 40$  требуется удалить керн, остающийся на заготовке внутри трубчатого электрода-инструмента. Для этого используют трубки 1, внутрь которых вставлены детали 2 с нарезанным спиральным каналом (см. с. 23, рис. 2.13, а). Рабочая жидкость подводится через канал.

Вращение электрода-инструмента не обязательно. Вместо нарезной детали можно вставлять в трубку пластинку (рис. 2.13, б) или квадратный стержень (рис. 2.13, в) электрод-инструмент, чтобы внутренняя пластина полностью разрушала образующийся керн на заготовке. Рекомендуемая частота вращения электрода —  $100 \text{ мин}^{-1}$ . Производительность прошивки по такому варианту практически остается неизменной при получении отверстий с соотношением  $L/d = 90$  [3].

Отверстия диаметром менее 1 мм выполняют в сетках, распылителях, форсунках. При диаметре  $d < 0,6...0,7$  мм используют цельные электроды из латунной или вольфрамовой проволоки 1 (рис. 2.14, см. с. 23).

Их подают через кондукторные втулки 4 из рубина или других твердых диэлектриков. Проволока к заготовке 5 перемещается подающими роликами 3. Ролики 2 служат для правки электрода-инструмента. Кроме того, перед обработкой проволоку правят, растягивая ее на специальном приспособлении. Проволоке сообщают вибрацию вдоль оси, за счет чего получают возможность стабильно прошивать отверстия на большую глубину (до  $L/d = 10...15$ ).

Использование ЭЭО для получения отверстий диаметром 0,15...0,2 мм в распылителях топливной аппаратуры снижает время получения одного отверстия в 4 раза и исключает поломку сверл.

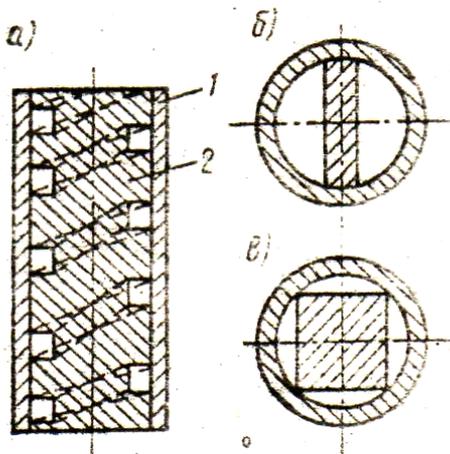


Рис. 2.13

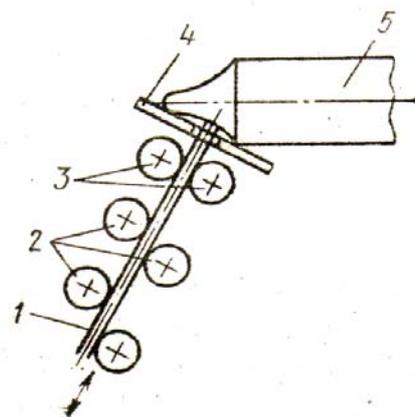


Рис. 2.14

Для отверстий диаметром  $d < 0,1$  мм в качестве электрода-инструмента применяют вольфрамовую проволоку, покрытую слоем меди. Такое покрытие повышает жесткость электрода-инструмента, облегчает подвод тока. Слой меди на заходной части электрода-инструмента стравливают на конус. Для этого его помещают в ванну с травящим раствором и вынимают с постоянной скоростью. За счет большего времени пребывания в ванне конца проволоки образуется конус, длина которого не должна превышать 5...6 диаметров. Обработка отверстий малого диаметра выполняется по следующей технологической схеме:

- электрод-инструмент устанавливают в электрододержатель так, чтобы его заходная часть была направлена в сторону заготовки; контролируют выход проволоки;
- выверяют точность установки электрода-инструмента;
- устанавливают на станок приспособление с кондукторной втулкой;
- выставляют на станке режимы обработки. Энергия импульса не должна превышать 12 мкДж. Если толщина обрабатываемой заготовки меньше 1 мм, то операцию выполняют за один рабочий ход на чистовых режимах, при большей толщине необходимо использовать два рабочих хода — черновой и чистовой. Износ электрода-инструмента достигает 60...70% от объема снятого металла;
- устанавливают заготовку;
- включают вибрацию проволоки вдоль оси;
- обрабатывают отверстие, получая в заготовке заходный конус (см. с. 24, рис. 2.15, а);
- стравливают электрохимическим способом конец электрода до проволоки на длину  $h = (2...2,5)h_1$ , где  $h_1$  — длина непрошеного участка заготовки (рис. 2.15, б);
- прошивают отверстие на полную глубину и калибруют его участком проволоки, не имеющим покрытия.

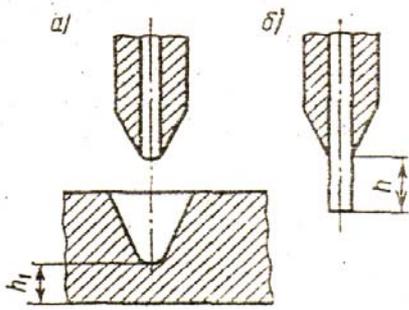


Рис. 2.15

Выходной участок отверстия имеет на входе фаску или конус. Высоту и угол раскрытия конуса регулируют изменением угла конуса на электрод-инструменте и глубиной прошивания заходного участка. Операции прошивания мелких отверстий обычно выполняют на автоматических станках одновременно несколькими электродами-инструментами. Погрешности формы таких отверстий не превышают нескольких микрометров, шероховатость

поверхностей для отверстий диаметром до 0,1 мм соответствует  $R_a = 0,16 \dots 0,32$  мкм, при больших диаметрах —  $R_z = 10 \dots 30$  мкм. Погрешность межосевого расстояния не превышает 5 мкм. Время обработки отверстия диаметром  $d = 0,02 \dots 0,04$  мм составляет около 120 с, что в 3...6 раз меньше, чем при сверлении.

За счет уменьшения усилий, действующих на электрод-инструмент, устраняется искривление осей отверстий, что позволяет снизить брак при обработке деталей, который при сверлении достигает 30...40%.

Практическое отсутствие усилий при электроэрозионном прошивании отверстий позволяет сравнительно несложно получать отверстия с криволинейной осью и внутренние соединительные отверстия в деталях пневмо- и гидроаппаратуры. На рис. 2.16 приведена схема прошивания криволинейного отверстия. Для выполнения этой операции шпиндель станка через рычаг 1 вращающийся вокруг оси 2 связан с криволинейным электродом-инструментом 3, который при повороте внедряется в заготовку 4, образуя в ней криволинейное отверстие. Пример образования внутреннего соединительного канала показан на рис. 2.17.

Электроэрозионным способом прошивают щели шириной 0,4...0,8 мм, глубиной до 20 мм или щели шириной 2,5...10 мм, глубиной до 100 мм. Для обеспечения удаления продуктов эрозии из электродного промежутка электрод-инструмент делают Т-образной формы или уменьшают толщину хвостовой части по сравнению с рабочей частью на несколько десятых долей миллиметра. Скорость прошивания щелей составляет 0,5...0,8 мм/мин, шероховатость обработанной поверхности до  $R_a = 2,5$  мкм [3].

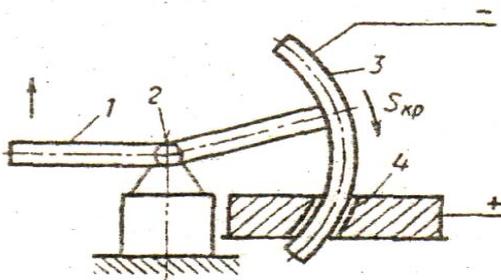


Рис. 2.16

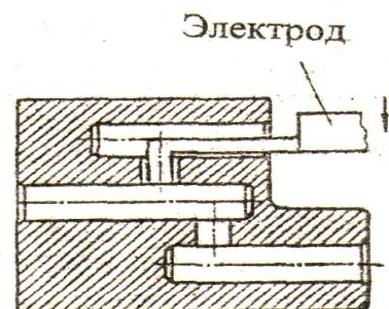


Рис. 2.17

Электроэрозионный метод позволяет обрабатывать элементы вырубных штампов из закаленных заготовок. Особенности прошивания отверстий в штампах является необходимость точного сопряжения контура матрицы и пуансона, а также уменьшение влияния обратной конусности. Уменьшение конусности прошиваемого отверстия со стороны рубящей кромки матрицы достигается применением многоступенчатых электродов-инструментов, отсосом рабочей жидкости, смещением инструмента в сторону рабочей поверхности окна или приданием инструменту орбитального движения (рис. 2.18). При этом методе обработки межэлектродный зазор увеличивается на величину  $2r$ , благодаря чему улучшаются условия удаления из зазора продуктов эрозии. Обработка поверхности заготовки производится различными участками электрода-инструмента, благодаря чему точность и качество обработанной поверхности повышаются. Контур обработанного отверстия является эквидистантой по отношению к кривой, по которой перемещается центр планетарного движения электрода-инструмента. Существующее оборудование позволяет получить зазор  $0,03...0,08$  мм в сопряжении пуансона и матрицы. На прецизионных станках возможно обеспечение зазора  $0,01...0,02$  мм. Шероховатость рабочей поверхности  $R_a = 1,25 \div 2,5$  мкм.

Для обеспечения более точного совпадения сложнофасонных профилей пуансона и матрицы применяют следующий технологический прием. Электрод-инструмент представляет собой пластинку толщиной  $3...5$  мм (рис. 2.19, б), с его помощью из твердосплавной заготовки изготавливают пуансон (рис. 2.19, в). Затем с помощью этой же пластины делают пуансон-электрод, который используют для изготовления матрицы (рис. 2.19, а). Таким образом, в качестве исходного электрода-инструмента для изготовления пуансона и матрицы служат один и тот же инструмент, поэтому ошибки, которые были заложены в нем при изготовлении, полностью переносятся на промежуточный электрод-инструмент и матрицу. Точность сопряжения деталей повышается. Для обеспечения минимального зазора между пуансоном и матрицей пуансон можно делать более высоким, чем это требуется, а затем часть его снять [3].

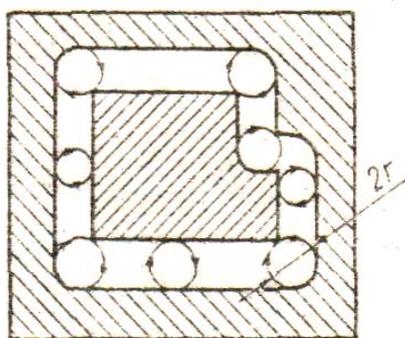


Рис. 2.18

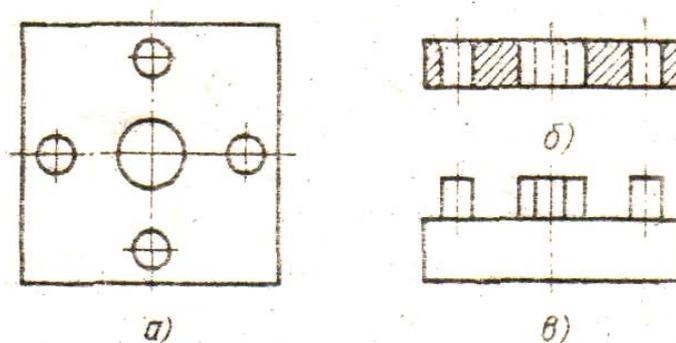


Рис. 2.19

Для удаления обломков режущих инструментов используют схему прошивания электродом-инструментом из меди, латуни, алюминия или его сплавов. В этом случае режимы обработки не рассчитываются, а берутся их фиксированные значения, указанные на станках.

Рассчитывают площадь сечения электрода. Его диаметр  $d_1$  (рис. 2.20) должен быть не меньше диаметра окружности, касательной к профилю метчика, сверла или другого инструмента. Для метчиков  $d_1$  принимают равным половине наружного диаметра  $D$ ; для сверл — не менее размера сердцевины (обычно в пределах  $1/4$  диаметра отверстия). Длину электрода-инструмента берут как сумму длин участка закрепления его в электродержателе и рабочей части, равной длине обрабатываемого участка и участка, разрушающегося в процессе эрозии. Нанесение диэлектрических покрытий для рассматриваемой операции нецелесообразно. Каких-либо кондукторных втулок и приспособлений здесь не требуется.

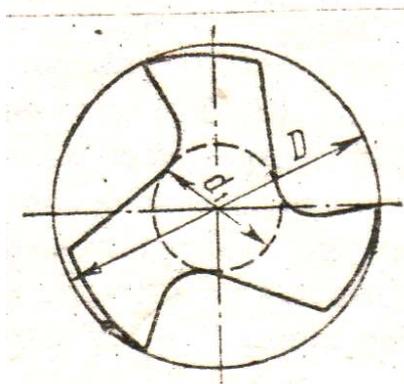


Рис. 2.20

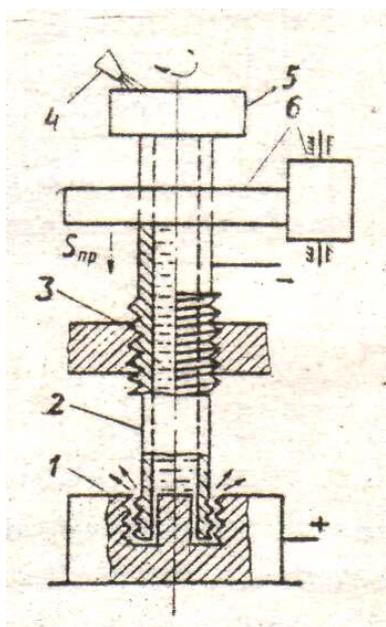


Рис. 2.21

После прошивания отверстия оставшиеся, не связанные между собой части метчиков или сверл легко удаляются из детали. Если удаляют обломившуюся часть шпильки или болта из резьбового отверстия, то в ней прошивают квадратное или шестиугольное углубление. За счет износа электрода-инструмента оно будет иметь угол уклона боковых стенок в пределах  $2...6^\circ$ . В полученное углубление вставляют специальный ключ с рабочей частью, обратной форме углубления, и вывертывают обломок, восстанавливая деталь.

Электроэрозионный способ удаления обломков инструмента и крепежа позволяет устранить брак в работе на заключительных операциях технологического процесса, исключить необходимость отжига, который применяют для снижения твердости обломка инструмента.

Нарезание резьбы. Электроэрозионное нарезание резьб может быть выполнено по методу копирования, по схемам, аналогичным механической обработке резьб [3].

Схема образования внутренней резьбы методом копирования показана на рис. 2.21. Электроду-инструменту придана форма пустотелого винта 2. Этот винт проходит через кондукторную гайку 3 и, получая вращение от сменных шестерен 6, образует резьбу в заготовке 1 при подаче  $S_{пр}$  в сторону заготовки. Диаметр резьбы кондукторной гайки и электрода-инструмента должен быть выполнен с учетом величины

межэлектродного зазора и износа электрода-инструмента. Для нарезания некрупных резьб (диаметром 5...10 мм при глубине обработки 5...10 мм в деталях из твердого сплава и обработке на средних режимах) диаметр резьбы электрода-инструмента делают на 0,05...0,06 мм меньше номинальной резьбы, получаемой в заготовке. Электроискровую обработку ведут как с нагнетанием жидкости под давлением, так и при свободной подаче жидкости в межэлектродный зазор (из насадки 4 в воронку 5, укрепленную на верхней части электрода инструмента). Резьбу М8 в твердосплавной пластине толщиной 15 мм можно получить за 20 мин при шероховатости  $R_a = 1,25$  мкм.

### 2.3.3. Вырезание непрофилированным электродом-проволокой

Метод электроэрозионного объемного копирования имеет существенный недостаток, заключающийся в необходимости изготовления сложных фасонных электродов инструментов. Трудоемкость изготовления электродов часто бывает очень высокой. Износ электрода-инструмента напрямую отражается на точности изготовления детали, поэтому одним электродом-инструментом удается изготовить не более 5...10 деталей. Электроэрозионный метод обработки непрофилированным электродом выгодно отличается от метода копирования тем, что здесь инструментом является тонкая проволока из латуни, меди или вольфрама диаметром от нескольких микрометров до 0,5 мм, включаемая в электрическую схему катодом. Схема обработки показана на рис. 2.22.

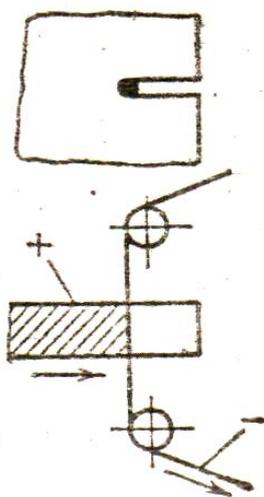


Рис. 2.22

Для уменьшения влияния износа проволоки на точность обработки проволока непрерывно перематывается с катушки на катушку, что позволяет участвовать в работе все новым ее элементам. При перематке проволоки осуществляется необходимый натяг; возле обрабатываемой заготовки установлены ролики, ориентирующие проволоку относительно обрабатываемого элемента заготовки.

Обработку непрофилированным электродом применяют при прецизионном резании заготовок, прорезании точных щелей, резании полупроводниковых материалов типа кремния, индия и т.п. (время вырезки пластины  $3,5 \times 7,0 \times 0,35$  мм из полупроводникового материала составляет 5 мин; параллельность граней пластины в пределах 0,005 мм, шероховатость поверхности  $R_a = 1,25$  мкм; отклонение размеров 0,005 мм); при криволинейном резании заготовок из твердого сплава, магнитных материалов, вольфрама и т.д.; при изготовлении пуансонов и матриц гибочных и вырубных штампов, рабочей части фасонных призматических резцов, вытяжных и высадочных матриц и т.д. (точность 0,005 мм, шероховатость обработанной поверхности до  $R_a = 0,63$  мкм); при снятии больших припус-

ков с заготовок из специальных материалов, при обработке цилиндрических, конических наружных и внутренних поверхностей [3].

Используя различные копировальные устройства, этим методом производят обработку сложных контуров. Непрофилированным электродом ведут обработку сквозных фигур с прямолинейной образующей; изготовление закрытых полостей типа пресс-форм и ковочных штампов здесь не представляется возможным.

К основным достоинствам электроэрозионной обработки проволочным электродом-инструментом относятся высокая точность и возможность широкой автоматизации процесса обработки. Современные станки для обработки проволочным электродом, как правило, снабжены системой числового программного управления. Одним из вариантов автоматизации станков, применявшихся в 1960-80 гг., является оснащение их фотокопировальной головкой для вырезания детали непосредственно по чертежу. Схема установки для вырезаний по фотокопиру показана на рис. 2.23.

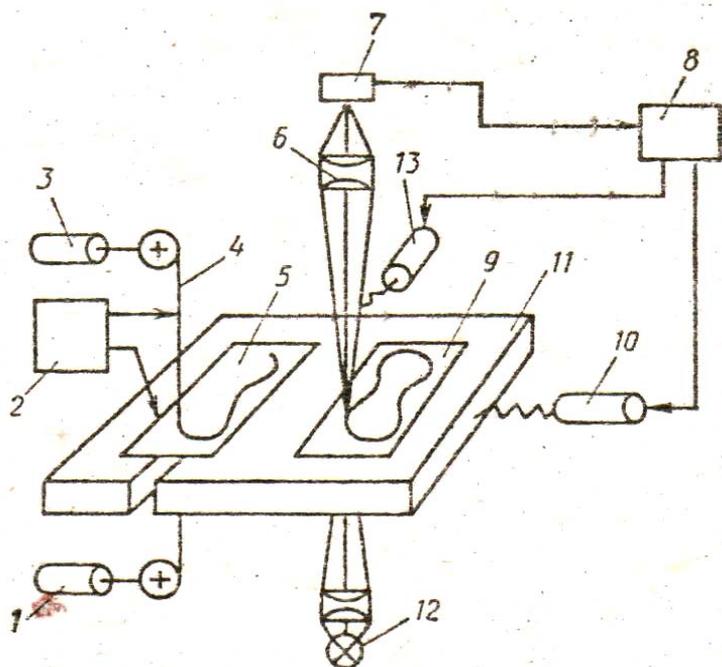


Рис. 2.23

Координатный стол 11 совмещает в себе жестко связанные рабочий столик с заготовкой 5 и столик 9 фотокопировальной системы. Стол приводится в движение в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью двигателей 10 и 13. Освещенный источником света 12 копир проектируется через оптическую систему 6 на фотодатчик 7, преобразующий через оптическую систему 6 на фотодатчик 7, преобразующий положение линии копирования в электрический сигнал, действующий через электронное следящее устройство 8 на электродвигатели подачи так, что копир своим краем непрерывно перемещается перед объективом. Эквидистантно обходу копира относительно проволоки-инструмента перемещается рабочий столик с укрепленной на нем заготовкой. Для обеспечения электроэрозионного процесса к заготовке и электроду-проволоке подводят ток от специального генератора импульсов 2. Проволочный электрод 4 непрерывно перематывается с подающей катушки на приемную электродвигателем перемотки 3.

Электродвигатель 1, включенный в заторможенном режиме, создает натяжение проволоки. Рабочей жидкостью служат керосин или вода (про-

мышленная или дистиллированная). Применение в качестве рабочей жидкости деионизированной воды увеличивает производительность.

В зависимости от назначения и вида обрабатываемой заготовки при обработке непрофилированным электродом используют три режима: мягкий, средний и грубый. *Мягкий режим* применяют для миниатюрных и сложных деталей, не требующих дополнительной обработки (для одновременной обработки сочленяющихся деталей типа пуансона и матрицы, для изготовления очень узких пазов и щелей). Обработку ведут вольфрамовыми проволоками диаметром 5...30 мкм; получаемая шероховатость обработанной поверхности  $R_a = 1,25 \div 0,63$  мкм. *Средний режим* применяют при обработке сочленяющихся деталей, для резки, получения пазов и щелей. Работу производят медными проволоками диаметром 0,1...0,2 мм. Шероховатость обработанных поверхностей  $R_a = 1,25$  мкм. *Грубый режим* применяют при грубой и быстрой обработке заготовок, требующих доводки, для отрезки заготовок, вырезки шаблонов и т.д. Работу производят медными или латунными проволоками диаметром более 0,2 мм. На рис. 2.24 показана схема снятия припуска с заготовки непрофилированным электродом [1].

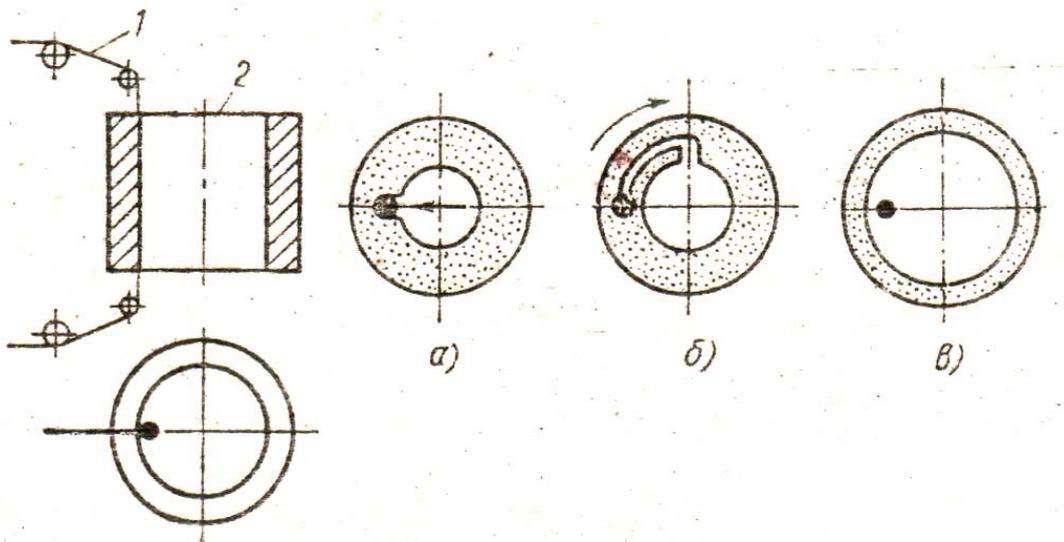


Рис. 2.24

Основные требования к электроду-проволоке:

- малое электрическое сопротивление;
- высокая прочность на разрыв;
- невысокая стоимость и недефицитность.

В производстве применяется медная, латунная и вольфрамовая проволока. Медная проволока отвечает первому и третьему требованиям, но ее низкая прочность на разрыв не позволяет работать в интервале оптимальной производительности по натяжению при наименьшей скорости перемотки. Вольфрамовая проволока имеет высокую прочность на разрыв, но дефицитна и обладает большим удельным сопротивлением, что сни-

жает производительность. Ее применяют при прорезке узких пазов (менее 0,1 мм). Латунная проволока по сравнению с медной проволокой имеет большее удельное сопротивление, что компенсируется ее хорошими эксплуатационными качествами (второе и третье требование).

Под действием электрических импульсов проволока-катод в процессе обработки изнашивается. Величина износа зависит от режима обработки, толщины заготовки и скорости перемотки. Скорость перемотки находится в пределах от нескольких миллиметров в секунду до нескольких десятков миллиметров в секунду. Электрод-проволока имеет одноразовое использование, так как после прохождения через зону обработки он становится непригодным для повторного использования (независимо от степени износа).

Влияние эрозии особенно резко проявляется при применении проволоки малого диаметра, так как при этом величина эрозии от единичного разряда соизмерима с диаметром проволоки.

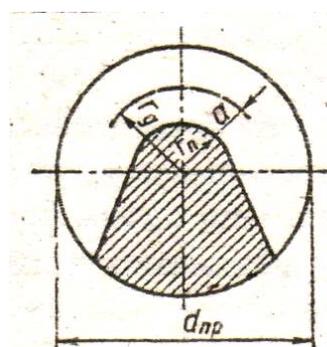


Рис. 2.25

На рис. 2.25 показано сечение проволоки-электрода после рабочего прохода. Размеры проволоки, участвующей в процессе обработки, существенно изменяются. Представляет интерес минимальный радиус  $r_d$  скругления внутренних углов, который может быть получен в детали. Этот радиус должен быть равен сумме радиуса  $r_n$  рабочей части проволоки и межэлектродного зазора «а». На практике получены следующие данные:

$$d_{пр} = 0,3 \text{ мм}, r_d = 0,065 \text{ мм};$$

$$d_{пр} = 0,2 \text{ мм}, r_d = 0,050 \text{ мм};$$

$$d_{пр} = 0,1 \text{ мм}, r_d = 0,040 \text{ мм},$$

где  $d_{пр}$  — диаметр проволоки.

Весьма эффективно данный вариант электроэрозионной обработки используется при изготовлении пуансонов и матриц вырубных штампов. Наиболее удачно это проявляется при замене стальных на твердосплавные пуансоны и матрицы. Стойкость твердосплавных вырубных штампов увеличивается от 20 до 50 раз по сравнению со стальными штампами, а общие расходы на эксплуатацию штампов при этом снижаются в 2...2,5 раза.

В прежних конструкциях станков основным методом получения точного и сложного профиля в вырезаемых заготовках использовался метод копирования, при котором на заготовку наклеивался копир в форме листового стального шаблона, идентичного вырезаемому профилю. В современных конструкциях станков, оснащенных программной системой управления, вырезание сложнопрофильных пуансонов и матриц значительно упростилось и удешевило сам процесс их изготовления.

Особый интерес представляет применение данного метода для изготовления вытяжных фильер и матриц, а также зажимных цанг для закрепления заготовок малого диаметра (0,5...3 мм). Опыт показывает, что для большинства цанг с диаметром рабочей части до 1,5 мм, фильер и матриц с поперечными размерами отверстий до 5 мм экономически выгодно применять твердые сплавы. Использование твердых сплавов для рабочих частей цанг, фильер, матриц существенно влияет на конструкцию самих деталей. Их делают сборными, содержащими твердосплавные вставки, закрепленные в стальном корпусе. Вставки могут быть закреплены в корпусе с помощью пайки. После этого в корпусе цанги необходимо прорезать фрезой радиальные пазы. Для составления операционной карты электроэрозионного вырезания рабочего контура следует рассчитать режим обработки. Рабочие поверхности цанг, фильер, матриц могут быть достаточно просто обработаны до наружной шероховатости без потери точности. Поэтому вырезание можно выполнять на высокопроизводительных режимах. В качестве критерия для расчета следует принять отсутствие микротрещин.

Диаметр проволоки выбирают, исходя из условия изготовления округлений минимального радиуса, который может быть не менее 1,5 диаметров проволоки.

Расчет и изготовление системы регулирования перемещения проволоки по вырезаемому контуру выполняют так же, как и для вырубных штампов.

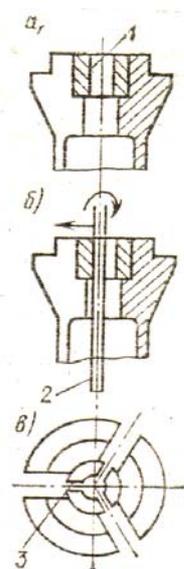


Рис. 2.26

Для цанг с диаметром рабочего отверстия более 1 мм:

— прошивают центральное технологическое отверстие 1 (рис. 2.26, а) — диаметр отверстия должен быть больше диаметра непрофилированного электрода;

— через отверстие пропускают проволоку 2 (рис. 2.26, б) и перемещают ее в радиальном направлении до касания с образующей отверстия. С помощью специального приспособления цангу вращают, а проволоку подают по радиусу отверстия, выполняя электроэрозионное шлифование до нужного размера;

— останавливают вращение цанги, включают движение подачи детали вдоль оси паза 3 (рис. 2.26, в). Затем при выключенном напряжении возвращают проволоку в центр отверстия, поворачивают цангу на  $120^\circ$  и прорезают следующий паз. Аналогично получают третий паз.

При использовании такого технологического процесса достигается высокий допуск соосности оси отверстия и посадочного диаметра, по которому цанга устанавливается в станок, устраняются биения заготовки при ее закреплении в цанге. Узкие пазы, получаемые проволочным электродом-инструментом, и их точное радиальное расположение позволяют

обеспечить положение заготовки по центру цанги и площадь контакта, гарантирующую надежный зажим. Цанги, полученные с применением непрофилированного электрода, обеспечивают точность обработки деталей по 6...8-му качеству [1].

#### 2.3.4. Электроискровое легирование

Электроискровое легирование позволяет нанести прочно сцепленный с легируемой поверхностью слой покрытия, у которого в результате диффузии элементов отсутствует граница раздела между нанесенным материалом и материалом основы.

В основе процесса электроискрового легирования используют явление электрической эрозии в газовой среде (в отличие от электроэрозионной обработки, которая осуществляется в жидкой среде).

Схема установки для электроискрового легирования представлена на рис. 2.27. Генератор униполярных импульсов 1 типа RC подключается к электродам, причем катодом служит легируемая поверхность детали 2, а анодом — заостренный легирующий электрод 3 [4]. В зависимости от параметров искрового разряда количество материала, выброшенного из анода и катода, может изменяться. При легировании обеспечивают условия, при которых выброс происходит преимущественно из анода. При каждом разряде с анода удаляется весьма малая частичка материала, которая или является отходом (если процесс протекает в жидкой среде как при электроэрозионной обработке) или достигает поверхности катода и осаждается на ней. Такой эффект процесса электрической эрозии, осаждение на катоде выброшенных из анода частиц, используется при электроискровом легировании металлических поверхностей.

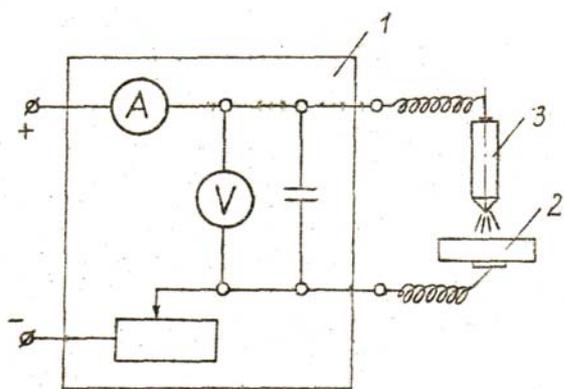


Рис. 27

При прохождении между электродами одиночного электрического разряда на поверхности катода образуется лунка с краями, несколько приподнятыми над исходной поверхностью металла, что имеет место в результате деформации металла, расплавившегося в месте прохождения разряда. Материал, перенесенный с анода, располагается на вогнутой поверхности лунки. Размер лунки и качество перенесенного материала обусловлены энергией разряда.

При перемещении анода легируемая поверхность покрывается лунками, поверхности которых имеют в своем составе материал анода. В дальнейшем последующие разряды проходят через края лунок (наиболее выступающую часть поверхности). Металл, переносимый с анода “прилипает” (сплавляется, смешивается) к поверхности катода и образует слой

покрытия. Материал в парообразном и жидкокапельном состояниях, выброшенный из анода в виде расширяющегося пучка, попадает в межэлектродное пространство, разогретое прошедшим электрическим импульсом до температуры, при которой возможно существование вещества в ионизированном состоянии. Эти частицы ударяются о поверхность катода, также локально разогретую электрическим разрядом, вступают с ней во взаимодействие, образуя сплавы, твердые растворы или механическую смесь. Эти микрометаллургические процессы протекают в отрезке времени, определяемые долями секунды, поэтому состав слоя и его физико-механические свойства часто существенно отличаются от свойств легирующего и легируемого материалов.

Качество материала, осаждаемого на легируемой поверхности, зависит от удельной продолжительности процесса, то есть от времени легирования единицы поверхности. На рис. 2.28 прямая линия 1 показывает, что в течение всего времени легирования анод равномерно "подает" одинаковые порции материала. В первые минуты на катоде откладывается наибольшее количество материала (участок АБ кривой 2). В точке «В» максимума кривой 2 изменение массы катода не наблюдается, в этот момент времени количество материала, осевшего с анода, равно количеству материала, удаляемому с катода. В дальнейшем начинается обратный процесс, то есть на катоде осаждается материала меньше, чем выбрасывается за один импульс. Удельная продолжительность легирования, при которой наступает максимум покрытия, зависит от энергии единичного импульса и химического состава материалов электродов.

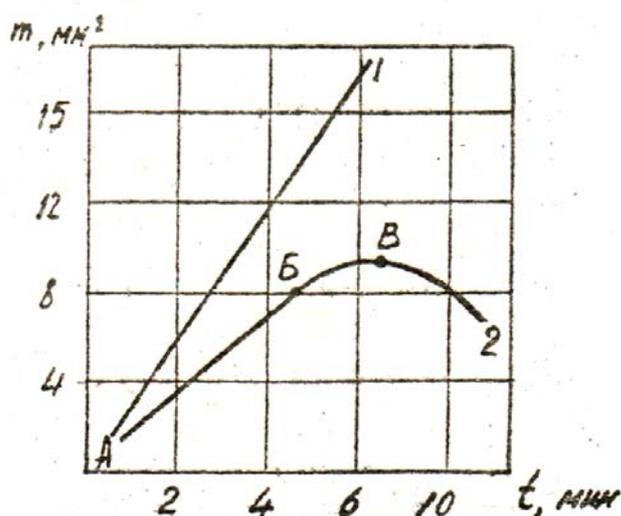


Рис. 2.28

Наличие максимума в кривой свидетельствует о невозможности получения покрытий большой толщины. Обычно толщина покрытия при чистовом легировании составляет 50...80 мкм, при грубом — 100...200 мкм. Причины, ограничивающие толщину покрытия, пока полностью не выяснены.

Легирование рабочих поверхностей деталей машин, аппаратов, механизмов приборов и инструментов выполняется с целью: изменения твердости, пластичности, коэффициента трения, повышения жаростойкости, коррозионной стойкости, износостойкости, снижения склонности к схватыванию при трении, освобождения от операций термообработки, подготовки поверхности к другим видам обработки ("вспенивание поверхности", создание переходных слоев и т.д.), выполнение ремонтно-восстановительных работ.

Первой областью промышленного применения электроискрового легирования явилось упрочнение режущего инструмента. Упрочнению подвергаются режущие грани резцов, фрез, пил для металла и дерева. В результате электроискрового легирования срок службы некоторых видов инструмента повышается в 20 раз.

Хорошо зарекомендовало себя электроискровое легирование для деталей цилиндрических и сферических подшипников скольжения в условиях сухого трения при высоких нагрузках и температурах, при работе как на воздухе, так и в вакууме. Электроискровые покрытия поверхностей трения хорошо работают в режиме “пуск—остановка—пуск” вследствие их пониженной склонности к схватыванию.

Электроискровое легирование применяется при ремонтных работах. Возможность восстановления размеров изношенных поверхностей до номинальных размеров позволяет использовать детали без повторного шлифования их на ремонтный размер. Большое значение в ремонтном деле имеет то, что при электроискровом легировании можно восстановить закаленные детали без их повторной термообработки.

### 2.3.5. Электроконтактная обработка

Сущность электроконтактной обработки (ЭКО) основана на электроэрозионном разрушении электрода-заготовки под воздействием электродуговых разрядов. Принципиальная схема ЭКО приведена на рис. 2.29.

К электроду-инструменту 2 через щеточное устройство 1 и к заготовке 4 подведено напряжение постоянного тока. При этом электроду в виде диска сообщается вращение с большой окружной скоростью ( $30...50$  м/с), а заготовке движение подачи  $V_3$ . Процесс может протекать на воздухе, в рабочей жидкости (вода с антикоррозионными добавками), либо с поливом зоны обработки. Поверхности электрода не являются идеально гладкими и имеют неровности. При вращении его выступы периодически приближаются к заготовке, вплоть до контакта. На определенном расстоянии между электродами происходит одиночный разряд, переходящий в дуговой разряд и вызывающий расплавление металла заготовки. Расплавленные частицы металла удаляются из зоны контакта быстровращающимся инструментом. При этом методе длительность и частота импульсов тока будет зависеть от качества рабочей поверхности электрода и частоты его вращения.

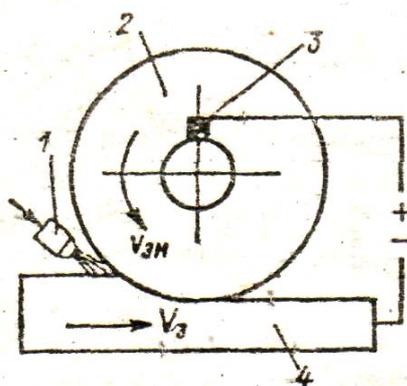


Рис. 2.29

На определенном расстоянии между электродами происходит одиночный разряд, переходящий в дуговой разряд и вызывающий расплавление металла заготовки. Расплавленные частицы металла удаляются из зоны контакта быстровращающимся инструментом. При этом методе длительность и частота импульсов тока будет зависеть от качества рабочей поверхности электрода и частоты его вращения.

Вращающийся электрод сам регулирует параметры импульсов, поэтому не требуется специального генератора, как при ЭЭО, а используется постоянный или переменный ток низкого напряжения. Если процесс проте-

кает в воздушной среде, то возникают более длительные дуговые разряды, чем при процессе в жидкости, т.к. после контакта между инструментом и заготовкой дуга может гореть довольно длительное время. При этом частицы расплавленного металла могут достигать обработанной поверхности и, внедряясь в него, значительно ухудшать качество этой поверхности. Поэтому ЭКО на воздухе выполняют на заготовительных операциях и таких черновых операциях, где не предъявляются требования к качеству поверхностей. Например, при отрезке литников и прибылей у отливок из высокопрочных сталей и сплавов.

Кроме того, термическое воздействие разрядов вызывает структурные изменения поверхностных слоев металла. Глубина слоя с измененной структурой при обработке на воздухе может достигать 2...3 мм.

При использовании жидкостей при ЭКО процесс качественно улучшается, а именно:

- повышается локализация электрических разрядов;
- интенсивно удаляются из зоны продукты эрозии, которые оседают на дне емкости;
- происходит охлаждение электрода и заготовки;
- снижается шероховатость обработанной поверхности;
- исключается приваривание расплавленных частиц к заготовке.

В качестве рабочих жидкостей используют воду 2...3% эмульсию; 2...3% раствор кальцинированной соды  $\text{CaCO}_3$  и т.д.

Материалами электродов-инструментов могут служить медь, чугун (при обработке плоскостей), сталь Ст3 (на операциях отрезки).

ЭКО характеризуется высокой производительностью. Основным фактором, определяющим производительность ЭКО, является мощность, реализуемая в межэлектродном промежутке. С увеличением тока и напряжения растет скорость съема металла. Так при мощности установки 100 квт съем металла составляет около 100 кг/г или 200000 мм<sup>3</sup>/мин. ЭКО применяют для разрезания, точения, снятия фасок в листовых заготовках под сварку, обдирки слитков, заточки режущих инструментов.

Ниже приведены примеры практического использования ЭКО [12].

Электроконтактное разрезание ведется в следующих режимах:

Рабочий ток, а	1500...10 000
Рабочее напряжение, в	24...31
Вид тока	Переменный
Скорость диска-электрода, м/сек	30...100
Износ диска-электрода (% объема удаляемого металла)	До 5
Толщина диска-электрода, мм	2...6
Диаметр диска-электрода, мм	750...1000

Электроконтактное разрезание вращающимся диском или непрерывной лентой с подводом тока низкого напряжения к инструменту и заготовке. Эта обработка рекомендуется для резки труб, круглых и прямоугольных

заготовок, профильного проката и других деталей из различных токопроводящих материалов. Производительность электроконтактного разрезания достигает  $2000 \text{ мм}^2/\text{с}$  для стали и до  $4000 \text{ мм}^2/\text{с}$  — для алюминиевых сплавов.

Ширина реза в результате обработки на 1...4 мм превышает толщину дискового электрода.

На авторемонтных заводах применяют электроконтактное шлифование восстановленных наплавкой коренных и шатунных шеек коленчатых валов. В этом случае из-за высокой твердости наплавленного металла (HRC 50...55) абразивное шлифование малоэффективно. Обработка шеек ведется чугуном диском на модернизированном круглошлифовальном станке при подключении детали и инструмента к источнику постоянного тока (деталь — анод, диск-электрод — катод). Для охлаждения в зону обработки подается 5%-ная эмульсия.

Режимы электроконтактного шлифования следующие:

Рабочий ток, а	600...800
Рабочее напряжение, в	26...28
Скорость вращения дискового инструмента, м/сек	30
Скорость вращения детали, м/сек	0,25
Средний снимаемый припуск, мм	2,5
Производительность обработки, $\text{мм}^3/\text{мин}$	60 000

При обработке фасок под сварку на броневых листах из высокопрочной стали, вращающимся чугуном электродом с погружением заготовки и инструмента в воду производительность процесса достигала  $70000 \text{ мм}^3/\text{мин}$ , при этом минутная подача в 2...3 раза превышала производительность механической обработки.

Разновидностью ЭКО следует считать и новый метод электроэрозивной обработки короткой дугой (ЭЭОКД) [13]. Этот метод используется для удаления припуска с крупных заготовок из жаропрочных и титановых сплавов энергией низковольтного квазистационарного дугового разряда постоянного тока. Обработка осуществляется вращающимся чугуном или медным электродом с поливом водой или с погружением заготовки в нее. ЭЭОКД отличается наиболее высокой производительностью среди всех электрофизических и электрохимических методов и достигает  $2,5 \text{ см}^3/\text{с}$  при шероховатости  $R_a$  25...50 мкм и глубине измененного слоя 0,1...0,2 мм для жаропрочного сплава. При полуструевой обработке можно получить шероховатость  $R_a$  2,5...6,3 мкм при производительности  $0,5 \text{ см}^3/\text{с}$ .

## 2.4. Оборудование и инструмент

Начавшийся в конце 80-х годов спад производства в машиностроении привел к тому, что в России прекратилось дальнейшее совершенствование выпускаемого оборудования, а производство устаревших станков свелось к их изготовлению в небольших количествах по отдельным зака-

зам. В настоящее время в России остался практически единственный завод, способный изготавливать оборудование для электрофизической и электрохимической обработки — Троицкий станкостроительный завод.

#### 2.4.1. Оборудование для электроэрозионной обработки

В настоящее время выпускается и применяется в основном два типа электроэрозионных станков:

- копировально-прошивочные станки для изготовления полостей профильным электродом-инструментом;
- вырезные станки для изготовления фасонных профилей непрофилированным электродом-проволокой.

Основные характеристики некоторых отечественных электроэрозионных станков приведены в табл. 2.2 и 2.3 (см. с. 38 и 39)

Все типы копировально-прошивочных станков имеют примерно одинаковую компоновку и используются для обработки фасонных поверхностей при изготовлении ковочных, гибочных, вырубных, чеканочных штампов, пресс-форм, кокилей, фильер и других изделий из труднообрабатываемых сталей и твердых сплавов. На рис. 2.30 (см. с. 40) приведена типовая схема копировально-прошивочного станка [1].

На станине 1 установлен рабочий стол 2 для крепления заготовки. Обработка выполняется в ванне 3 с диэлектрической рабочей жидкостью. Электрод-инструмент закреплен в электрододержателе 8 и может перемещаться каретками 5 и 9 в двух взаимно-перпендикулярных направлениях по горизонтали. В рабочем режиме электрод-инструмент 18 вибрирует и перемещается в вертикальном направлении к заготовке по сигналам регулятора межэлектродного промежутка, производящего в действие двигатель 6 и вибратор 7, закрепленный на площадке 4. Стол и инструмент изолированы от станины диэлектрическими прокладками 17.

Электрическая часть станка включает генератор импульсов 10, блок управления 11 с приборами контроля режимов обработки. Рабочая жидкость поступает в межэлектродный промежуток из бака 14 через магистраль 12. Насос 15 может подавать жидкость непосредственно в ванну 3 по тракту 13. Для слива жидкости в бак 14 предусмотрена магистраль 16.

Точные станки снабжают оптической системой отсчета координат, выполняют с цифровой индикацией, с программным управлением, с управлением от ЭВМ. В крупных станках шкафы управления и генераторы электрических импульсов устанавливаются отдельно. Станки снабжают фильтрами рабочей жидкости, холодильниками для ее охлаждения и т.д.

В качестве основных размеров копировально-прошивочных станков приняты рабочие размеры стола и наибольшее расстояние от торца шпинделя инструментальной головки до поверхности стола.

В процессе обработки на электроэрозионных копировально-прошивочных станках прямолинейным движением подачи электрода-

инструмента (ЭИ) в заготовке полностью копируется форма и размеры рабочей части инструмента. Для чистовой доводки вертикальных и наклонных поверхностей используют орбитальное движение ЭИ. При орбитальном движении все точки электрода совершают в плоскостях, перпендикулярных направлению подачи, движение по круговым траекториям с одинаковыми радиусами. Для этой цели используют специальные орбитальные головки, а также УЧПУ станков 4Л721Ф3 и 4Л723Ф3-01.

Таблица 2.2

Краткие технические характеристики электроэрозионных копировально-прошивочных станков выпускаемых ТСЗ

Основные Характеристики		4Л723Ф11-01	4Л723Ф3-01	4Б724М
Размеры рабочей поверхности стола, мм		400×630	400×630	630×1120
Предельные размеры устанавливаемой заготовки (L×B×H), мм		550×400×275	550×400× ×275	800×550× ×450
Наибольшее расстояние от рабочей поверхности стола до торца шпинделя, мм		615	615	615
Наибольшее рабочее перемещение шпинделя, мм	250	400	400	400
Наибольшая масса устанавливаемой заготовки, кг	400	1000	1000	1370
Наибольшая масса электрода, кг	4Л721Ф3	100	100	75
Наибольшая производительность по стали 45 медным электродом мм <sup>3</sup> /мин	250×360	1400	1200	800
Дискретность перемещения шпинделя, мкм	280×250× ×120	1	1	1
Количество управляемых координат	460	—	3	—
Габаритные размеры станка L×B×H, мм	2850×1700× ×2760	3500×3200× ×3000	3350×3100× 2960	
Масса станка в комплекте, кг	1545	3800	3800	
Генератор	ШГИ-80-440М2	ШГИ80×2×200М2		ШГИ-80-440М2
Рабочая жидкость	РЖ-3	РЖ-8	РЖ-8	РЖ-8

Электроэрозионные вырезные станки используют в качестве электрода непрофилированную проволоку диаметром 0,05...0,3 мм из меди, латуни или вольфрама. Получение заданного профиля вырезные станки могут обеспечивать за счет:

- металлического копира наклеиваемого на заготовку;
- фотокопировального устройства, когда функцию копира выполняет чертеж детали;
- применения устройства числового программного управления.

Таблица 2.3

Технические характеристики электроэрозионных вырезных станков

Параметр	4531Ф3	4532Ф3	4732Ф3	4735Ф3
Наибольшие размеры обрабатываемой детали, мм	120×100× ×40	250×160× ×75	250×160× ×75	500×320× ×150
Наибольшая масса детали, кг	5	45	45	400
Наибольшие размеры обрабатываемого контура, мм	100×60	200×125	200×125	400×250
Диапазон диам. пров., мм	0,02...0,2	0,05...0,3		
Рабочая жидкость	Промышленная вода			
Производительность, мм <sup>3</sup> /мин: по стали по твердому сплаву	18 11 (керосин), 6 (вода)	35 18	35 18	35 18
R <sub>a</sub> , мкм	5...1,25	5...1,25	5...1,25	5...1,25
Возможность обработки наклонных поверхностей	Нет	Нет	3°30'	3°30'
Тип системы ЧПУ	Контур 2П-67	Контур 2П-67	15ИПЧ-3- 001 или 2М- 43	2М-43
Подача на один импульс, мкм	1	2	1	1
Коррекция эквидистанты	Нет	Нет	Есть	Есть
Масштабирование	Нет	Нет	Есть	Есть
Габаритные размеры станка, мм	850×655× ×1545	830×1200× ×1570	830×1200× ×1570	1400×1500 ××1950
Наибольшая потребляемая мощность, кВт	2,75	2,9		
Масса станка, кг	700	1500	1500	2000

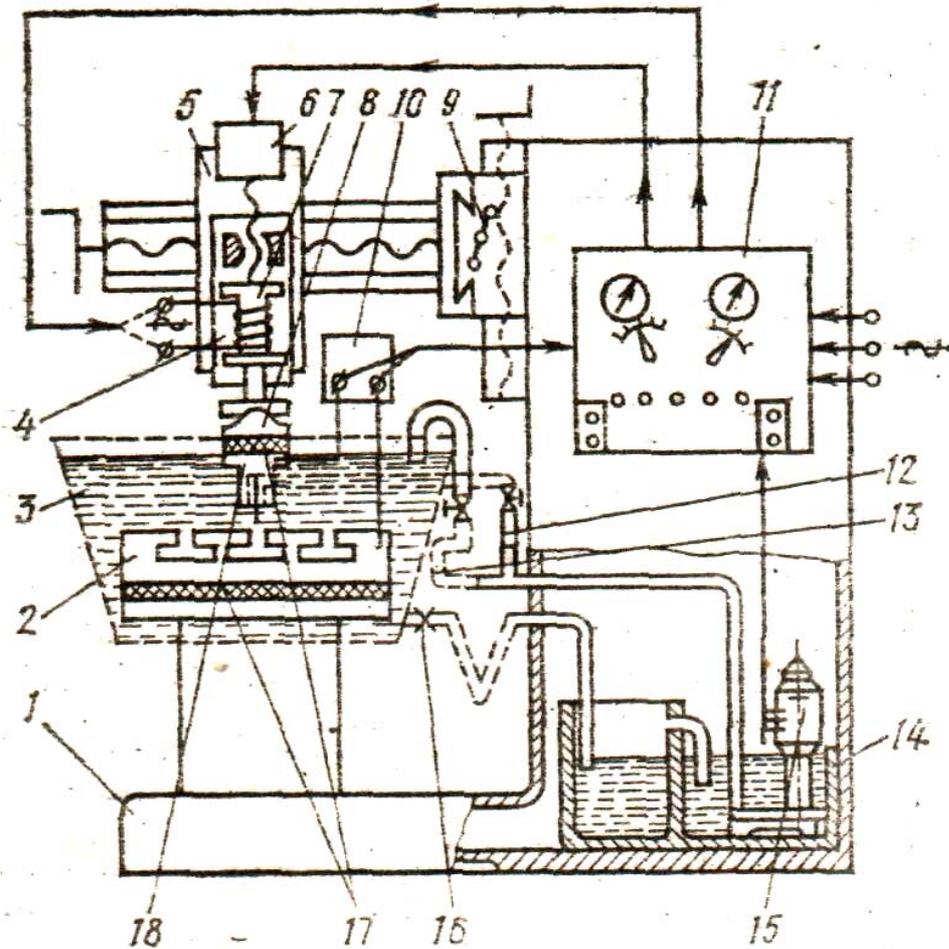


Рис. 2.30

Общий вид компоновки рабочей зоны вырезных станков независимо от системы управления представлен на рис. 2.31 [4].

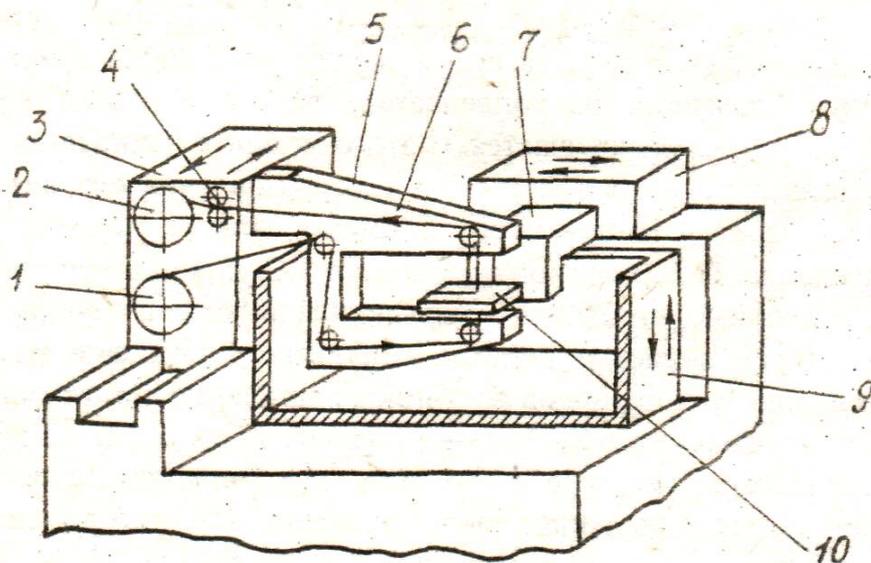


Рис. 2.31

Станок имеет две каретки: каретку продольных перемещений 8 и каретку поперечных перемещений 3. На каретке поперечных перемещений закреплена скоба 5 и размещено устройство для перемотки и натяжения проволоки. Проволока 6 под действием тянущих роликов 4 проходит систему направляющих роликов и перематывается с катушки 1 на катушку 2. В катушке 1 смонтирован тормоз, обеспечивающий требуемое натяжение проволоки. Величину натяжения регулируют изменением тормозного момента. Скорость перемотки проволоки регулируется изменением угловой скорости тянущего ролика. Каретка продольных перемещений имеет кронштейн 7, на котором закрепляется обрабатываемая деталь 10. Для погружения детали при обработке в диэлектрическую жидкость, станок имеет поднимающуюся ванну 9.

В комплект станка входят генератор импульсов, позволяющий регулировать электрические режимы обработки, система очистки и подачи диэлектрической жидкости. Прямолинейная резка осуществляется при движении одной из кареток, последовательность включения кареток определяется контуром реза.

Указанные станки выпускались на заводах бывшего СССР, не входящих сейчас в Россию.

#### 2.4.2. Генераторы импульсов

При расчете и выборе генератора импульсов исходят из условия получения формы и мощности импульса, необходимых для обеспечения требуемых технологических показателей процесса. Черновую и чистовую обработку обычно ведут от одного и того же генератора. В настоящее время в электроэрозионных станках используют релаксационные и полупроводниковые генераторы.

Хронологически первым генератором был релаксационный RC-генератор, который предложили использовать изобретатели метода Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко. Такие генераторы успешно применяются до настоящего времени для обработки на электроискровых режимах.

Рассмотрим работу RC-генератора с начального момента, когда конденсатор «С» не заряжен (рис. 2.32).

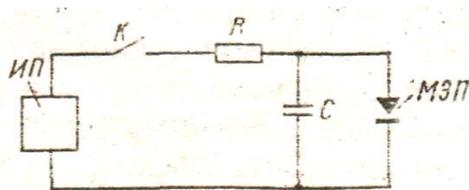


Рис. 2.32

При замыкании выключателя «К» конденсатор «С» через резистор R заряжается от источника питания ИП и напряжение на конденсаторе «С», а следовательно, и на межэлектродном промежутке МЭП повышается. Когда напряжение достигает пробивного для данного размера межэлектродного зазора, происходит пробой промежутка и энергия, запасенная в конденсаторе «С» за время заряда, выделяется в межэлектродном промежутке. Напряжение на конденсаторе падает, и разряд через межэлектродный промежуток прекращается. С этого момента начинается период деиониза-

ции межэлектродного промежутка (восстановления его диэлектрической прочности) и зарядка конденсатора «С». Время зарядки конденсатора, как известно, определяется постоянной времени  $\tau = RC$ . Для нормального протекания процесса необходимо, чтобы время зарядки было больше периода деионизации промежутка, иначе возможен переход импульсного разряда в дуговой. Требуемое соотношение этих периодов достигают подбором сопротивления резистора R и емкости конденсатора «С». Чем они больше, тем медленнее происходит зарядка конденсатора. По мере съема металла с заготовки расстояние между электродами растет и достигает такого значения, при котором напряжение на конденсаторе становится недостаточным для разряда. Если быстро сближать электроды (быстрее, чем происходит съем металла под действием эрозии), разряды будут происходить при низком напряжении, т.е. иметь малую энергию. И хотя частота следования разрядов возрастает, скорость съема металла снижается. При совсем малых расстояниях между электродами паузы между разрядами будут недостаточны для деионизации искрового промежутка, и процесс перейдет в дуговой. Таким образом, режим работы релаксационного RC-генератора определяется состоянием межэлектродного зазора.

В RC-генераторах значительная часть энергии теряется на нагрев резистора и другие потери. Поэтому КПД таких генераторов не превышает 25%. Мощность RC-генераторов обычно ограничивают 5...7 кВт, т.е. используют их в основном для чистовой обработки.

Значения параметров RC-генераторов ограничиваются энергией импульса, при которой не наблюдается образование микротрещин в обрабатываемом материале. Граничное значение энергии зависит также от длительности импульса. Обычно черновые режимы ограничивают энергией в несколько джоулей при длительности импульса 200...600 мкс.

В релаксационных генераторах не удается добиться высокой производительности процесса, так как с ростом энергии импульса возрастает время накопления заряда и падает частота импульсов.

Использование управляемых полупроводниковых приборов позволяет создать генераторы с широким диапазоном режимов обработки, у которых частота следования импульсов не зависит от свойств межэлектродного промежутка. Известно два вида генераторов этого типа: на основе инверторов, в которых управляемые тиристоры регулируют период зарядки и разряда конденсатора в релаксационных генераторах, и широкодиапазонные генераторы импульсов.

В настоящее время все отечественные копировально-прошивочные и вырезные станки оснащены широкодиапазонными генераторами импульсов.

Широкодиапазонные генераторы вырабатывают импульсы с частотой 1...880 кГц и выходным током 16...180 А, т.е. дают возможность работать на любых режимах электроэрозионной обработки. Кроме того, они вырабатывают импульсы такой формы, при которой износ электрода-

инструмента становится минимальным. Схема широкодиапазонного генератора импульсов типа ШГИ приведена на рис. 2.33.

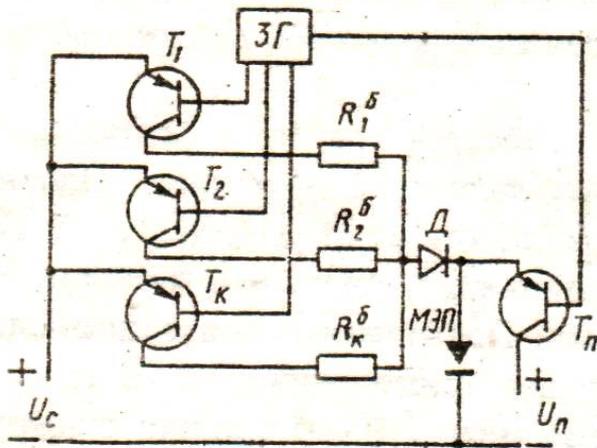


Рис. 2.33

Он состоит из двух частей: блока поджигающих импульсов (справа от межэлектродного промежутка МЭП) и силового блока. Блок поджигающих импульсов имеет малую мощность, но высокое напряжение  $U_n = 100...300$  В. Силовой блок дает напряжение  $U_c = 60...70$  В, но обладает большой мощностью. Оба блока управляются задающим генератором 3Г. После сигнала от него на включение транзистора  $T_n$  через межэлектродный промежуток МЭП пройдет импульс высокого на-

пряжения от блока поджигающих импульсов, происходит пробой, затем напряжение снижается, но остается канал проводимости. В этот момент от задающего генератора 3Г подается сигнал на включение транзисторов  $T_1, T_2, \dots, T_k$ . Одновременно открывается диод «Д». Ток от силового блока поступает в межэлектродный промежуток МЭП и протекает через образовавшийся канал проводимости. Время включения транзисторов  $T_1, T_2, \dots, T_k$  определяет длительность импульсов. Требуемую форму импульсов получают включением балластных резисторов  $R_1^б, R_2^б, \dots, R_k^б$  в силовом блоке. Генератор имеет блок защиты от короткого замыкания, который отключает его при перегрузках.

Генераторы серии ШГИ выполнены в виде автономного шкафа. Охлаждение электронных блоков производится с помощью вентилятора. Тип генератора обозначается двумя цифрами: первая обозначает верхний предел средней силы тока в импульсе, вторая — максимальную частоту следования импульсов. Например, генератор ШГИ-40-440 имеет максимальную силу тока 40 А и максимальную частоту 440 кГц [1].

Генераторы ШГИ позволяют реализовать малоизносные режимы обработки, когда при определенных условиях на поверхности ЭИ образуется защитная пленка, препятствующая разрушению материала электрода. Экспериментально установлено, что малоизносный режим соответствует условию  $I_m/t_n = 0,04$  а/мкс, где  $I_m$  — амплитудное значение тока, а  $t_n$  — длительность импульса, мкс.

При выборе режимов обработки на генераторах серии ШГИ можно руководствоваться следующими значениями параметров плотности тока (по показаниям прибора) [6]:

- для достижения малоизносной обработки  $I = 1...2$  а/см<sup>2</sup>;
- для достижения максимальной производительности  $I = 3...5$  а/см<sup>2</sup>.

### 2.4.3. Электроды-инструменты, рабочие жидкости

Материалы электродов должны быть электропроводными, с однородной структурой, иметь незначительные внутренние напряжения. Электроды-инструменты(ЭИ) должны быть устойчивыми к воздействию рабочей жидкости и коррозии, должны легко обрабатываться.

К универсальным материалам ЭИ относятся графит и медь, которые обеспечивают высокие производительность и качество поверхности. Плотность и прочность, хорошая электро- и теплопроводность меди (М1, М2) и мелкозернистого графита (МПГ6, МПГ7) обуславливают требуемую стойкость ЭИ и производительность на финишных режимах. Повышение производительности на черновых режимах достигается благодаря применению ЭИ из графита с большими размерами зерен и пор, а также из меди МП-15 с пористой структурой. Рекомендации по выбору материала приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Материалы электродов-инструментов, используемых для ЭЭО

Марка материала	Состав, вес, % (основные компоненты)	Область применения	Способ изготовления ЭИ
1	2	3	4
Графит ЭЭПГ, МПГ6, МПГ7	Углерод $\geq 99,5$ ; структура: ЭЭПГ — крупнозернистая; МПГ-6, МПГ-7 — мелкозернистая; пористость 10...25%	Черновая и получистовая ЭЭО штампов, прессформ и других фасонных изделий из сталей, жаропрочных и титановых сплавов	Слесарно-механический: — резанием со слесарной доводкой; — вихревым копированием; — вырезкой по программе провололочкой, шаржированной алмазными зернами
Медь М1, М2	Медь $\geq 99,9$	Все виды ЭЭО деталей из сталей (в том числе на режиме с малым износом) жаропрочных, твердых и титановых сплавов	Слесарно-механический, штамповка, гальванопластика
МП-15	Медь — 100; пористость 15%	Черновая ЭЭО жаропрочных сталей	То же

1	2	3	4
Латунь ЛС-59-1	Медь — 57...61; свинец — 0,8...1,9; цинк — остальное	ЭЭО сквозных отверстий в деталях из сталей и твердых сплавов; доводка деталей из твердых сплавов, разрезка заготовок	Слесарно-механический
Алюминиевый сплав Д-1	Алюминий — 94,3; медь — 4,3; марганец — 0,6; магний — 0,4	Черновая ЭЭО кокилей для алюминиевого литья и других деталей из сталей	Литье, слесарно-механический
Композиционный материал МНБ-3	Медь — 97; нитрид бора — 3	ЭЭО твердых сплавов при повышенном показателе стойкости	Методы порошковой металлургии, то же со слесарно-механической доводкой
Композиционный материал МБХ-3	Медь — 96; окись хрома — 3, бор — 1; пористость 15%	ЭЭО твердых, жаропрочных и титановых сплавов	То же
Композиция медь-вольфрам	Медь — 10...50%; вольфрам — остальное	ЭЭО твердых сплавов тугоплавких металлов и сплавов при повышенных показателях стойкости	Слесарно-механический

Композиционные материалы на основе меди позволяют улучшить эксплуатационные свойства ЭИ. Так, электроды-инструменты, изготовленные из композиции МБХ-3, обладают повышенной стойкостью и дают возможность увеличить скорость съема материала в 2...3 раза. Для ЭЭО твердосплавных деталей используют ЭИ из композиции МНБ-3.

Электроды-инструменты из латуни, алюминия и композиции медь-вольфрам имеют ограниченное применение при ЭЭО конкретных материалов и форм деталей.

*Рабочая жидкость для ЭЭО* должна обеспечивать высокие технологические показатели в течение длительного времени, быть хорошо фильтруемой, неядовитой, иметь высокую температуру вспышки, низкие показатели испаряемости и токсичности.

Для работ в диапазоне токов 0,5...45 А рекомендуется РЖ-3, для станков средней и большой мощности (10...250 А) — РЖ-8. Характеристики некоторых рабочих жидкостей для ЭЭО приведены в табл. 2.5 (см. с 46).

Таблица 2.5

Характеристики рабочих жидкостей для электроэрозионных  
копировально-прошивочных станков

Наименование рабочей жидкости	Вязкость при 20°C, мм <sup>2</sup> /с	Температура вспышки в закрытом тигле, °С	Испаряемость при 20°C в течение 168 ч, %	Содержание ароматических углеводов, %	Фильтруемость	
					время осаждения продуктов пиролиза, ч	коэффициент светопропускания, %
Сырье углеводородное для производства сульфанола	3	64	6,0	5,5	1,0	1,27
Рабочая жидкость РЖ-3 для электроэрозионных станков	3	80	3,8	5,5	1,0	1,59
Основа рабочей жидкости РЖ-8 для электроэрозионных станков	6...8,5	120	1,13	5,5	18	4,45
Смесь осветительного керосина КО-30 с индустриальным маслом И12А в соотношении 1:1	5,8	62	13,42	21,8	168	0,6

Для стабилизации процесса ЭЭО отфильтрованную рабочую жидкость прокачивают через ЭИ. Расход жидкости при прокачке составляет 0,1...1,5 см<sup>3</sup>/с под давлением 0,05...0,1 МПа.

Параметры прокачки регулируются системой адаптивного управления. Дальнейшее увеличение расхода жидкости (1,5...10 см<sup>3</sup>/с) способствует резкому повышению износа ЭИ [6].

#### 2.4.4. Регуляторы межэлектродного промежутка

Для сохранения устойчивости электроэрозионного процесса необходимо поддерживать определенную величину межэлектродного промежутка. Так как по мере выброса металла происходит увеличение межэлектродного промежутка, то необходимо непрерывно производить сближение электродов, иначе через некоторое время процесс прекратится. Эту функцию в электроэрозионных станках выполняют автоматические регуляторы

межэлектродного промежутка. Регуляторы должны удовлетворять следующим требованиям: стабильно поддерживать выбранный межэлектродный промежуток при случайных возмущениях (резких кратковременных изменениях режима); не должны допускать значительных отклонений управляемой величины от заданного режима; должны обладать малой инерционностью; быть малогабаритными; экономичными; простыми и надежными в работе.

Функциональная схема регулятора построена по принципу автоматических систем с обратной связью по выходному сигналу (рис. 2.34).

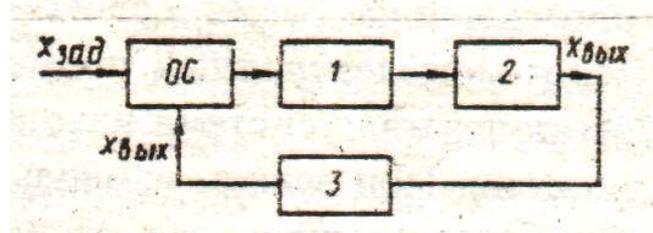


Рис. 2.34

С датчика 3 выходной величины сигнал подается в орган сравнения ОС. Разность выходного  $x_{\text{вых}}$  и заданного  $x_{\text{зад}}$  сигналов усиливается схемой 1 и поступает на исполнительный орган 2. Эту разность приводит подачи электрода-инструмента обрабатывает так, чтобы она обратилась в нуль.

При этом электрод-инструмент перемещается, а заданная величина межэлектродного промежутка поддерживается в пределах, определяемых погрешностью системы.

Автоматические регуляторы межэлектродного промежутка по принципу действия можно разделить на взвешенные и жесткие действия. Автоматические регуляторы взвешенной системы характеризуются наличием устройства, автоматически поддерживающего в равновесном состоянии электрод-инструмент, который под влиянием собственного веса стремится опуститься вниз до соприкосновения с обрабатываемой заготовкой. Необходимым условием нормальной работы таких систем является уменьшение силы тяги регулятора при увеличении межэлектродного промежутка. Тогда под влиянием собственного веса подвижная система будет опускаться вниз до восстановления прежней величины промежутка между электродами.

Автоматические регуляторы жесткой системы характеризуются тем, что подвижная система не может свободно перемещаться под действием собственного веса, а передвигается принудительно как в направлении подачи, так и в направлении отвода. Регуляторы такой системы свободны от некоторых недостатков регуляторов взвешенной системы. Однако они более сложны и требуют тщательного изготовления.

В качестве параметров регулирования в большинстве случаев используют напряжение или ток, а иногда напряжение и ток одновременно. Наиболее распространенным регулятором взвешенной системы является регулятор соленоидного типа (рис. 2.35, см. с. 48). Подвижная система, включающая электрод-инструмент 1, шпиндель 2 и противовес 3, под влиянием веса инструмента и шпинделя способна опускаться вниз по направляющим. Сила тяги соленоида 4 уравнивает подвижную систему

и при установившемся режиме обработки удерживает ее во взвешенном состоянии, поддерживая заданный промежуток между электродами.

Сила тяги соленоида зависит от величины тока, протекающего по его обмотке, поэтому для каждого режима обработки и веса электрода-инструмента можно подобрать такие соотношения между током, протекающим через соленоид, и током через межэлектродный промежуток, чтобы подвижная система находилась в равновесии. При всяком изменении тока или напряжения сила тока соленоида будет изменяться, что вызовет перемещение подвижной системы в нужном направлении до восстановления устойчивой работы станка.

Автоматическим регулятором с жесткой связью, получившим широкое распространение, является электродвигатель-регулятор с винтовой подачей (рис. 2.36). Он состоит из реверсивного электродвигателя 1 постоянного тока, приводящего во вращение ходовой винт 2, закрепленный в подшипниках, исключающих его продольное перемещение. Винт 2, вращаясь в гайке 3, закрепленной в подвижной системе 4 станка, сообщает последней движение подачи или отвода в зависимости от направления вращения электродвигателя. Схема включения электродвигателя показана на рис. 2.37.

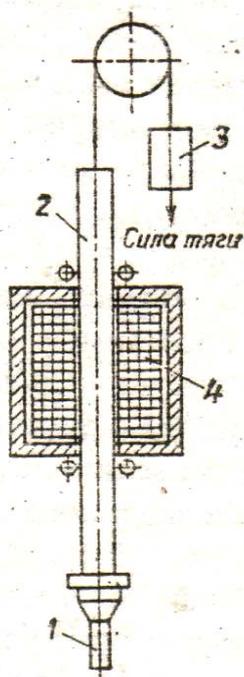


Рис. 3.35

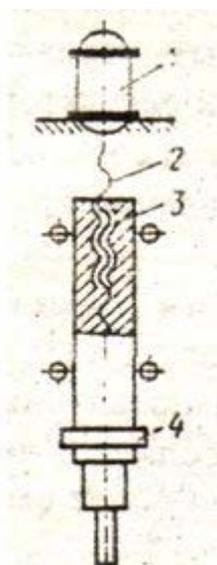


Рис. 3.36

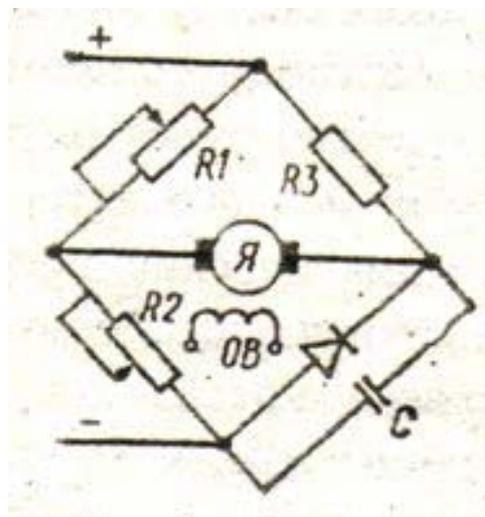


Рис. 3.37

При одинаковых напряжениях на  $R1$  и  $R2$  напряжение на якоре электродвигателя равно нулю. Электродвигатель не работает — это соответствует заданному межэлектродному зазору. При увеличении или уменьшении рабочего тока от заданного напряжения на резисторе  $R3$  соответственно изменяется. Это приводит к вращению якоря электродвигателя (OB — обмотка возбуждения) [3].

#### 2.4.5. Достижения зарубежного станкостроения

В настоящее время мировыми лидерами по изготовлению и продажам электроэрозионного оборудования являются японская фирма Sodic и две швейцарских фирмы — Agis и Charmilles Technologies. Наиболее эффективные результаты по производительности, точности и качеству обработанной поверхности имеет фирма Sodic.

Такие результаты получены в основном за счет создания и оснащения станков принципиально новыми приводами подач — линейными электродвигателями (ЛД). Принцип действия линейного двигателя не нов и известен давно. Сущность его состоит в том что, если в круглый электромагнитный статор поместить с небольшим зазором магнитный сердечник, то последний при включении обмотки электромагнитного статора будет перемещаться поступательно в ту или иную сторону в зависимости от полярности подаваемого напряжения. По этому принципу работает регулятор соленоидного типа, показанный на рис. 2.35 (см. с. 48). В Японии электромагнитный привод такого типа, уже как линейный привод, успешно используется в качестве движителя сверхскоростных поездов. Но для использования подобных движителей в качестве линейного регулируемого сервопривода подач для электроэрозионных станков не было решено ряд проблем, основная из которых — невозможность регулирования скорости перемещения.

В результате многолетних исследований на фирме Sodic были созданы ЛД с плоскими ротором и статором, имеющими отличные характеристики: рабочий ход от 100 до 2200 мм, регулируемая скорость перемещения до 180 м/мин с ускорением до 20G при точности заданных перемещений — 1 мкм. Схема такого ЛД показана на рис. 2.38 (см. с. 50) [11].

Линейный двигатель состоит всего из двух элементов: неподвижного плоского статора и плоского ротора с воздушным зазором между ними. И статор и ротор выполнены в виде плоских, легко демонтируемых блоков. Статор крепится к стойке станка, а ротор к рабочему органу. Ротор элементарно прост, он состоит из набора прямоугольных брусков, представляющих собой сильные постоянные магниты. Магнитные бруски, закрепленные на тонкой плите из специальной минералокерамики, имеют очень малый коэффициент температурного расширения.

Точная и равномерная подача рабочего органа обеспечивается благодаря использованию двух технических новинок:

- размещение постоянных магнитов в роторе под определенным фиксированным углом по отношению к направлению движения рабочего органа;

- применение эффективной шестифазной импульсной системы управления магнитным полем статора и его оригинальной конструкцией.

Использование ЛД в приводах подач взамен обычных электродвигателей имеет следующие преимущества:

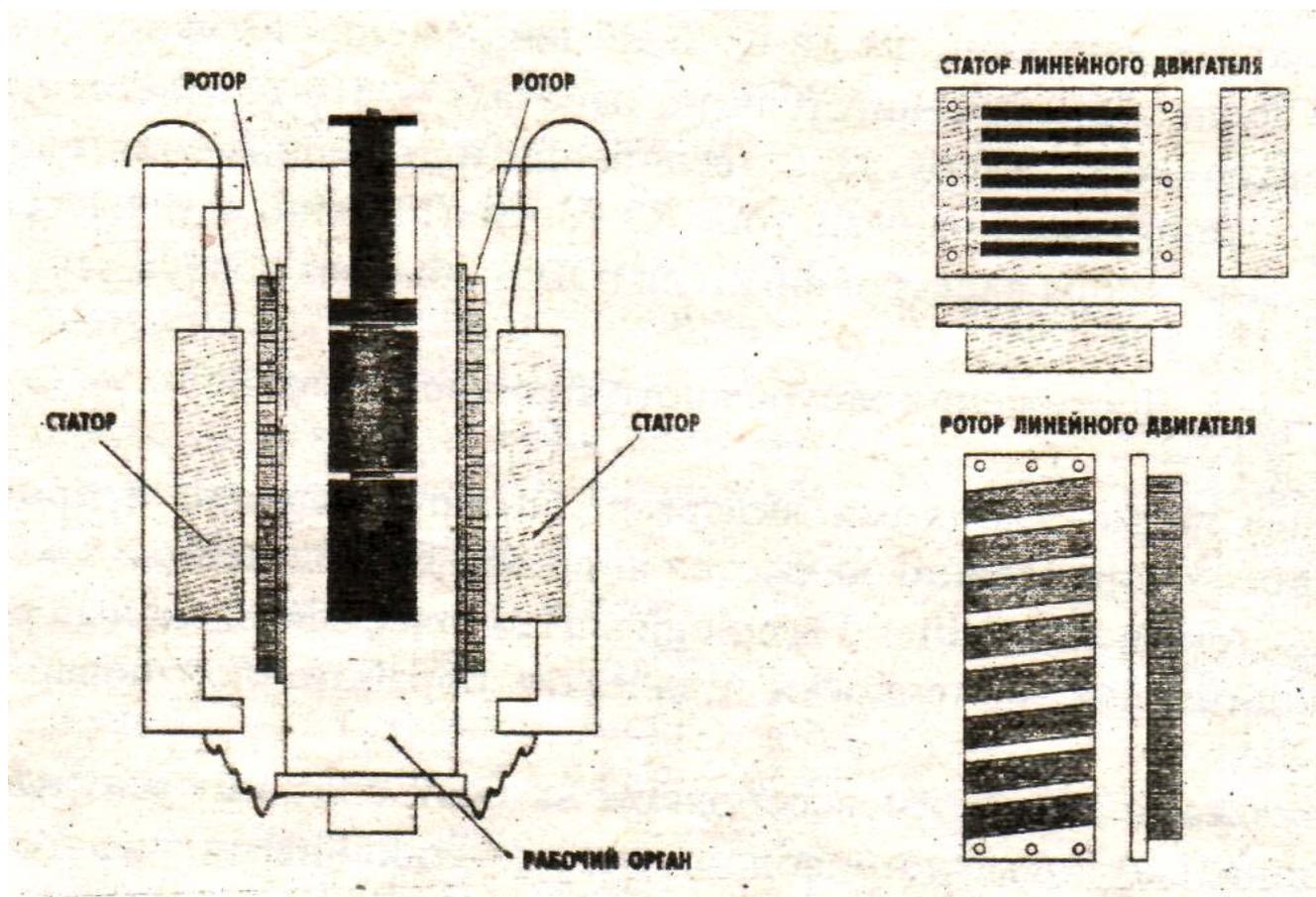


Рис. 2.38.

- отпадает необходимость применения промежуточных механизмов для превращения вращательного движения в поступательное движение;
- отсутствует трение при передаче движения на рабочий орган станка;
- исключаются зазоры в передающих механизмах, а, следовательно, увеличивается точность и быстродействие работы привода;
- отсутствует износ сопрягаемых элементов;
- повышается точность станка из-за отсутствия погрешностей деталей передающих механизмов.

Испытания и опыт эксплуатации станков с ЛД показали следующие результаты:

- высокая точность линейных перемещений позволяет поддерживать все время идеально точный межэлектродный зазор, что обеспечивает оптимальные энергетические режимы;
- высокая скорость перемещения электрода — (36 м/мин при 1,89G), что на порядок выше обычных приводов, значительно сокращает холостое время релаксаций (время на отвод электрода при коротких замыканиях);
- за счет высокой скорости релаксации электрода, последний работает как поршень насоса, эвакуируя шлам быстрыми перемещениями. При этом отпадает необходимость в прокачке рабочей жидкости и сообщение

электроду вибраций. Это позволяет повысить точность обработки, производительность процесса и снизить износ электрода;

— производительность копировально-прошивочных станков увеличивается как минимум в 2 раза, а проволочно-вырезных станков на 50%, кроме того, значительно повышается точность обработки.

Сравнительные испытания вырезных ЭЭ станков фирм Agie, Charmilles и Sodis при обработке внутреннего зубчатого профиля ведущего зубчатого венца волновой передачи, проведенные на ОАО “Центрсибнефтепровод” г. Томск, представлены ниже (табл. 2.6) [14].

Таблица 2.6

Фирма	AGIE	CHARMILLES	SODIC
Модель электроэрозионного станка	Agiecut 150HSS	Robofil 2020	AQ535 LN1W
Время, затраченное на обработку одного венца	19 часов 45 мин	24 час. 38 мин	8 час. 30 мин
Конечная шероховатость поверхности	0,8 мкм $R_a$ (7-й класс)	1,0 мкм $R_a$ (7-й класс)	0,5 мкм $R_a$ (8-й класс)
Отклонение от заданного контура	6 мкм	9 мкм	4 мкм

Характерной особенностью ЭЭ вырезных станков перечисленных зарубежных фирм является возможность выполнения многопроходной обработки с целью повышения точности и снижения шероховатости.

Другим качественным достижением фирмы Sodis является разработка и применение зеркальной системы “ПИКА”, которая позволяет получать весьма чистые поверхности (до  $R_a = 0,05$  мкм) на больших рельефных поверхностях при обработке на электроэрозионных копировально-прошивочных станках [5]. Сущность системы “ПИКА” для так называемого “зеркального полирования” заключается в том, что ЭЭО идет не в обычном масле, а в особом “высокодисперсном порошковом диэлектрике”, представляющем собой специально разработанную углеводородную жидкость Great Oil (Vitol-10), в которую добавляется “порошковая присадка PikaGen”. Эта присадка состояла до 1996 г. из смеси ультрадисперсных порошков кремния, алюминия и графита (в настоящее время используется присадка нового поколения PikaGen White). Масло Great Oil обеспечивает равномерное диспергирование частичек и исключает выпадение их в осадок.

В процессе ЭЭО в такой суспензии входящие в нее частички дробят малые искровые разряды на разряды с еще меньшей энергией. Дробление разрядов позволяет увеличить общую энергию на межэлектродном промежутке, резко ускоряя процесс выхаживания. Благодаря наличию в среде

ЭЭО мелкодисперсных металлических частичек на поверхности заготовки формируется электропроводный слой, создающий условия для равномерного распределения сверхмалых искровых разрядов по обрабатываемой поверхности.

При ЭЭО инструментальной стали 4Х5МФС в высокодисперсном диэлектрике медным электродом площадью 64 см<sup>2</sup> достигнута шероховатость  $R_a = 0,08$  мкм, при вырезании фасонного пуансона высотой 80 мм из стали Х12М за 16 рабочих ходов (10,2 часа) получена шероховатость  $R_a = 0,4$  мкм [5].

### 3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

#### 3.1. Механизм и закономерности формообразования

Электрохимическая обработка (ЭХО) основана на электрохимическом (анодном) растворении металла заготовки при высоких плотностях электрического тока.

Механизм растворения металла при ЭХО основан на электролизе. Это процесс, при котором происходит окисление или восстановление поверхностей электродов (проводников электрического тока), соединенных с источником питания (ИП) и помещенных в токопроводящий раствор — электролит (рис. 3.1) [3].

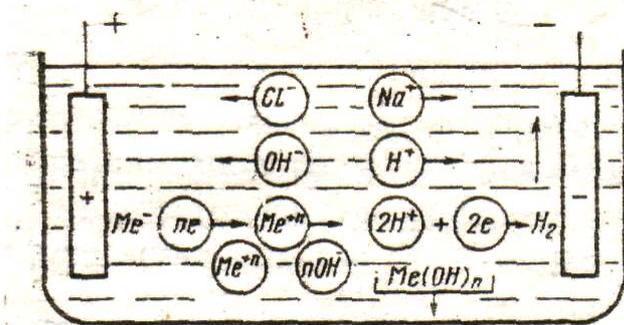


Рис. 3.1

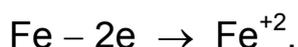
Один из электродов (заготовка) присоединен к положительному полюсу ИП и является анодом, а второй (инструмент) — к отрицательному полюсу; последний является катодом.

В электролитах молекулы вещества распадаются на электрически заряженные частицы — ионы, каждый из которых переносит один или несколько электрических зарядов.

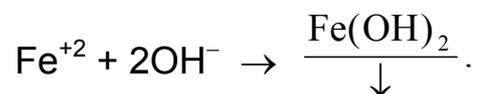
Число положительных и отрицательных зарядов, переносимых ионами, одинаково, и поэтому в целом электролит электрически нейтрален. Например, молекула хлористого натрия, растворяясь в воде, распадается на катион натрия  $Na^+$  и анион хлора  $Cl^-$ , кроме того, вода содержит ионы водорода  $H^+$  и гидроксиды  $OH^-$ .

Если к электродам, погруженным в этот раствор, приложить разность потенциалов, то анионы гидроксиды  $OH^-$  и хлора  $Cl^-$  будут двигаться к аноду, а катионы водорода  $H^+$  и натрия  $Na^+$  — в сторону катода, как показано на рис. 3.1. Электрическая цепь (ИП–электрод–электролит–электрод–ИП) при этом замкнется и ИП будет перемещать электроны по внешней цепи.

Ионы металла не будут переходить в раствор. Атомы Fe, отдавая электроны, будут образовывать ионы железа



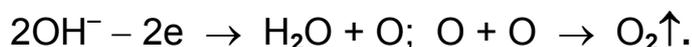
Образующийся ион металла Me связывается с ионом гидроокиси  $\text{OH}^-$ , образуя гидрат окиси металла  $\text{Me}(\text{OH})_n$ , который плохо растворяется в воде и выпадает в осадок, например, для железа:



Ионы водорода  $\text{H}^+$  разряжаются на катоде, образуя атомы водорода, которые в виде пузырьков уходят из раствора:



При этом на аноде происходит выделение газообразного кислорода



При ЭХО применяют такие электролиты, катионы которых ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$  и др.) не осаждаются на поверхности катода, чем обеспечивается очень важное достоинство ЭХО — неизменность формы электрода-инструмента в процессе всего периода его эксплуатации.

Согласно объединенному закону электролиза, сформулированному М. Фарадеем, масса вещества  $M$  в граммах, растворенного на электроде составляет

$$M = KIt_{\text{э}},$$

где  $K$  — электрохимический эквивалент вещества, мг/А·с;

$I$  — сила тока, проходящего через электролит;

$t_{\text{э}}$  — время электролиза, с.

Ниже приведены расчетные значения электрохимических эквивалентов некоторых сплавов:

Материал	$K$ , мг/(А·с)
Сталь 45 . . . . .	0,223
Сталь 12Х18Н9Т . . . . .	0,165
Жаропрочные сплавы . . . . .	0,26...0,29
Титановые сплавы . . . . .	0,158...0,162
Алюминиевые сплавы . . . . .	0,092...0,093

В действительности каждый компонент сплава имеет свой электрохимический эквивалент, т.е. свою скорость анодного растворения. За счет этого в процессе обработки возникают углубления и выступы, формирующие макропрофиль и шероховатость поверхности.

В зависимости от способов выполнения ЭХО все операции электрохимического растворения подразделяют на 2 различные группы, каждая из которых имеют свои закономерности:

- операции, выполняемые в стационарном электролите при невысокой плотности тока;
- операции, выполняемые в проточном электролите при высокой плотности тока.

Электрохимическую обработку в стационарном электролите делят на полирование, профилирование (копирование), заострение (затачивание), доводку.

Электрохимическую обработку в проточном электролите подразделяют на профилирование (копирование), прошивание каналов и отверстий, разрезание и т.д.

На рис. 3.2 показана принципиальная схема электрохимической обработки в стационарном электролите для наиболее типичной операции — электролитического полирования. Электрический ток, проходя через электролит 3 и электроды 8 и 5, вызывает растворение поверхности анода 5 в электролите и образование продуктов растворения 6, которые, задерживаясь в углублениях шероховатости поверхности, изолируют последние от прохождения тока, сосредоточивая его силовые линии на незащищенных участках поверхности анода. Происходит быстрое растворение выступов, и поверхность анода сглаживается.

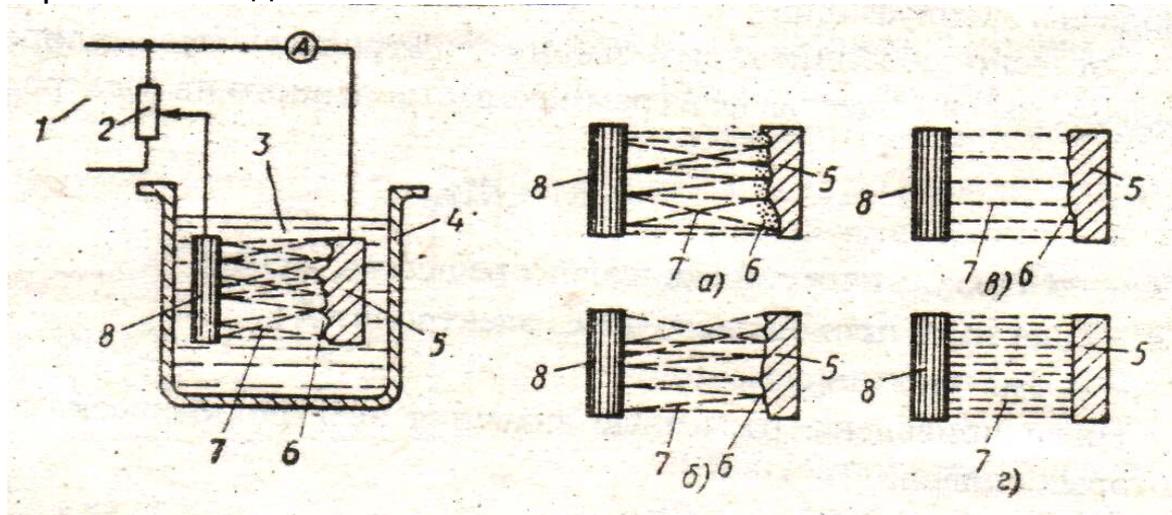


Рис. 3.2.

Электрополирование имеет многообразное применение. Наилучшее качество поверхности достигается при электрополировании чистовых и однородных металлов и сплавов. Полирование турбинных лопаток из легированных и труднообрабатываемых сплавов удаляет поверхностно-напряженные слои металла после механической обработки, повышает коррозионную стойкость и уменьшает шероховатость поверхности, уменьшая трудоемкости операции. Полирование эвольвенты зубчатых колес улучшает прирабатываемость поверхностей, удаляет дефектный поверхностный слой, снижает трудоемкость операции. Наружное и внутрен-

нее полирование труб из легированных сталей и специальных сплавов улучшает качество обработанной поверхности и снижает трудоемкость операции.

Процесс профилирования осуществляется за счет анодного растворения заготовки, помещенной внутрь полого цилиндрического катода. Растворение происходит интенсивнее на участках, более близких к катоду, в результате чего является изменение формы, в данном случае округление заготовки. Электролит — растворы кислот и солей.

Заострение и затачивание режущего инструмента осуществляют за счет создания на лезвии повышенной плотности тока, что обеспечивается соответствующим расположением лезвия инструмента относительно катода; характер заострения зависит также от первоначального угла заточки. Электролитом являются растворы кислот.

Доводку электрохимическим методом при стационарном электролите используют для обработки поверхностей штампов, пресс-форм и литейных форм после электроэрозионной обработки. При затачивании и доводке можно получить точность до 0,1 мм при высоте микронеровностей обработанных поверхностей  $R_a = 0,32 \div 0,63$  мкм.

Достоинства электрохимической обработки в стационарном электролите: возможность получения поверхностей с малой высотой микронеровностей, отсутствие необходимости в специальном инструменте. Недостатки: невысокая удельная производительность; чувствительность к изменениям состава электролита и его состояния; проявляющаяся в нарушении стабильности процесса, влияние на процесс неоднородности строения заготовки [3].

При ЭХО в проточном электролите применяют токи высокой плотности. Локализация процесса обработки обеспечивается конструкцией инструмента и созданием малых межэлектродных зазоров. Образующиеся при электролизе продукты растворения удаляются из межэлектродного промежутка потоком электролита.

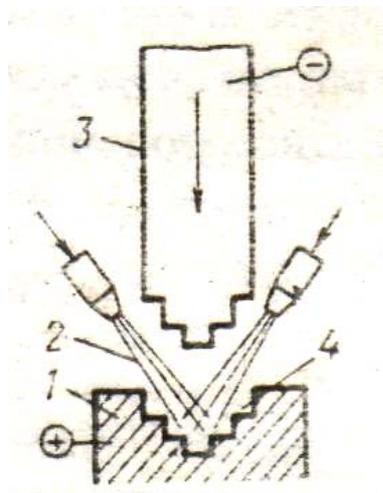


Рис. 3.3

На рис. 3.3 дана принципиальная схема электрохимической обработки в проточном электролите. Ток, проходя между катодом-инструментом 3 и анодом-заготовкой 1, вызывает растворение поверхности анода, в результате чего в нем воспроизводится профиль катода-инструмента в виде углубления 4 негативной формы. В начале процесса отдельные участки катода 3 располагаются значительно ближе к заготовке-аноду 1, и через них за счет меньшего сопротивления электролита 2 проходит ток большей величины. В результате находящиеся здесь участки заготовки подвергаются анодному разрушению быстрее.

Электрический ток проходит и на других участках, но за счет меньшей плотности тока на этих участках скорость их анодного растворения менее интенсивная. В конце обработки, когда анод приобретает отобразившую форму катода, плотность тока выравнивается по всей поверхности. В реальных условиях процесс значительно усложняется, что приводит к неравномерному съему металла. Поэтому рабочая часть электрода-катода представляет собой, в свою очередь, несколько откорректированный профиль обрабатываемого элемента заготовки [3].

Точность копирования электрода-инструмента на заготовке зависит от скорости растворения участков заготовки, отстоящих на различных расстояниях от электрода-инструмента. Рассмотрим получение углубления в плоской заготовке 2 электродом-инструментом 1, имеющим выступ ab (рис. 3.4).

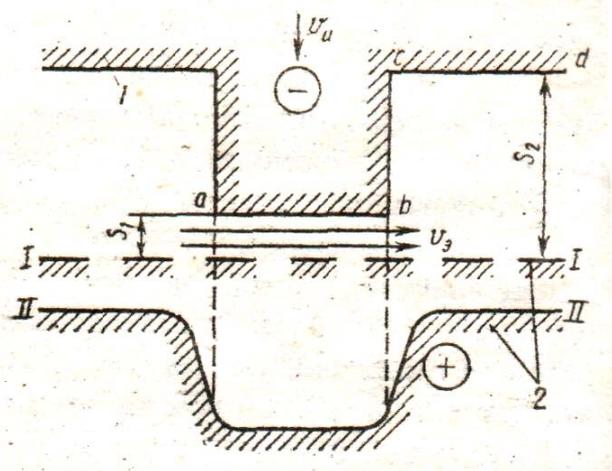


Рис. 3.4

В начале процесса граница заготовки занимает положение I-I. На расстоянии  $s_1$  от нее расположен выступ ab электрода-инструмента, который перемещается к заготовке с такой скоростью  $v_u$ , чтобы сохранялся постоянный зазор  $s_1$ . Через межэлектродный промежуток прокачивают электролит со скоростью  $v_3$ .

Если приблизительно принять выход по току, удельную проводимость электролита и напряжение одинаковыми по всей длине межэлектродного промежутка, то скорости анодного растворения материала под участком ab и cd будут обратно пропорциональны величине межэлектродных зазоров на этих участках

$$\frac{V_{ab}}{V_{cd}} = \frac{s_2}{s_1}.$$

По мере растворения металла заготовки и перемещения электрода-инструмента зазор  $s_2$  уменьшается, но остается справедливым условие  $s_2 > s_1$ , т.е. съем металла под выступом идет быстрее. Через некоторое время в плоской заготовке будет получено углубление с границей II-II. Форма электрода-инструмента отобразилась на аноде, и достигнута размерная обработка.

При ЭХО скорость анодного растворения и точность обработки тем выше, чем меньше межэлектродный зазор. Однако с уменьшением зазора усложняется процесс его регулирования, возрастает сопротивление протеканию электролита, может произойти пробой, вызывающий повреждение обрабатываемой поверхности. Из-за увеличения газонаполнения при ма-

лых зазорах снижается скорость анодного растворения. Следует выбирать такой размер зазора, при котором достигаются оптимальные скорость съема металла и точность формообразования.

Для ЭХО отверстий и небольших полостей, лопаток газотурбинных двигателей, а также при разрезании заготовок устанавливают и поддерживают зазор  $s = 0,1 \dots 0,3$  мм. Для крупных полостей, лопаток энергетических машин, для схем протягивания и точения задают зазор  $s = 0,3 \dots 0,5$  мм. При струйном методе обработки расстояние между электродами выбирают в диапазоне  $1 \dots 15$  мм. В случае неподвижных электродов в начале процесса устанавливают зазор  $s = 0,1 \dots 0,3$  мм.

При ЭХО используется три способа регулирования межэлектродных зазоров.

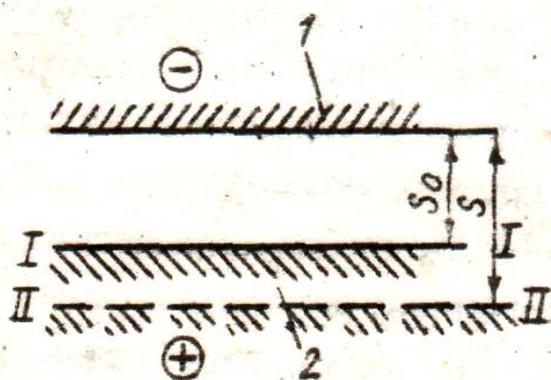


Рис. 3.5

1. При работе с неподвижными электродами (рис. 3.5) зазор постоянно возрастает, скорость анодного растворения снижается. Режим изменяется в течение обработки заготовки, т.е. является нестационарным. В начале процесса анодного растворения электрод-инструмент 1 находится относительно заготовки 2 на расстоянии  $s_0$ . Через некоторое время  $\tau$  граница обрабатываемой поверхности заготовки, занимавшая положение I-I,

переместится в положение II-II, а зазор возрастет на толщину растворенного слоя.

2. При постоянной скорости подачи инструмента режим обработки с течением времени становится близким к стационарному режиму. Рассмотрим схему прошивания при скорости подачи  $v_n = \text{const}$ . Если выбранная скорость подачи меньше, чем скорость растворения металла, то зазор постепенно увеличивается. Это приводит к снижению скорости удаления материала. Через некоторое время скорость подачи инструмента и скорость растворения материала заготовки выравниваются, и режим становится стационарным. При превышении скорости подачи электрода-инструмента над скоростью растворения металла также происходит саморегулирование зазора и устанавливается стационарный режим с постоянным установившимся зазором.

3. При периодическом перемещении электрода-инструмента относительно заготовки через определенные промежутки времени отключают рабочий ток, подводят электрод-инструмент до контакта с заготовкой, затем отводят его на расчетное расстояние и вновь включают рабочий ток. Между циклами подвода и отвода инструмента его либо оставляют неподвижным относительно заготовки, либо перемещают к ней со скоростью рабочей подачи.

В момент включения рабочего тока зазор  $s$  равен расчетной величине. Далее, в зависимости от схемы перемещения электрода-инструмента между циклами его подвода и отвода зазор либо возрастает, либо остается постоянным. Время между циклами измеряется секундами, поэтому изменение зазора во времени незначительно и его можно принимать равным расчетному зазору, а режим считать стационарным [1].

Современное оборудование для ЭХО, как правило, имеет адаптивную систему управления, одной из функций которого является регулирование скорости подачи без ощупывания инструментом обрабатываемой поверхности.

### 3.2. Типовые технологические операции

При выборе и назначении операций ЭХО взамен механической обработки резанием или ЭЭО следует произвести оценку целесообразности такой замены с учетом следующих достоинств и недостатков ЭХО.

Достоинствами ЭХО являются:

- возможность обработки нержавеющей, жаропрочных сталей, титановых сплавов, закаленных конструкционных сталей с более высокой производительностью, чем механической обработкой и ЭЭО;
- отсутствие или весьма малый износ электрода-инструмента по сравнению с обработкой резанием и ЭЭО;
- возможность образования сложных поверхностей в любых токопроводящих материалах с меньшими трудозатратами;
- низкая шероховатость обработанных поверхностей после ЭХО;
- простая кинематика и конструкция используемого оборудования.

Недостатки ЭХО:

- высокая коррозионная агрессивность применяемых электролитов, в связи с чем детали рабочей зоны станков и оснастка должны изготавливаться из нержавеющей сталей, а обрабатываемые детали и контактируемые с ними после ЭХО поверхности должны иметь антикоррозионную обработку;

- высокая энергоемкость процесса.

С учетом вышеизложенного достоинств и недостатков методом ЭХО рекомендуется выполнять такие типовые операции:

- электрохимическое маркирование;
- электрохимическое удаление заусенцев;
- электрохимическое объемное копирование;
- электрохимическое прошивание отверстий и каналов сложной формы;
- электрохимическое разрезание;
- электрохимическое полирование.

*Электрохимическое маркирование* деталей выполняется в основном по схеме с неподвижными электродами. Информация (цифры, буквы, рисунки) переносится на деталь копированием профиля на электродах или

избирательным растворением металла в прорезях диэлектрического трафарета. На рис. 3.6 показана схема копирования знаков, с помощью которых на деталь наносят цифры. Знаки 1, 4 на инструменте выполнены в зеркальном отображении и закреплены на торцевой части корпуса 3. Пространство между ними заполнено диэлектриком 2, который предохраняет материал детали от растворения на участках между знаками. Зазор между рабочей частью наносимых знаков 1, 4 и заготовкой 6 поддерживается диэлектрическими прокладками 5. Если глубина нанесения информации невелика (0,01...0,02 мм), то электролит в межэлектродный промежуток наносят тампоном; при необходимости получить углубления до 0,3...0,4 мм между инструментом и деталью прокачивают электролит. За счет анодного растворения металла под знаками образуются углубления, повторяющие отображение профиля знаков, как показано в нижней части рис. 3.6. Поскольку процесс идет при малой скорости движения электролита или без всякой прокачки, продукты обработки оседают в углублении, образуя контрастное изображение.

При использовании диэлектрических трафаретов (рис. 3.7) наносимая информация имеет форму просечек 1, 2. Трафарет 4 накладывают на деталь 3 и прижимают электродом-инструментом 5.

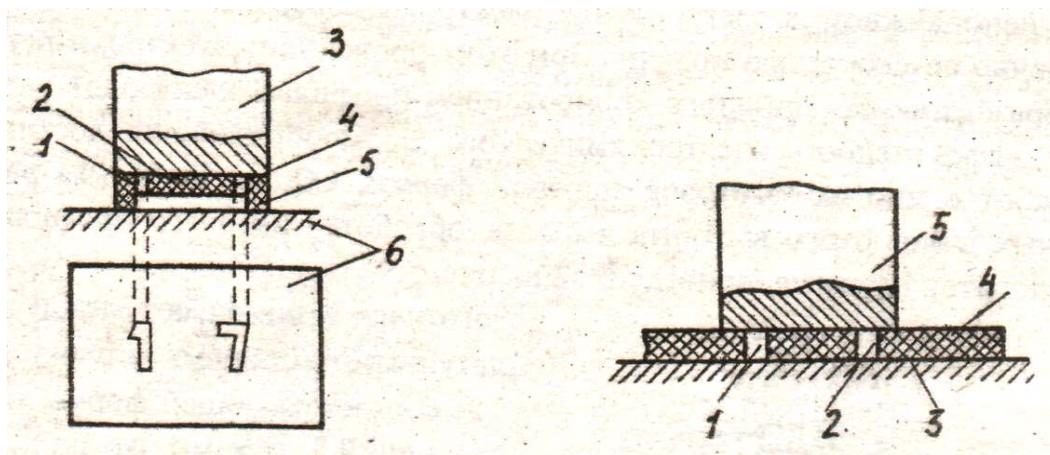


Рис. 3.6.

Рис. 3.7.

Процесс анодного растворения протекает в электролите, заранее нанесенном на поверхность детали. Если требуется прокачка жидкости, то трафарет прижимают по контуру, оставляя зазор между ним и электродом-инструментом, или выполняют прорезы в самом трафарете для прохода электролита. Роль трафарета может выполнять слой фотоэмульсии, наносимый на деталь [1].

Для мелкого маркирования без прокачки электролита диэлектрические прокладки выполняют так, чтобы межэлектродный зазор составлял 0,02...0,15 мм, при этом рабочее напряжение от источника питания в зависимости от материала детали может составлять от 3 до 16 вольт. Время маркирования подбирают экспериментально, обычно оно составляет несколько секунд.

Электрохимическое удаление заусенцев по схеме с неподвижными электродами можно выполнять в труднодоступных местах, например, в сообщающихся каналах топливо распределительной аппаратуры (рис. 3.8). После механической обработки на кромках отверстий образуются заусенцы 4, которые в процессе эксплуатации детали могут оторваться и попасть в жиклеры, сопла форсунок. Их необходимо устранить, а кромки скруглить. Для выполнения такой операции в одно из отверстий заготовки 2 вводят электрод-инструмент 1, наружная боковая поверхность которого покрыта изоляцией 3. Процесс растворения заусенцев и округления кромок занимает доли минуты. При этом снижаются высотные параметры шероховатости поверхности, в результате чего дополнительно уменьшаются гидравлические потери.

Электрохимическое объемное копирование выполняется по такой же схеме, как и при электроэрозионной обработке, т.е. деталь в процессе обработки остается неподвижной, а электрод или электроды совершают поступательное перемещение со скоростью подачи. При этом происходит электрохимическое формообразование детали-анода копированием профилей электродов-катодов. Высокая эффективность электрохимического формообразования достигается при обработке многих заготовок сложной формы. Одним из весьма распространенных видов этого варианта является обработка рабочего профиля турбинных лопаток по схеме, приведенной на рис. 3.9 [3].

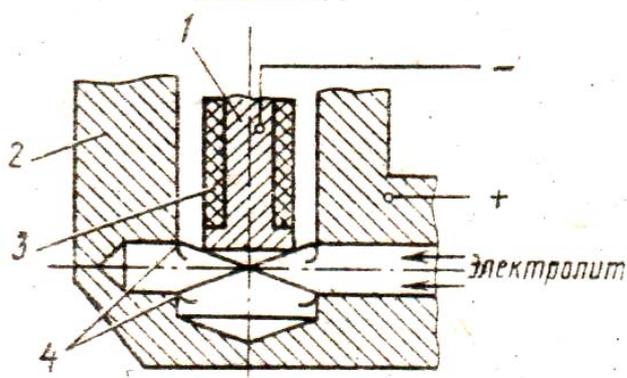


Рис. 3.8

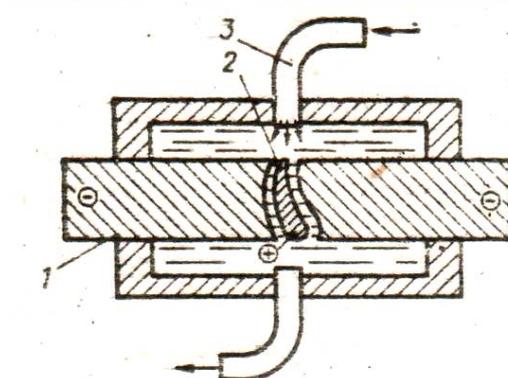


Рис. 3.9

Заготовку 2 помещают между двумя латунными копиями — электродами 1 — соответствующей формы на расстоянии 0,3...0,5 мм от них. Через образовавшийся зазор под давлением около 1 МПа прокачивают 10%-ный раствор поваренной соли, подаваемый через штуцер 3. Режим формообразования: напряжение на электродах 8...11 вольт, плотность тока 15...20 А/см<sup>2</sup>, скорость подачи 0,3...0,4 мм/мин. Металл с заготовки удаляется со скоростью подачи при шероховатости обработанной поверхности  $R_a = 1,25 \div 2,5$  мкм.

Исходя из особенностей электрохимического формообразования, полагают, что максимальный припуск, удаляемый с обрабатываемой по-

верхности, должен быть не более двойной величины минимального припуска. Так, если в среднем с любой точки снимают по 0,8 мм, то минимальный съем в любой части заготовки должен быть не менее 0,4 мм.

В процессе электрохимического формообразования одновременно выявляются дефекты обрабатываемой поверхности, в частности, микротрещины. Таким образом, при обработке осуществляется не только формообразование, но и контроль качества, что особенно важно для ответственных деталей, например, турбинных лопаток.

Практика показывает, что электрохимические методы формообразования в 4...10 раз производительнее механической обработки. Электрохимический метод обработки особенно эффективен при обработке заготовок из жаропрочных и титановых сплавов.

*Электрохимическое прошивание отверстий и каналов сложной формы* выполняют в корпусных деталях из труднообрабатываемых сталей и сплавов по различным схемам [2].

Для получения отверстий диаметром от 0,3 до 1,5 мм используют метод электрохимического струйного прошивания по схеме, приведенной на рис. 3.10. Электрод-инструмент, корпус которого 1 изготовлен из электроизоляционного материала, например, стекла, имеет внутри металлическую катодную втулку 3. При прокачивании электролита под давлением через катодную втулку 3 и корпус 2 им сообщают поступательное перемещение со скоростью  $V_{и}$  и в заготовке 2 получают цилиндрическое отверстие.

Формообразование сквозных и глухих отверстий любого профиля выполняют по схеме, показанной на рис. 3.11.

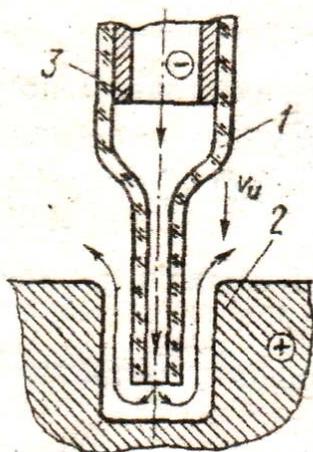


Рис. 3.10.

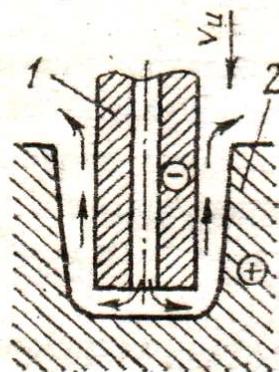


Рис. 3.11.

Электролит подается под давлением в межэлектродный промежуток через полость в электроде 1. Характерной особенностью обработки по такой схеме является образование развала отверстия на входной его части, который образуется за счет большего времени нахождения в контакте с электродом входных стенок заготовки 2, чем выходной ее частью.

Электрохимическое прошивание отверстий электродом-инструментом 1, рабочая часть которого имеет токопроводящий поясик высотой  $H$  (см. рис. 3.12), а остальная часть покрыта электроизоляционным слоем 2, обеспечивает постоянную величину бокового зазора по всей высоте отверстия, а, следовательно, последний имеет цилиндрическую форму. Сообщение электроду вращательного движения  $V_3$  повышает точность прошиваемого отверстия и качество обработанной поверхности [2].

При выполнении каналов для смазки в корпусных деталях, колечных валах ЭХО позволяет соединить любые участки детали отверстием произвольного сечения с криволинейной осью (рис. 3.13).

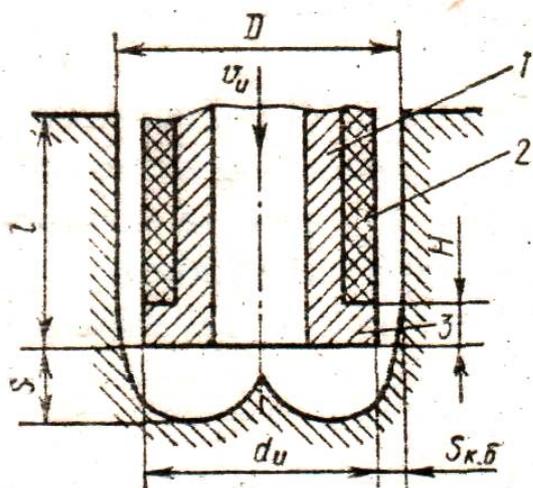


Рис. 3.12.

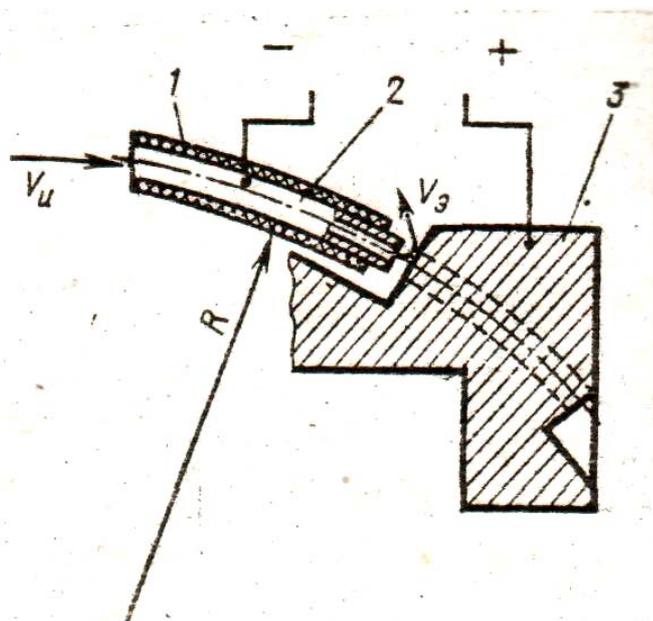


Рис. 3.13.

Для этого электрод-инструмент 1 подают к заготовке 2 по радиусу. Для устранения конусности отверстия электрод-инструмент 1 следует покрыть слоем изоляции. Скорость прошивания таких отверстий  $v_u = 0,03$  мм/с, глубина прошивания может в 30 раз превышать его диаметр.

Электрохимическое разрезание заготовок возможно производить по схемам [1]:

- электродом-инструментом в виде тонкого металлического диска (см. с. 63, рис. 3.14, а);
- при использовании непрофилированного электрода-проволоки (рис. 3.14, б).

При разрезании по схеме «а» металлическому диску сообщают вращение со скоростью 30...40 м/с, а электролит подают в зону разрезания поливом. Анодное растворение происходит без заметного усилия на заготовку, поэтому можно разрезать с высокой точностью и без деформаций тонкие ажурные детали. Скорость разрезания может достигать 0,2...0,3 мм/с при погрешности обработки не более 0,1 мм.

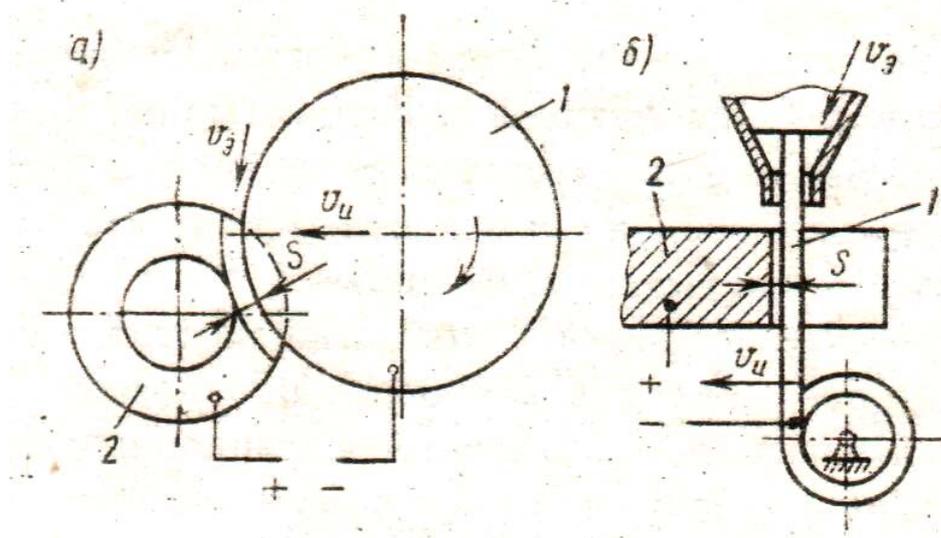


Рис. 3.14.

При использовании непрофилированного электрода-проволоки (рис. 3.14, б) последнему сообщают постоянное перемещение со скоростью подачи  $v_u$ , а электролит прокачивают под давлением через зону разрезания. Скорость разрезания может достигать 0,2 мм/с, ширина паза 0,5...5 мм, толщина разрезаемого металла 0,1...20 мм, погрешность ширины паза не более 0,1 мм.

Достоинством данного метода разрезания является не только отсутствие заусенцев, но и наличие округления на прорезанных кромках радиусом до 0,5 мм.

*Электрохимическое полирование* может выполняться по двум вариантам:

- в стационарном электролите (см. с. 52, раздел 3.1);
- в проточном электролите.

Полирование в проточном электролите осуществляется для обработки предварительно формообразованных поверхностей сложного профиля неподвижным катодом-инструментом. Последний устанавливают с малым зазором над обрабатываемыми поверхностями заготовки и, прокачивая электролит через рабочую зону, интенсифицируют процесс анодного растворения за счет высокой плотности тока и обеспечивают достаточно высокую размерную точность. Этот метод получил название «анодно-гидравлическое размерное полирование» (АГРП).

Применение АГРП для окончательной отделки наружных поверхностей шатунов высоконагруженных двигателей внутреннего сгорания на Челябинском тракторном заводе взамен применявшегося режущего абразивного полирования обеспечило [15]:

- повышение производительности не менее чем в 2 раза;
- уменьшение шероховатости обработанных поверхностей;
- снижение погрешностей формы поверхностей деталей на 28,6%;
- повышение усталостной прочности шатунов на 25%.

### 3.3. Оборудование и инструмент

#### 3.3.1. Типовая структура оборудования

Типовая структура оборудования для ЭХО включает в себя:

- электрохимический станок, осуществляющий технологическую операцию;
- источник питания технологическим током (ИП) с токоподводами, которые обеспечивают подачу напряжения на электроды;
- оборудование для хранения, подачи, очистки и регулирования параметров электролита;
- систему управления работой электрохимического станка;
- технологическую оснастку для установки, базирования и крепления заготовок и ЭИ;
- устройства для отсоса из электрохимического станка выделяемых при работе газообразных продуктов, промывки заготовок и деталей (узлов) станка от остатков электролита, сушки обработанных и промытых заготовок, а при необходимости и их пассивации (в число таких устройств может входить и оснастка для подачи в рабочую зону сжатого воздуха или газа).

На рис. 3.15 приведена структурная схема перечисленных средств технологического оснащения для ЭХО.

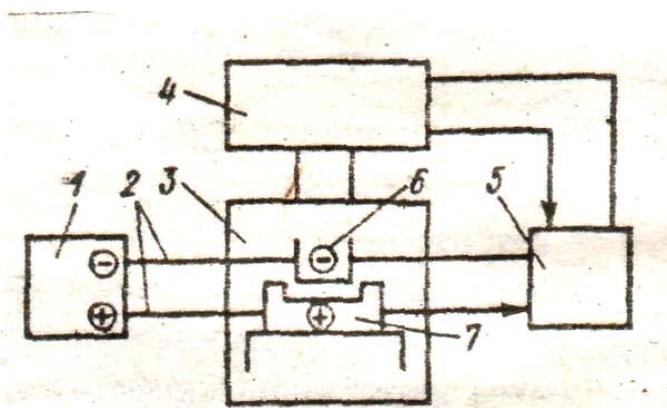


Рис. 3.15

*Электрохимические станки.* По компоновке их подразделяют на станки с вертикальным (как правило, универсальные и специализированные) и горизонтальным (чаще специальные) перемещением рабочих органов. Станки с вертикальной компоновкой имеют станину консольной или порталной формы.

В табл. 3.1 (см. с. 65) приведены технические характеристики некоторых универсальных

электрохимических станков копировально-прошивочного назначения с вертикальной компоновкой. На них выполняют объемное копирование и электрохимическое прошивание, которые являются наиболее распространенными операциями при ЭХО.

Большую группу электрохимических станков специального назначения составляют станки для ЭХО профильной части турбинных лопаток различных типоразмеров, изготавливаемых из нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов. Созданы и применяются электрохимические станки для обработки поочередно каждой стороны (вертикальная компоновка) и одновременно обеих сторон (горизонтальная компоновка) профильной части лопаток при большой их длине ( $\geq 1$  м).

Таблица 3.1

Основные технические характеристики универсальных  
копировально-прошивочных станков для ЭХО

Модель	Размеры поверхности стола, мм	Максимальная площадь обработки, см <sup>2</sup>	Максимальная производительность, мм <sup>3</sup> /мин	I, А	Точность обработки, мм	Площадь, занимаемая станком и комплектующими, м <sup>2</sup>
4420ФЦ	200×320	15	600	320	0,02...0,05	5,4
4421	320×400	75	3200	1600	0,05...0,15	12,8
4421ФЦ	320×400	80	3200	1600	0,03...0,08	15
4422	250×400	150	6500	3200	0,05...0,3	19
4А423ФЦ	400×630	300	6000	3200	0,04...0,1	22
4424	630×1000	600	40000	12500...25000	0,1...0,5	50
СЭП-902П	400×450	15			0,02...0,05	5

Примечание. Изготовитель станков — Троицкий станкостроительный завод.

*Источники питания (ИП).* Они являются преобразователями переменного тока в постоянный ток и обеспечивают подачу напряжения на электроды электрохимического станка. В отдельных случаях при ЭХО применяют ток переменного (импульсного) напряжения. Сила тока при ЭХО может достигать 30000 А, а напряжение — 30 вольт.

Применяют электромеханические и статические ИП. Электромеханические (машинные) ИП имеют механически связанные между собой электродвигатель и генератор. Генератор вырабатывает ток необходимого напряжения. Такие ИП имеют низкий КПД и являются источниками повышенного шума. Статические ИП работают на кремниевых выпрямителях и обладают по сравнению с машинными ИП повышенным КПД, компактностью и бесшумностью в работе.

Источники питания выпускают нереверсивными (ВАК) и реверсивными (ВАКР). Реверсивные ИП позволяют изменять полярность напряжения на выходе. Выпрямители ВАК и ВАКР являются регулируемыми по величине напряжения. Статические выпрямители ИПП — нерегулируемые.

При выполнении ЭХО в непрерывном или импульсном режиме применяют источники питания серии ИПТУ. В них предусмотрено плавное регулирование напряжения или тока с помощью тиристорного регулятора, а

также получение импульсного тока с регулируемой скважностью импульсов. При таком режиме напряжение подают отдельными импульсами. В паузах между импульсами межэлектродный промежуток освобождается от шлама и выравнивается температура электролита. Одновременно с этим снижается скорость съема металла, поэтому для компенсации уменьшения производительности источники ИПТУ позволяют повышать плотность тока в момент подачи импульса. За счет этого повышается качество обработанной поверхности и точность формообразования.

К оборудованию для хранения, подачи и регулированию параметров электролита относятся ванны и агрегаты для очистки электролита.

Ванны служат для хранения и приготовления электролита, промывки, консервации и пассивации деталей. Форма и размеры ванн для хранения электролита обусловлены необходимостью отстоя продуктов обработки, периодического их удаления, стабилизации температуры жидкости. В ваннах устанавливают теплообменники для подогрева и охлаждения электролита. Регулирование температуры и состава жидкости осуществляют автоматическими системами.

Ванны обычно изготавливают из нержавеющей сталей или химически стойких диэлектриков. Они могут иметь одну или несколько секций. Для удобства транспортировки и монтажа ванны вместимостью до 1,5 м<sup>3</sup> обычно делают односекционными. Более вместительные ванны изготавливают двухсекционными. На ванны обычно монтируют рабочие насосы и другие агрегаты для подачи электролита.

При ЭХО в электролите происходит накопление продуктов обработки. При малых межэлектродных зазорах в загрязненном электролите между электродом-инструментом и деталью может происходить пробой промежутка и короткое замыкание. При нормальном протекании процесса ЭХО допустимая массовая концентрация твердых продуктов обработки в электролите зависит от размера зазора МЭП:

Зазор МЭП, мм	≥ 0,05	≥ 0,2	≥ 0,3	≥ 0,5
Допустимая концентрация продуктов обработки, кг/м <sup>3</sup>	0,5	3	6	10

Очистка электролита может выполняться несколькими способами. Например, центрифугированием, очисткой прессфильтрами и вакуумными фильтрами, осаждением продуктов обработки методом отстоя с использованием коагуляторов или без них.

На практике наиболее часто применяют дешевый и экономичный метод отстоя. Для этого над рабочей ванной монтируют специальную отстойную ванну, в которую по окончании работы станка в конце рабочей смены перекачивают весь электролит. Последний в течение нерабочей смены отстаивается и перед началом работы станка сливается в рабочую ванну, а скопившийся шлам из отстойной ванны под собственным весом перетекает в мусоросборник.

Для предохранения от коррозии обработанные детали первоначально промывают в проточной воде, а затем пассивируют в специальных пассивирующих растворах. Для пассивирования конструкционных легированных сталей рекомендуют водный раствор:  $\text{NaNO}_2$  — 3...5% и  $\text{CaCO}_3$  — 1,5%. Хороший пассивирующий эффект достигается при добавлении в состав электролита для ЭХО конструкционных сталей 3...5% эмульсола.

### 3.3.2. Электроды-инструменты

*Материалы.* Для электродов-инструментов необходимо выбирать сплавы, обладающие коррозионной стойкостью, высокой электропроводностью, хорошей сопротивляемостью местному разрушению при коротких замыканиях, высокой адгезией к диэлектрическим покрытиям, достаточной механической прочностью и обрабатываемостью, низкой стоимостью. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют медь, медные сплавы, нержавеющие стали; в меньшей степени — титановые сплавы. Медь и ее сплавы имеют высокую электропроводность, свариваемость, удовлетворительную адгезию к покрытиям, достаточную механическую прочность. Главным их недостатком является высокая чувствительность к коротким замыканиям, при которых выплавляются большие участки рабочей поверхности, что затрудняет их восстановление. Если заготовку электрода-инструмента получают литьем, то в качестве материала используют латунь или бронзу.

Электроды-инструменты повышенной прочности изготавливают из нержавеющей сталей, например 12Х18Н9Т, которые не разрушаются при коротких замыканиях, имеют предел прочности в 2...3 раза выше, чем медь и обладают высокой адгезией к покрытиям. При этом следует учитывать низкую удельную электрическую проводимость (в 30...50 раз меньше, чем у меди). Поэтому контактные участки для подвода напряжения у таких инструментов должны быть большими.

При проектировании электродов-инструментов используются диэлектрические материалы в следующих исполнениях:

- в виде покрытий толщиной 0,05...0,5 мм;
- в виде механически обработанных конструктивных элементов (стержней, брусков, листов, плит), которые либо закрепляются на обрабатываемой поверхности, либо составляют часть электрода-инструмента.

Покрытия должны обладать высокой адгезией к металлам, механической прочностью, хорошей износостойкостью в условиях трения, стабильными диэлектрическими свойствами. Технология нанесения их на поверхность металла должна быть простой. Покрытия должны создавать плотную беспористую пленку, исключая проникновение электролита к металлу, не разбухать под действием жидкости. В качестве покрытий используют эпоксидные смолы, лаки, керамические эмали, капрон в порошке, полиэтилен. Поверхность детали предварительно обрабатывают для

повышения шероховатости: царапают металлическими щетками, обдувают дробью, накатывают канавки.

Смолы, лаки и эмали наносят кистями, распылителями или окунанием. Капрон, полиэтилен, другие пластмассы наносят в так называемом псевдокипящем слое (рис. 3.16). Для этого покрытие в виде порошка 2 помещают на сетку 3. Деталь 1 нагревают до температуры на 40...45°C выше температуры плавления материала покрытия и подвешивают над слоем порошка. Снизу сетки подают сжатый воздух, который распыляет порошок, и он совершает движения, как при кипении. Порошок касается нагретой поверхности детали и плавится на ней ровным плотным слоем небольшой толщины. Чем мельче частицы покрытия, тем тоньше можно получить слой на поверхности. Очень эффективно использование в качестве изоляционного покрытия оксидной пленки металла электрода-инструмента, полученной непосредственно на электроде путем его специальной термообработки.

Если покрытия наносят на нерабочие поверхности электрода-инструмента, то обычно используют специальную резину с повышенной адгезией к металлам, пластмассу типа АСТ-Т, стиракрил. Для улучшения адгезии перед нанесением покрытий в детали 1 (рис. 3.17, а) предварительно сверлят отверстия 2 под различными углами к поверхности. Покрытие 3 заполняет отверстия и прочно удерживается на детали. Иногда в отверстия запрессовывают короткие штифты 4 (рис. 3.17, б), которые также служат для закрепления покрытия.

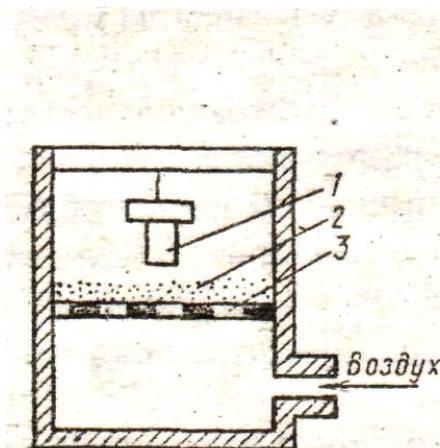


Рис. 3.16

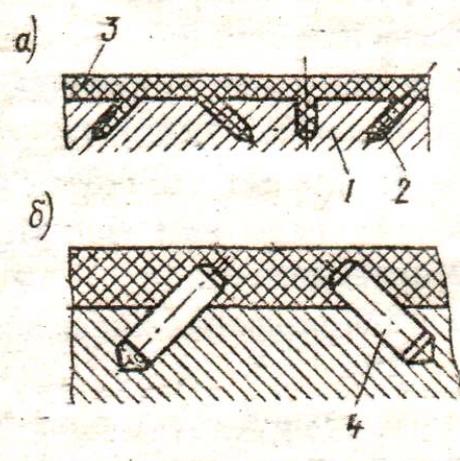


Рис. 3.17

*Особенности проектирования и изготовления.* Электроды-инструменты для схем прошивания и копирования проектируют и изготавливают, как правило, для каждого типоразмера детали. Точность формы и размеров его рабочего профиля должна быть на один квалитет выше, чем обрабатываемой детали. Шероховатость поверхности рабочей части не влияет на качество обрабатываемой поверхности, но определяет характер течения электролита, интенсивность загрязнения зазора продуктами об-

работки. Шероховатость рабочих поверхностей должна быть  $R_a \leq 2,5$  мкм. Для снижения износа диэлектрических направляющих электродов-инструментов, например при прошивании, шероховатость их поверхностей снижают до  $R_a \leq 1,25$  мкм. При проектировании электродов-инструментов необходимо предусмотреть, чтобы электролит протекал плавно, без резких поворотов, поскольку это приводит к срывам потока и появлению местных необработанных участков. При разработке рабочей части следует учитывать возможность многократной ее корректировки по результатам экспериментов и оставлять припуск для ремонта после коротких замыканий.

Электроды-инструменты проектируют по результатам расчета профиля рабочей части. При проектировании электрода-инструмента необходимо рассчитать форму рабочей поверхности электрода-инструмента, а также положение щелей и отверстий для подвода электролита в зону обработки. Чтобы определить форму рабочей поверхности, сначала по чертежу обрабатываемой поверхности детали строят эквидистантный профиль электрода-инструмента с зазором, равным установившемуся зазору. Далее находят действительную форму электрода-инструмента. Известны аналитические и производственные методы нахождения размеров электрода. При этом аналитические методы нахождения формы электрода-инструмента не учитывают гидродинамики потока электролита, изменения его температуры и других факторов, поэтому расчет и моделирование дают приближенные результаты. Их уточняют путем экспериментов на промышленном оборудовании. В производстве используют два метода:

- метод обратного копирования;
- метод последовательных приближений.

При методе *обратного копирования* электрод-инструмент выполняют с помощью ЭХО, где в виде инструмента используется выполненная слесарно-механическим методом модель детали. Метод дает хорошие результаты при небольшой толщине слоя металла, удаляемого с рабочей части электрода-инструмента при схеме обработки с неподвижными электродами. При удалении значительных припусков этот метод может использоваться для предварительной обработки.

Окончательную доводку рабочего профиля электрода-инструмента выполняют методом *последовательных приближений* путем уточнения формы после обработки пробной партии деталей. Уточнение ведут до получения деталей, соответствующих требованиям чертежа.

*Электроды-инструменты для схемы разрезания* рассчитывают, исходя из обеспечения требуемой жесткости, так как колебания электрода в прорезаемом пазу вызывают прижоги на заготовке. Электрод-инструмент выполняют в форме диска с буртиком на его периферии. На боковые поверхности диска наносят слой диэлектрика.

При разрезании заготовок непрофилированным электродом-инструментом используют проволоку 0,2...2,0 мм из латуни или стержни

диаметром 0,5...2,5 мм из вольфрама, латуни. Использование проволоки предпочтительнее — за счет более высокой жесткости она обеспечивает повышенную точность реза [1].

### 3.3.3. Электролиты

При ЭХО в качестве электролитов применяют водные растворы солей, кислот и щелочей. В процессе ЭХО при высоких плотностях тока электролиты обеспечивают прохождение электрического тока между электродами, способствуют течению требуемых химических реакций на поверхностях электродов и, протекая через МЭП, уносят из него продукты растворения, поддерживая тем самым постоянство концентрации взаимодействующих частиц на всех участках МЭП.

Для получения высоких технологических показателей ЭХО необходимо, чтобы электролиты соответствовали следующим требованиям:

- полное или частичное исключение побочных реакций, снижающих выход по току;

- анодное растворение металла заготовки только в зоне обработки, исключая растворение необрабатываемых ее поверхностей, т.е. наличие высоких локализирующих свойств;

- обеспечение протекания на всех участках обрабатываемой поверхности заготовки электрического тока расчетного значения.

Электролитов универсального назначения, соответствующих всем перечисленным требованиям, не существует; при их выборе в первую очередь учитывают требования, являющиеся обязательными для выполнения заданной операции ЭХО. Так, при необходимости увеличения скорости анодного растворения металла заготовки применяют электролиты с большой удельной проводимостью. При повышенных требованиях к точности обработки необходимо использовать электролиты с повышенными локализирующими свойствами (хотя при этом и снижается скорость анодного растворения).

Электролиты могут состоять из одного или нескольких компонентов (однокомпонентные и многокомпонентные). Состав и концентрацию электролита подбирают в зависимости от физико-химических свойств материала обрабатываемой заготовки и технических требований, предъявляемых к выполняемой операции.

Электролит должен иметь невысокую вязкость, что облегчает его прокачивание через МЭП и ускоряет тепло- и массоперенос. Он должен быть безвредным для обслуживающего персонала, взрыво- и пожаробезопасным, а также обладать невысокой коррозионной активностью.

Наиболее распространенными электролитами являются нейтральные растворы неорганических солей: хлориды, нитраты и сульфаты натрия и калия. В эти растворы добавляют: борную, лимонную или соляную кислоты (в целях уменьшения защелачивания электролита); ингибиторы коррозии (нитрит натрия); активирующие вещества, снижающие пассиви-

рующее действие оксидной пленки; поверхностно-активные вещества (ПАВ), снижающие гидравлические потери и устраняющие кавитационные явления (в качестве ПАВ применяют, например, различные моющие жидкости); коагуляторы, способствующие скорейшей очистке электролита за счет ускорения осаждения шлама (в качестве коагулятора часто используют добавку в электролит 1...5 г/л полиакриламида) [2].

Электролиты характеризуются следующими показателями:

— концентрацией выражающейся в объемном (%) или весовом отношении (г/л);

— электропроводностью, отражающей способность электролита проводить электрический ток и являющейся величиной, обратной электрическому сопротивлению;

— водородным показателем или так называемым «рН» электролита, которое характеризует концентрацию ионов водорода в данном электролите. При ЭХО нержавеющих и инструментальных сталей рН электролита выдерживают в пределах 7...8, а при ЭХО жаропрочных сплавов в пределах 7...9. При превышении предельных значений рН резко снижается производительность ЭХО и ухудшается шероховатость обработанных поверхностей.

В таблице 3.2 приведены данные по составу наиболее часто применяемых электролитов при ЭХО.

Таблица 3.2

Рекомендуемые компоненты электролитов для ЭХО  
некоторых металлов и сплавов [7]

Обрабатываемый материал	Компонент	Содержание компонента, г/л	Локализирующая способность	
1	2	3	4	
Углеродистые стали; легированные стали	NaCl	100...200		
Нержавеющие стали (12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т и др.)	NaCl	100...200	Слабая	
	KCl	150...200		
Инструментальные стали (5ХНВА, 3Х2В8, 5ХНВ и др.)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	150	Высокая	
	NaCl	100...200	Слабая	
	NaCl	150...200	Средняя	
	NaNO <sub>3</sub>	20...100		
	NaNO <sub>3</sub> (KNO <sub>3</sub> )	150...250		
Жаропрочные сплавы (ЭИ617, ЭИ929А, ЖС6КП и др.)	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50...100	Высокая	
	NH <sub>4</sub> Cl	10...50		
	NaCl	50...200		Слабая
	NaCl	50...150		Средняя
NaNO <sub>3</sub>	20...50			
	NaNO <sub>3</sub>	100...300		

Марганцовистые стали (30X10Г10 и др.)	NaCl	180...200	Слабая
Магнитные сплавы (ЮНДК, АНКО-5 и др.)	NaNO <sub>3</sub> NaCl	150	Высокая
Титановые сплавы (BT8, BT3-1)	NaCl	100...200	Слабая
	NaCl	80	Средняя
	KNO <sub>3</sub>	120	
Твердые сплавы (BK6, BK15 и др.)	NaCl	100	Средняя
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	50	
	NaOH	80	
	NaH <sub>4</sub> F	120	
Алюминиевые сплавы	NaNO <sub>3</sub>	100...300	Высокая

#### 4. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Комбинированными (КМО) называют такие методы, в которых процесс преобразования или удаления обрабатываемого материала происходит в результате одновременного протекания двух и более воздействий, осуществляемых каждым по своему механизму. Примерами могут служить сочетания воздействий: электрохимического и механического; электроэрозионного и электрохимического; ультразвукового и механического и т.д.

Производительность КМО, как правило, значительно выше суммы производительностей каждого метода, взятого отдельно. Так, по сравнению с абразивной обработкой электроабразивное и электроалмазное шлифование повышают производительность обработки в 3...5 раз, электроэрозионно-абразивное в 2...3 раза, электроэрозионно-химическое в 8...10 раз. При совмещении ЭЭО и ЭХО производительность повышается в несколько десятков раз по сравнению с ЭЭО. Плазменный нагрев и механическое резание в 3...5 и более раз производительнее механического резания [7].

Наибольшее распространение получили электрохимикомеханическая и анодно-механическая обработка.

##### 4.1. Электрохимикомеханическая обработка

К электрохимикомеханическим способам относится алмазно-абразивная электрохимическая обработка (АЭХО) электроактивными (токопроводящими) и электронейтральными инструментами.

Наиболее распространенными способами АЭХО являются электроалмазное и электроабразивное шлифование. Металл анода на этих опе-

рациях снимается токопроводящими алмазно-абразивными кругами в результате электрохимического растворения и абразивного шлифования.

На рис. 4.1 показана схема электроабразивного круглого шлифования. Токопроводящий абразивный круг 3 скользящим контактом 2 соединен с отрицательным полюсом источника 1 постоянного тока. Обрабатываемая заготовка 4 присоединяется к положительному полюсу. Резистор 5 позволяет регулировать силу тока в цепи. В зону обработки подается электролит, имеющий высокую локализацию процесса растворения, например  $\text{NaNO}_3$  — 6%,  $\text{NaNO}_2$  — 2%.

На рис. 4.2 показана схема процесса электроабразивной обработки. Электроабразивный круг состоит из абразивных зерен 1 и связки 2. В зазор 4, образуемый абразивными зернами, непрерывно подается рабочая жидкость 6. При прохождении электрического тока заготовка-анод 3 подвергается анодному растворению с образованием пленки 5 с высоким электрическим сопротивлением. При вращении круга абразивные зерна удаляют продукты анодного растворения с заготовки и увлекают частицы электролита, непрерывно обновляя его в рабочей зоне. Межэлектродный зазор между анодом и катодом обеспечивается абразивными (алмазными) диэлектрическими зернами. В зазор подается электролит, содержащий свободные ионы натрия, нитрата, гидроксила и др. Под воздействием электрического тока усиливается диссоциация молекул электролита и химическое взаимодействие свободных ионов с анодом. В результате на катоде выделяется водород, а на деталях образуется пленка окислов и гидратов окислов металла — анода.

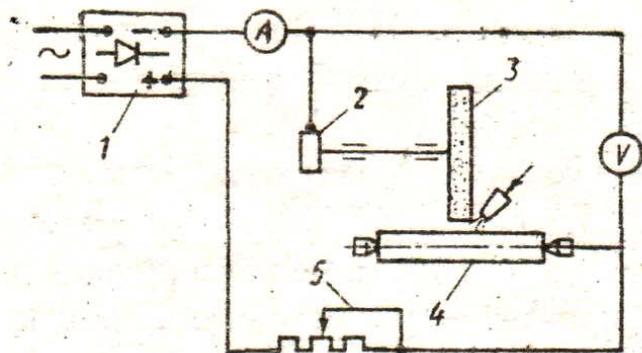


Рис. 4.1

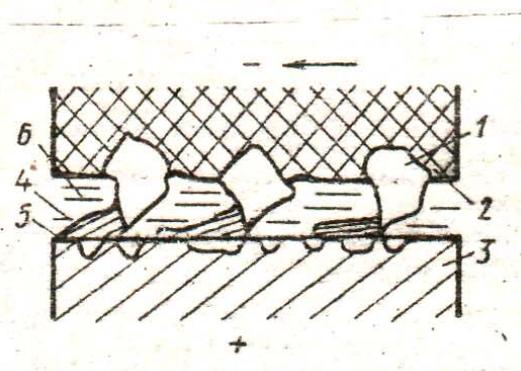


Рис. 4.2

Пленка, образующаяся на поверхности детали, пассивирует электрод и тормозит процесс дальнейшего растворения анода. Однако абразивные зерна катода, вращающегося с большой скоростью, разрушают эту пленку, и процесс анодного растворения обрабатываемой детали продолжается. В процессе обработки токопроводящая связка шлифовального круга может касаться обрабатываемой поверхности детали. При этом в точке касания возникают контактно-дуговые (эрозионные) разряды, частично принимающие участие в разрушении соприкасающихся электродов.

Таким образом, процесс анодного растворения в условиях АЭХО токопроводящим кругом интенсифицируется благодаря механической и эрозионной депассивации анодной поверхности. Степень депассивации возрастает с увеличением скорости подачи в процессе обработки.

Положительная роль контактно-дуговых процессов заключается в эрозионном разрушении стружки и микровыступов связки круга, отрицательная — в увеличении удельного износа алмазного инструмента и ухудшении качества поверхности.

Процесс резания металла при АЭХО осуществляется в необычных условиях. Прежде всего, в качестве смазочно-охлаждающей жидкости используется электролит, а на обрабатываемой поверхности находятся аморфные продукты растворения и адсорбированного газа, снижающие коэффициент трения соприкасающихся пар (абразив-металл). Ускоренное растворение различных легирующих элементов в составе обрабатываемых материалов и адсорбционное снижение прочности ослабляют кристаллическую решетку металла. Все это приводит к существенному снижению составляющих силы резания, а совмещение зон резания и анодного растворения уменьшает эффективную мощность шлифования при одновременном увеличении удельного съема металла над суммой съемов каждого из слагаемых процесса.

В общем случае линейная скорость съема металла при АЭХО может быть представлена как сумма трех составляющих — механической, электрохимической и электроэрозионной. На сегодня строгое количественное разделение и оценка каждого из входящих в АЭХО не представляется возможным. Учитывая низкое рабочее напряжение (5...8 вольт) и высокую суммарную производительность процесса, электроэрозионным съемом металла можно, по-видимому, пренебречь. Доля электрохимического съема в общем съеме при наиболее распространенных режимах обработки составляет 40...60%.

Удельные затраты энергии на резание в условиях АЭХО в 2,5...3 раза ниже при обработке твердых сплавов и в 1,2...1,5 раза — при обработке сталей, чем при обычной алмазно-абразивной обработке. Уменьшение силы резания и температуры в зоне обработки при высокой производительности съема металла определили область использования АЭХО. Этот способ нашел широкое применение при обработке твердосплавного инструмента на всех стадиях его механической обработки: операциях чернового, чистового и доводочного шлифования.

Доля электрохимического съема металла зависит от многих факторов, в том числе и от силы тока. На силу тока при прочих постоянных условиях в значительной мере влияет сопротивление межэлектродного промежутка, которое определяется видом металлической связки круга, размером абразивных (алмазных) зерен, составом электролита и др.

Зернистость круга определяет величину зазора между анодом и катодом, оказывая большое влияние на интенсивность протекания электро-

химического процесса. Одновременно зерна круга сами являются режущими элементами, и их величина оказывает влияние на долю механического съема металла. Шероховатость поверхности при АЭХО меньше, чем при обычном алмазно-абразивном шлифовании, и практически мало зависит от зернистости круга. Это значит, что увеличение зернистости в некоторых пределах повышает производительность и не увеличивает шероховатость. На основании экспериментальных данных, экономического анализа и производственного опыта для АЭХО рекомендуются круги зернистостью 250/200 и 200/160, обеспечивающие наивысшую производительность и наименьшую себестоимость обработки.

Токопроводящая связка круга является одним из факторов, влияющих на омическое сопротивление цепи, а, следовательно, и на эффективность электрохимического растворения. Кроме того, вид связки определяет способность ее удерживать зерна круга. Максимальную производительность круга при минимальном износе показывают связки МВ1 и М013Е. Кроме связок на металлической основе, используются абразивные шлифовальные круги на токопроводящей графитовой основе, в основном, на чистовых и доводочных операциях.

Для алмазных кругов важным показателем является количественное соотношение между зернами и связкой. Заводами выпускаются круги с 25, 50, 100, 150%-ной концентрацией алмазов. За 100%-ную концентрацию условно принято содержание 4,4 карата алмаза в 1 см<sup>3</sup> алмазного слоя, что занимает около 25% его объема. Наибольшая скорость съема достигается при работе алмазными кругами 100%-ной концентрации, которые достаточно полно обеспечивают сочетание механического резания и процесса электрохимического растворения.

Форма круга выбирается в соответствии с технологической операцией. Следует иметь в виду, что производительность процесса АЭХО возрастает с увеличением площади соприкосновения круга с деталью. Наибольшая площадь соприкосновения наблюдается при работе торцом шлифовального круга. Поэтому предпочтительной формой алмазного круга при АЭХО является чашкообразная (форма АЧК). Используя круги формы АЧК на операциях заточки твердосплавного инструмента, добиваются самой высокой производительности (до 1000 мм<sup>3</sup>/мин при шероховатости поверхности до  $R_a = 0,32 \dots 0,08$ ).

На производительность АЭХО в значительной степени влияет электропроводность электролита и его состав. В настоящее время в литературе рекомендовано огромное количество различных составов электролитов. В производстве чаще всего используются водные растворы солей натрия.

На практике для осуществления электрохимического растворения в процессе АЭХО применяют рабочее напряжение в пределах 6...10 вольт. При выборе величины рабочего напряжения учитывают ряд факторов. Очень важно исключить возможность интенсивного искрообразования.

Электроэрозионные процессы увеличивают износ круга и ухудшают качество обработанной поверхности.

Механические режимы АЭХО определяются скоростью шлифовального круга, давлением обрабатываемой детали на круг или глубиной резания и скоростью продольного перемещения детали относительно круга. На основании научных исследований и опыта производства скорость шлифовального круга при абразивно-алмазной электрохимической обработке (АЭХО) находится в интервале 25...30 м/с, величина удельного давления 5...10 кг/см<sup>2</sup>, а скорость продольного перемещения детали относительно круга 4...6 м/мин [8].

Наибольшее распространение данный метод шлифования получил при электроалмазной заточке режущей части инструментов с напаянными пластинами из твердого сплава (резцов, ножей торцовых и дисковых фрез и др.).

Достоинством такой заточки является то, что рабочая поверхность алмазного круга не засаливается, как это происходит при традиционной алмазной заточке при одновременной обработке твердосплавной пластины и стальной державки. Это позволяет исключить предварительную заточку державки абразивным кругом [2].

По сравнению с обычным абразивно-алмазным шлифованием производительность АЭХО повышается в 2...3 раза, сокращается расход кругов в 3 раза. За счет повышения качества обработанных поверхностей и отсутствия дефектного слоя на режущих поверхностях заточенного инструмента на 30% повышается его стойкость [8].

Электроалмазное хонингование и суперфиниширование применяют для повышения производительности (до 15 раз) при отделке плоских поверхностей и отверстий (хонингование) и круглых наружных поверхностей (суперфиниширование). Наибольшее распространение получили схемы обработки электронейтральными абразивными или алмазными брусками при подводе тока и электролита через дополнительный катод. На рис. 4.3 (см. с. 77) представлена схема электроабразивного (электроалмазного) хонингования цилиндрического отверстия электронейтральными абразивными (алмазными) брусками. Схема электроалмазного суперфиниширования с дополнительным катодом показана на рис. 4.4 (см. с. 77) (1 — источник постоянного тока, 2 — обрабатываемая деталь, 3 — алмазные нетокопроводящие бруски, 4 — дополнительный катод).

При электроалмазном хонинговании и суперфинишировании основной припуск удаляется за счет анодного растворения материала заготовки, а роль абразивных или алмазных зерен сводится к механической депассивации обрабатываемой поверхности. Поскольку в процессе депассивации режущие зерна практически не контактируют с основным материалом заготовки, использование алмазных брусков не приводит к их засаливанию, а стойкость их по сравнению с абразивными брусками возрастает многократно. Шероховатость поверхности после обработки составляет

0,04...0,16 мкм, а отклонение от круглости и цилиндричности достигает 0,8...2 мкм.

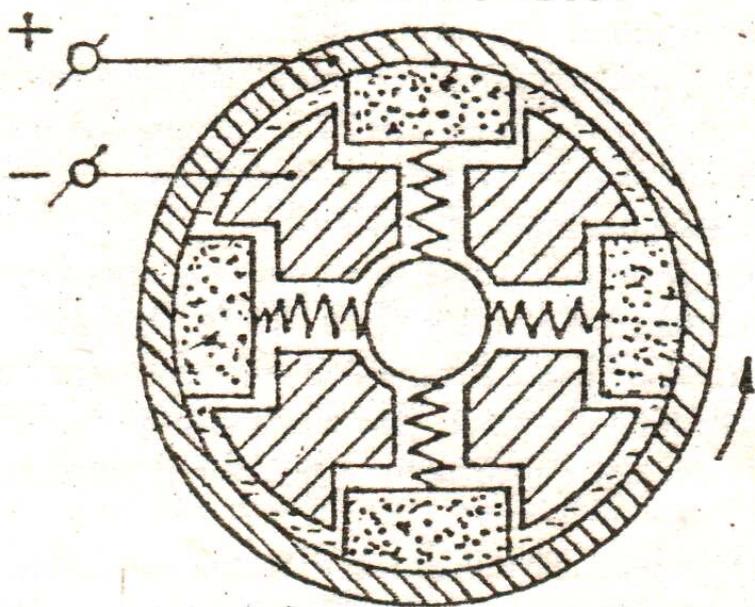


Рис. 4.3

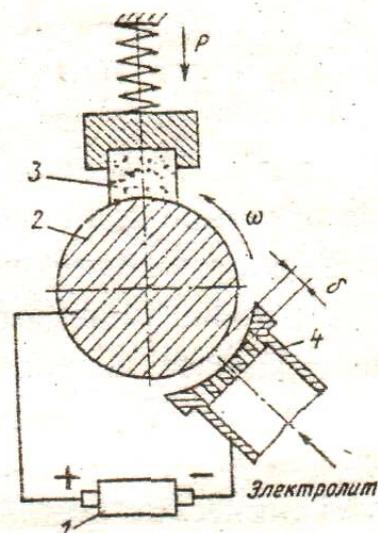


Рис. 4.4

#### 4.2. Анодно-механическая обработка

Анодно-механическая обработка представляет собой такой комбинированный метод, при котором в рабочей зоне осуществляются электроэрозионные, электрохимические процессы, а также механическое трение инструмента с заготовкой. При этом совмещение процессов ЭЭО и ЭХО обуславливается величиной рабочего напряжения; с повышением напряжения и увеличением удельной мощности, подводимой в зону обработки, процесс смещается в сторону электроэрозионного, а при снижении напряжения и подводимой мощности — в сторону электрохимического.

Наибольшее распространение данный метод получил при резке заготовок из жаропрочных, титановых, кислото- и коррозионностойких сплавов, трудно поддающихся обработке резанием. Производительность анодно-механической резки превышает производительность резки механическим способом в 5...6 раз. В качестве ЭИ может применяться металлический диск или металлическая лента. На рис. 4.5 (см. с. 78) представлена схема анодно-механической резки дисковым ЭИ.

Разрезаемую заготовку 1 устанавливают на станке неподвижно, а дисковому электроду 2 сообщают главное движение — вращение диска и движение подачи. В процессе обработки обрабатываемая заготовка является анодом, а обрабатывающий инструмент катодом. В зону обработки поливом подают электролит, представляющий собой 20...30% водный раствор жидкого стекла  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; рабочее напряжение 23...25 вольт. Резка металла сопровождается интенсивным образованием искр, которые выбрасываются из зоны резания. Эти искры представляют собой частицы рас-

плавленного металла в оболочке жидкого стекла. При анодно-механической резке в отличие от обработки резанием твердость и механические свойства обрабатываемого материала практически не влияют на интенсивность процесса обработки.

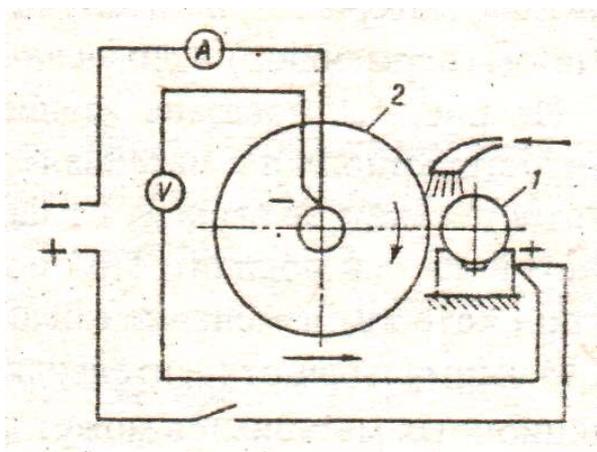


Рис. 4.5

На производительность процесса резки существенно влияет скорость главного движения электрода-инструмента. Оптимальный интервал скорости главного движения — от 15 до 25 м/с. При малой скорости вращения инструмента уменьшается количество электрических разрядов, а при большей — сокращается продолжительность их воздействия. В том и другом случае производительность резко уменьшается. Нормальный режим обра-

ботки предусматривает также и оптимальное давление электрода-инструмента на разрезаемую заготовку. Давление инструмента на заготовку должно находиться в интервале 0,08...0,2 МПа [2].

Использование жидкого стекла в качестве электролита вызывает определенные затруднения при эксплуатации анодно-механических станков, т.к. капли жидкого стекла, попадая на поверхности станка и технологической оснастки, при высыхании затвердевают, и для их удаления требуется применение либо пара, либо горячей воды.

## 5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

### 5.1. Физическая сущность

Физическая сущность всех разновидностей ультразвуковой обработки (УЗО) основана на использовании ультразвуковых колебаний материальных сред, совершаемая с частотами выше порога слышимости ( $> 16$  кГц). Получение ультразвуковых колебаний основано на явлении магнитострикции, при котором происходит удлинение или укорочение некоторых материалов под действием внешнего магнитного поля. Магнитострикцией обладают все ферромагнитные материалы, но наилучшими из них являются никель, сплав кобальта с железом (пермендюр) и сплав алюминия с железом (альфер).

На рис. 5.1 (см. с. 79) показана зависимость относительной деформации в куске магнитострикционного материала от напряженности магнитного поля «Н». Знак магнитострикции не зависит от направления магнитного поля, поэтому кривая симметрична оси ординат. При больших магнитных полях наступает насыщение, при котором изменение магнитного поля не влияет на величину деформации. Максимальная относительная де-

формация (при насыщении) для магнитоэлектрических материалов может достигать  $10^{-4}$  мм/мм.

Если стержень из магнитоэлектрического материала поместить в переменное магнитное поле, то в стержне возникнут механические колебания. Переменное магнитное поле можно создать, пропуская по обмотке электрический ток. При этом напряженность магнитного поля пропорциональна числу ампервитков.

Если создать переменное магнитное поле с амплитудой  $H_m$  (кривая 1, рис. 5.1), то максимальная деформация будет наблюдаться при

$$t = \frac{T}{4} \text{ и } t = \frac{3T}{4}$$

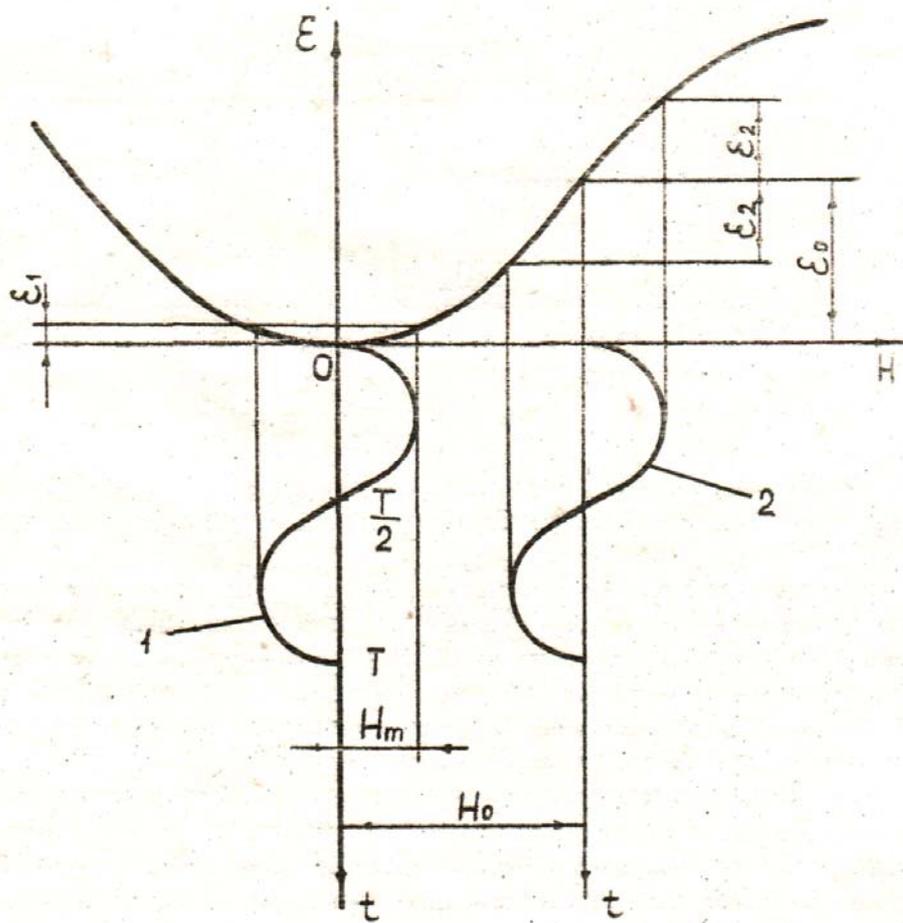


Рис. 5.1

Видно, что деформация одного знака, и равна  $\epsilon_1$ . Можно значительно увеличить амплитуду колебаний, если создать одновременно два магнитных поля — постоянное напряженностью  $H_0$  и переменное с той же амплитудой  $H_m$ . Суммарное магнитное поле описывается кривой 2 на рис. 5.1. Тогда в моменты времени

$$t = 0, t = \frac{T}{2} \text{ и } t = T$$

величина деформаций равна  $\varepsilon_0$ , при  $t = \frac{T}{4}$  имеем  $\varepsilon_0 + \varepsilon_2$ ,  
а при  $t = \frac{3T}{4}$  —  $\varepsilon_0 - \varepsilon_2$ .

На рис. 5.2 показаны 2-е кривые колебаний стержня из магнитоэлектрического материала:

- кривая 1, получаемая при создании только переменного магнитного поля;
- кривая 2, получаемая при одновременном действии двух магнитных полей — постоянного и переменного;

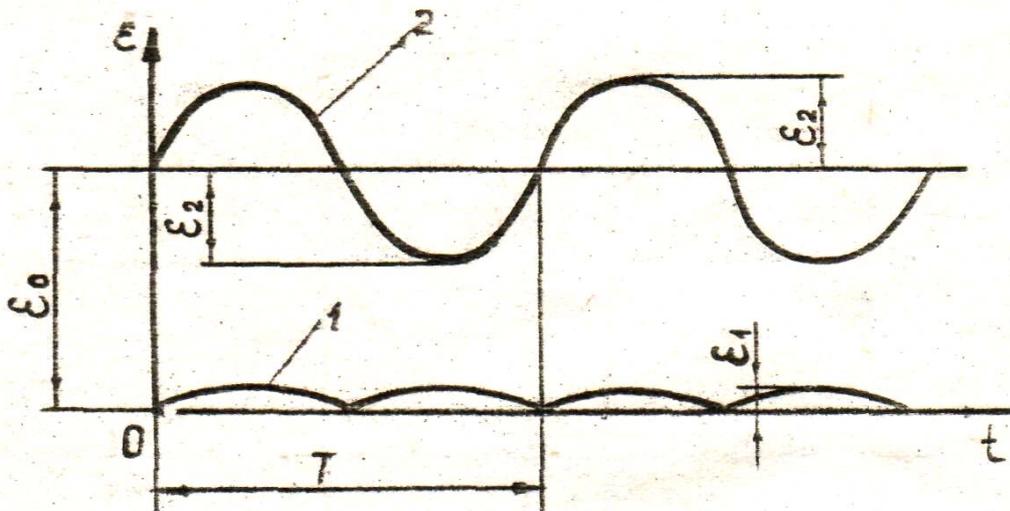


Рис. 5.2

Сравнение этих кривых показывает, что при действии двух магнитных полей амплитуда колебаний вышеуказанного стержня возрастает в несколько раз [8].

В ультразвуковой технике для превращения электрических колебаний в механические колебания используют так называемый магнитоэлектрический преобразователь. Преобразователь представляет собой устройство, состоящее из пакета пластин магнитоэлектрического материала с двумя электромагнитными обмотками, и служит для превращения электрической энергии ультразвуковой частоты в упругие механические колебания той же частоты (см. с. 81, рис. 5.3, а).

По одна обмотке пропускается переменным током, частота которого равна частоте возбуждаемого ультразвука, по второй пропускается постоянный ток. Суммарный магнитный поток, создаваемый обмоткой является униполярным, гармоническим и обуславливает характер деформации пакета, как показано штриховой линией на рис. 5.3, а.

Передача ультразвуковых колебаний в металлических стержнях и пакетах подчиняется синусоидальному закону и осуществляется со строго определенной скоростью, свойственной данному материалу или среде.

Скорость распространения звуковых волн «С» связана с длиной волны «λ» и частотой ультразвуковых колебаний «f» следующей зависимостью:

$$C = \lambda f, \text{ откуда } \lambda = \frac{C}{f}.$$

Таким образом, при передаче ультразвуковых волн в колебательной системе будут иметь место участки с нулевой деформацией и участки с максимальной деформацией. При этом участки с нулевой деформацией используют для крепления элементов системы, а участки с максимальной деформацией служат рабочими или передающими элементами ультразвуковой колебательной системы. Для увеличения амплитуды деформаций обеспечивают равенство между собственной частотой продольных колебаний пакета преобразователя и частотой возбуждающего магнитного поля. Характер распределения амплитуд колебательной системы по ее длине показан на рис. 5.3, б.

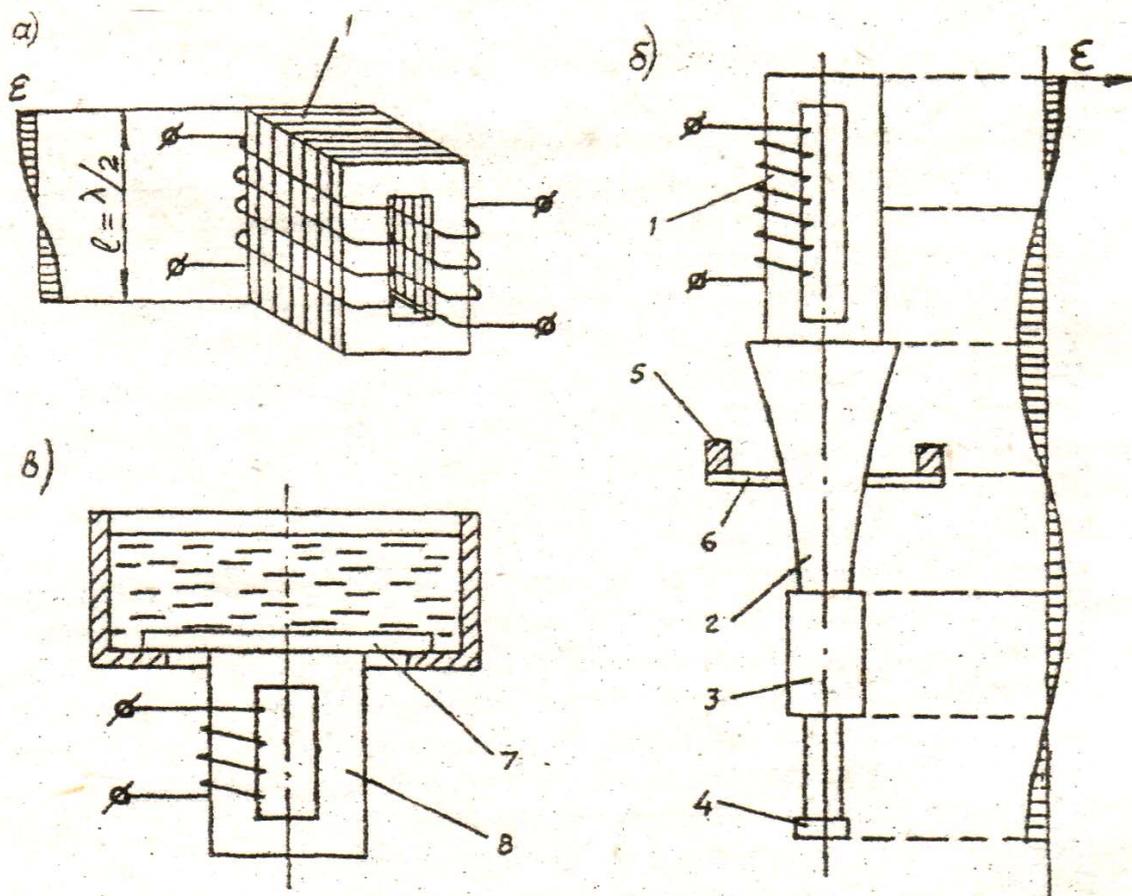


Рис. 5.3

Передача ультразвука от преобразователя осуществляется волноводами.

Для передачи ультразвука объекту небольших размеров (например, инструменту ультразвукового станка) используются волноводы в виде ря-

да последовательно соединенных стержней (рис. 5.3, б). Каждый стержень волновода представляет собой резонансное звено, его длина равна половине длины волны. Если такой стержень конусообразный, то амплитуда колебаний его тонкого конца будет больше амплитуды колебаний конца с большим диаметром.

Поскольку такие стержни увеличивают амплитуду колебаний. Их называют концентраторами. Магнитострикционный пакет (рис. 5.3, б), присоединенные к нему концентраторы 2, 3 и инструмент для обработки 4 составляют единую континуальную колебательную систему. Такая колебательная система крепится к корпусу 5 обычно при помощи диафрагмы 6 в том месте, где амплитуда колебаний в стоячей волне равна нулю, чтобы колебания не передавались на корпус.

Излучение ультразвука в жидкость осуществляется обычно волноводом, имеющим форму пластины (рис. 5.3, в). Продольные колебания закрепленного на пластине 7 магнитострикционного преобразователя 8 или группы преобразователей возбуждают стоячую волну изгибных деформаций в пластине, которая в жидкости, в свою очередь возбуждает продольную волну [4].

## 5.2. Ультразвуковая размерная обработка

Ультразвуковой метод размерной обработки предназначен для изготовления деталей машин и приборов из хрупких материалов. Механическая обработка деталей из таких материалов затруднительна из-за хрупкости, а также из-за низкой стойкости обрабатываемого инструмента.

Ультразвуковой метод преимущественно используется для обработки поверхностей сложной формы.

Сущность ультразвукового метода размерной обработки состоит в том, что материал обрабатываемой детали разрушается абразивными зёрнами под действием ударов инструмента, прижатого к ним малым статическим усилием и колеблющегося с ультразвуковой частотой. При этом инструмент углубляется в деталь, его форма копируется в ней.

Принципиальная схема установки для обработки материалов ультразвуковыми колебаниями абразивных зёрен показана на рис. 5.4 (см. с. 83). Магнитострикционный преобразователь 1 связан с концентратором 2, к концу которого присоединен инструмент 3, воздействующий на абразивные частицы суспензии 5. В заготовке 4 обрабатывается отверстие, копирующее форму и размеры (в сечении) инструмента. Суспензию 5 подают в ванну насосом 6. Электрический высокочастотный ток к преобразователю подается от генератора 7. При работе установки преобразователь охлаждают проточной водой.

Преобразователь и концентратор образуют колебательную систему, к выходному концу которой приложена акустическая нагрузка. Чтобы получить достаточно большую амплитуду колебаний, преобразователь выполняют резонансным, т.е. его размер в направлении распространения коле-

баний берут равным или кратным половине длины волны на выбранной для работы частоте. Концентратор также выполняется резонансным.

Чтобы получить максимальное увеличение амплитуды колебаний, концентратор должен иметь специальную форму. Площадь поперечного сечения концентратора вдоль распространения колебаний изменяется по определенному закону. Применяют в основном концентраторы трех типов: экспоненциальные, конические и ступенчатые, представленные на рис. 5.5 [3].

Абразивные зерна вводятся в рабочую среду в виде водной суспензии. Продукты разрушения обрабатываемого материала и абразивных зерен удаляются из рабочей зоны циркулирующим через нее потоком суспензии.

Процесс разрушения материала при ультразвуковой обработке состоит в следующем. Инструмент, благодаря тому, что он колеблется, приходит в контакт с абразивными зернами в течение определенной части каждого периода колебаний. При частоте колебаний порядка 20 кГц время контакта за период не превышает 10...20 мкс. Усилие  $P_{и}$ , действующее в течение столь малого времени между инструментом, абразивными зернами и обрабатываемой поверхностью, имеет импульсный, ударный характер. Среднее, и тем более максимальное, усилия  $P_{п}$  в течение импульса, очевидно, во много раз превосходят значение статического усилия  $P$  прижима инструмента.

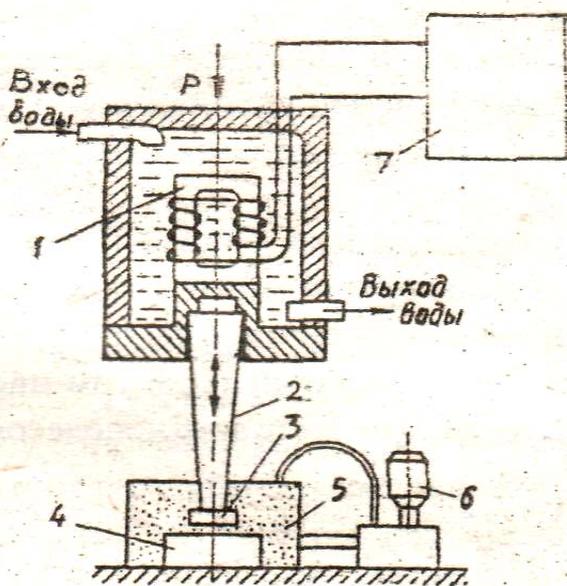


Рис. 5.4

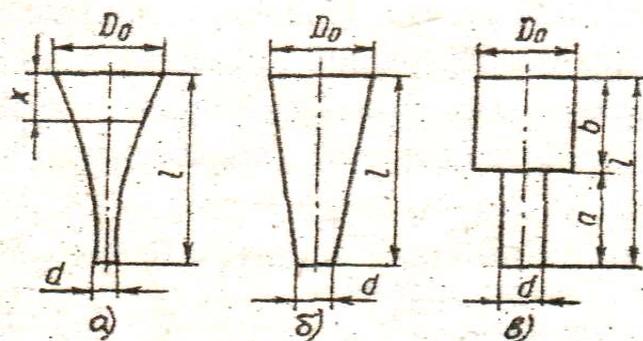


Рис. 5.5

Абразивное зерно в рабочем зазоре отличается значительным разбросом по размерам. Инструмент приходит в соприкосновение лишь с наиболее крупными из них, и усилие распределяется между этими зернами. Под действием усилия  $P_{и}$  крупные зерна своими острыми гранями либо вдавливаются в поверхности инструмента и обрабатываемой детали

(центральный удар), либо при касательном ударе царапают эти поверхности.

В обоих случаях образование лунки или царапины в хрупком материале происходит в результате выкалывания кусочков материала, а в пластичном материале — за счет пластических деформаций. Отрыв от пластичного материала происходит лишь в результате многократных пластических деформаций как следствие усталости материала. Из этого следует, что ультразвуковой метод пригоден для обработки деталей из хрупких материалов. И наоборот, инструмент для ультразвуковой обработки, чтобы обеспечить его износостойкость, целесообразно изготавливать из пластичного материала.

Для ультразвуковой обработки применяются абразивные смеси со средним размером зерна (от 10 до 2000 мкм). Лунки, образующиеся в хрупком материале при такой обработке, по своей величине на порядок меньше размера абразивных зерен. Отрывающиеся от материала частицы (выколы) во много раз меньше самих лунок. Таким образом, разрушение материала имеет микромасштабный эрозионный характер.

Эрозии подвержены те участки обрабатываемой поверхности, которые через абразив контактируют с торцевой поверхностью инструмента. Поэтому обработанная поверхность эквидистантна рабочей поверхности инструмента. Это справедливо и для контура торцевой поверхности инструмента, так как между боковыми поверхностями инструмента и обрабатываемого отверстия образуется боковой зазор. Ширина зазора примерно равна размеру наиболее крупных зерен.

Производительность ультразвуковой обработки «q» оценивается объемом материала заготовки, снятого в единицу времени единицей рабочей поверхности инструмента. Основные факторы, определяющие производительность ультразвуковой обработки, следующие:

— физико-механические свойства обрабатываемого материала и, прежде всего, его хрупкость. Приведем данные, характеризующие обрабатываемость некоторых особо хрупких материалов по сравнению со стеклом, для которого  $q \approx 10$  мм/мин (материалы, которые не относятся к особо хрупким, в том числе закаленные стали и чугун обрабатывать ультразвуковым методом нецелесообразно):

Стекло	1
Титанат бария	1,1
Феррит	0,75...0,85
Кремний	0,4...0,75
Германий	0,35...0,70
Кварц	0,45...0,70
Керамика	0,4...0,65
Твердые сплавы типа ВК	0,2
Рубин	0,15

— амплитуда колебаний инструмента: с ее увеличением производительность увеличивается примерно пропорционально.

— удельное усилие прижима инструмента; с его увеличением до некоторого оптимального значения производительность растет, а затем падает; оптимальное значение, в зависимости от свойств обрабатываемого материала, инструмента и абразивной суспензии, от интенсивности прокачки суспензии и т.д., может изменяться в очень широких пределах: от единицы до десятков ньютонов на квадратный сантиметр ( $\text{H}/\text{cm}^2$ ).

— свойства абразивной суспензии: производительность обработки увеличивается с увеличением среднего размера зерен абразива, с увеличением весовой концентрации абразива в суспензии до 50%: с повышением прочности и режущих свойств абразива; наиболее пригодным абразивным материалом обычно оказывается карбид бора.

— интенсивность прокачки суспензии через рабочий зазор; при подаче суспензии поливом с увеличением площади обработки, а также с углублением инструмента в обрабатываемый материал, обмен в рабочем зазоре затрудняется и производительность быстро падает; принудительная прокачка суспензии через отверстие в инструменте обеспечивает 3...5-кратное увеличение производительности и независимость производительности от глубины и площади обработки.

Точность ультразвуковой размерной обработки определяется точностью инструмента, точностью установки и траекторией движения инструмента относительно детали, и, наконец, рациональной величиной зазора между инструментом и обработанной поверхностью.

Главным фактором, нарушающим точность инструмента, является его износ. Износ инструмента, изготовленного, например из конструкционной стали, составляет 1...3% от объема разрушенного им материала заготовки, при условии, что этот материал характеризуется высокой обрабатываемостью, как, например, стекло, феррит, керамика. При обработке твердого сплава и других материалов, обладающих низкой обрабатываемостью, износ инструмента доходит до 80...100%. Износ распределяется по рабочей поверхности инструмента неравномерно: больше изнашивается разрушающая его часть, боковые поверхности становятся конусными, острые кромки скругляются. Поэтому для получения высокой точности необходимо применять, где это возможно, инструмент с калибрующим участком, периодическую правку профиля инструмента или доводочную обработку чистовым инструментом при малом припуске [4].

Величина зазора между инструментом и обработанной поверхностью детали зависит главным образом от среднего размера зерен абразива, амплитуды колебаний инструмента. Номинальное значение зазора учитывается при проектировании инструмента. Поперечные колебания инструмента, неравномерность распределения абразива и его обмена в рабочем и боковом зазорах, приводят к отклонениям величины зазора на 0,01...0,02 мм.

### 5.3. Ультразвуковая очистка

Ультразвуковая очистка осуществляется в моющей жидкости путем возбуждения в ней интенсивных упругих колебаний ультразвуковой частоты. Технологическое действие процесса определяется гидродинамическими эффектами, которые вызывает ультразвук в жидкости. Важная роль при этом принадлежит ультразвуковой кавитации. При прохождении волн высокой интенсивности в жидкости могут образовываться мелкие разрывы в виде пузырьков из-за больших растягивающих усилий. После полупериода растяжения следует полупериод сжатия, и пузырёк захлопывается, исчезает. Захлопывание сопровождается гидравлическим ударом, вследствие чего давление может достигать сотен атмосфер [8]. Явление появления и схлопывания пузырьков называется кавитацией, а пузырьки — кавитационными. Но не все кавитационные пузырьки успевают захлопнуться. Часть их живет больше одного периода, иногда несколько десятков периодов, совершая колебания в такт с колебаниями ультразвукового поля. Ударные волны схлопывающихся кавитационных пузырьков способны разрушать поверхностную пленку любого вида загрязнения, отделять ее от очищенной поверхности, размельчать и смешивать с потоком жидкости. Незахлопывающиеся кавитационные пузырьки проникают в щели и зазоры между загрязнениями и очищенной поверхностью и своими пульсациями способствуют их отслаиванию.

Не меньшее значение имеет ультразвуковая турбулизация моющей жидкости. Под действием ультразвука микропотоки образуются в окрестностях твердых микровключений и в складках микрорельефа очищаемой поверхности. Турбулизация моющей жидкости приводит к уменьшению толщины пограничного ламинарного слоя, обеспечивает удаление отработанных порций моющей жидкости с очищаемой поверхности и подвод к ней свежих порций. В результате существенно интенсифицируется действие моющей жидкости.

Интенсивное ультразвуковое поле в жидкости вызывает также и крупномасштабные потоки, обтекающие всю поверхность очищаемых изделий, в том числе и труднодоступные участки в изделии. Такие потоки переносят кавитационные пузырьки, удаляют отработанные и приносят свежие порции моющей жидкости.

Ультразвуковая очистка происходит благодаря совместному действию химически активной среды и явлений, возникающих в жидкости вследствие наложения акустического поля. В качестве химически активной среды используются водные растворы щелочей и синтетических моющих средств.

Применяются следующие методы ультразвуковой очистки:

— метод погружения в ванну: применяется для очистки мелких и среднеразмерных изделий. При этом ультразвуковая волна вводится в моющую жидкость, встроенными в дно или стенки ванны 7, магнитоотри-

ционными излучателями ультразвука 8 (см. с. 81, рис. 5.3, в). Изделия обычно обрабатываются в нескольких технологических зонах: в ванне предварительной очистки, ванне тонкой очистки, ванне промывки, камере сушки и т.д. В автоматических поточных линиях мелкие изделия обычно помещаются в сетчатые корзины, которые переносятся из ванны в ванну транспортным устройством карусельного типа или цепным транспортером.

— очистка непрерывно-последовательным методом: применяется для проволоки, ленты, листового материала. При этом методе очищаемые изделия перемещаются непрерывно поверх излучающей поверхности размещенных в ванне ультразвуковых излучателей.

— очистка контактным методом состоит в том, что излучатель ультразвука контактирует с очищаемым изделием, возбуждает в нем ультразвуковые колебания и изделие становится вторичным излучателем ультразвука в моющую среду. Этим методом хорошо очищать тонкостенные изделия.

Достоинствами ультразвуковой очистки являются высокое качество очистки от любых загрязнений, повышенная производительность, устранение из процесса органических и пожароопасных растворителей, благоприятные условия для механизации и автоматизации процесса.

#### 5.4. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковую сварку проводят по различным схемам, некоторые из них представлены на рис. 5.6. При сварке ультразвуковые колебания вводят в зону контакта свариваемых деталей с помощью волновода-инструмента, расположенного либо перпендикулярно к поверхности раздела (рис. 5.6, а), либо параллельно ей (рис. 5.6, б, в).

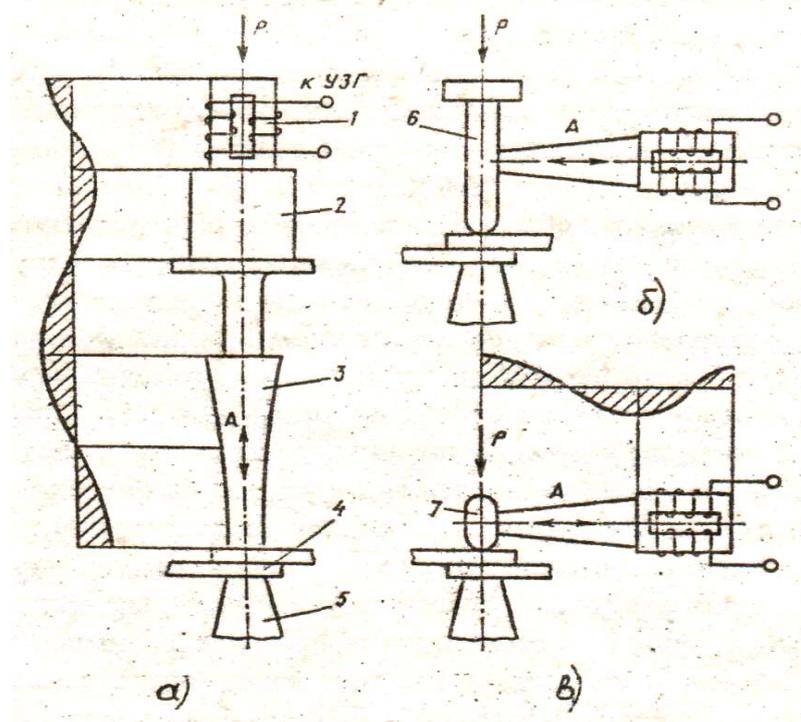


Рис. 5.6.

Механизм образования сварного соединения при ультразвуковой сварке металлов состоит в следующем. Инструмент 3 прижимает с относительно небольшим усилием «Р» свариваемые детали 4 и вводит в них ультразвуковую волну сдвиговых деформаций. Соединяемые поверхности контактируют друг с другом через немногочисленные выступы их микро-рельефа. Плотность энергии ультразвуковой волны в таких выступах становится настолько большой, что они деформируются пластически, поверхностная окисная пленка на них разрушается, происходит образование первичных «мостиков схватывания». Поглощение энергии ультразвука на границе раздела приводит к повышению температуры в точках схватывания, происходит перемещение вещества в результате вязкого течения, заполнение микропор и щелей под влиянием капиллярного эффекта, стимулированного ультразвуком «мостиков схватывания», образование зоны сварного соединения.

Волна сдвиговых деформаций в свариваемых деталях 4 возбуждается колебательной системой, состоящей из магнитострикционного преобразователя 1, концентраторов 2 и 3 и инструментов 6 и 7. Продольные колебания концентратора возбуждают в инструменте изгибные колебания, а в свариваемых деталях — высокочастотные деформации сдвига.

Ультразвуковым методом можно сваривать почти все металлы и их сплавы, применяющиеся в промышленности. Лучше всего свариваются пластичные металлы, такие как медь, алюминий и их сплавы. Хорошие результаты получаются и при сварке тугоплавких и активных металлов: молибдена, циркония и его сплавов, титана, ниобия, тантала. Нержавеющие стали свариваются лучше малоуглеродистых сталей.

Возможна сварка разнородных металлов. Алюминий, например, сваривается ультразвуком почти с любыми металлами, медь и железо друг с другом, а также с золотом, молибденом, никелем, платиной, серебром, титаном и цирконием. Особенно целесообразно применять ультразвуковой метод сварки при соединении металлов, обладающих низким электрическим сопротивлением и высокой теплопроводностью, электросварка которых затруднена. Ультразвуковая сварка затруднительна, если металлы сильно отличаются по твердости. Сварку металлов обычно проводят по схеме, показанной на рис. 5.6, б (см. с. 87).

Сварка пластмасс, в отличие от сварки металлов, осуществляется ультразвуковой волной не сдвиговых деформаций, а деформаций сжатия-растяжения. Поэтому в установках, предназначенных для сварки пластмасс, ось колебательной системы расположена перпендикулярно плоскости сварочного столика (рис. 5.6, а). Ультразвуком свариваются термопластичные пластмассы, такие как полиэтилен, винипласт, хлорвинил, капрон, нейлон и фторопласт.

При ультразвуковой сварке соединяемые материалы не подвергаются воздействию высоких температур как при электросварке, а также воздействию больших статических усилий, как при холодной сварке. Благода-

ря этому при ультразвуковой сварке коробление свариваемых узлов небольшое или полностью отсутствует. Происходит минимальное изменение физико-химических свойств материалов, что позволяет соединения с улучшенными показателями по прочности, электро- и теплопроводности, коррозионной стойкости, а также возможна сварка деталей малых размеров: проволоки диаметром до 20 мкм, пластин толщиной до 2...3 мкм. Особенно эффективна ультразвуковая сварка для соединения листовых деталей малых толщин (от нескольких микрометров) к массивным деталям.

Маломощные установки, предназначенные для сварки микродеталей, используются в электронной промышленности при монтаже интегральных схем, сварке пленочных микросхем и других операциях [4].

## 6. ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

### 6.1. Светолучевая (лазерная) обработка

Лазер или оптический квантовый генератор (ОКГ) является источником получения световых лучей, характеризующихся высокой плотностью энергии и когерентностью, т.е. параллельностью испускаемых лучей. Лазерное излучение можно получать как в импульсном, так и непрерывном режиме. Существует три вида лазеров: твердотельные, газообразные и жидкостные. Для технологических целей используют лазеры на твердом теле и жидкостные.

Каждый атом или молекула (частица) вещества может обладать различным, но вполне определенным значением энергии и находиться на ряде вполне определенных дискретных энергетических уровней. Если частица изменяет свое энергетическое состояние, то она переходит с одного уровня на другой. Для перехода на более высокий энергетический уровень частица должна поглотить квант света — фотон. При переходе на нижний энергетический уровень происходит испускание порции энергии или фотонов.

Частота поглощаемого или излучаемого света определяется физическими константами активного вещества лазера. Широко используется кристаллический лазер на основе синтетического рубина в форме стержня, служащего резонатором, в котором возникает и формируется луч, испускаемый лазером.

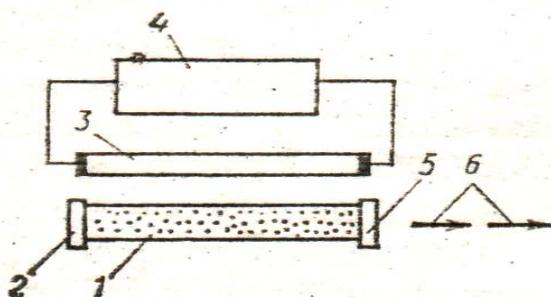


Рис. 6.1

Простейшая схема кристаллического лазера показана на рис. 6.1. Рубиновый стержень 1 оснащается импульсной лампой 3, наполненной ксеноном и вспыхивающей при импульсном разряде конденсатора источника питания 4 (источника энергии накачки). По торцам стержня установлены непрозрачная 2 (с коэф-

коэффициентом отражения 1) и полупрозрачная (с коэффициентом отражения 0,5) пластины 5. Световой луч 6, возникающий в результате возбуждения атомов, выходит наружу через пластину 5.

На рис. 6.2 показан процесс образования лазерного луча. Атомы хрома (черные точки), содержащиеся в рубине, находятся в невозбужденном состоянии (рис. 6.2, а). Под действием фотонов света от лампы атомы хрома переходят в возбужденное состояние. Часть излучаемой энергии рассеивается через стенки стержня и проявляется в форме люминесцентного свечения рубинового кристалла. Другая часть энергии, направленная параллельно оси стержня (рис. 6.2, б), по пути своего движения вызывает цепную реакцию образования новых фотонов (рис. 6.2, в). Фотоны, многократно отражаясь от пластин 1 и 2, лавинообразно нарастая при каждом отражении, в виде мощного светового луча вырывается из торца с полупрозрачным покрытием (рис. 6.2, г) [3].

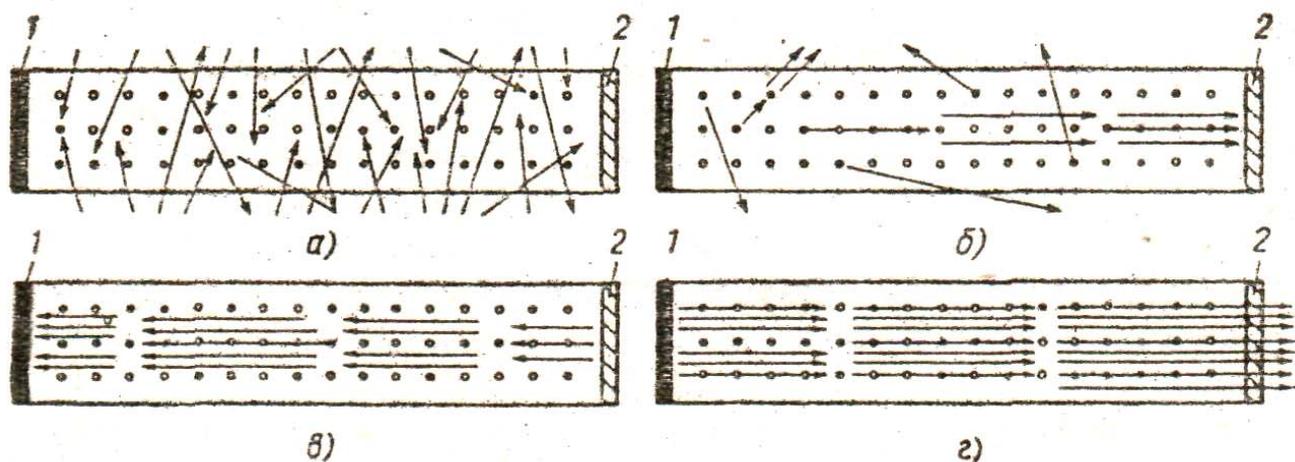


Рис. 6.2.

Схема лазерной технологической установки приведена на рис. 6.3 (см. с. 91). Лазерная головка 1 состоит: из рабочего тела 2; двух зеркал-резонаторов 3 (одно из зеркал полупрозрачное); лампы накачки 4 с отражателем, оптической системы 5 для фокусировки луча на обрабатываемой детали 6, установленной на координатном столе 7; блок управления (БУ) который осуществляет навигацию координатного стола, и источник питания (ИП) лампы накачки [4].

Рабочим телом твердотельных лазеров служит рубин, представляющий собой кристалл корунда с примесью хрома, иттриево-алюминиевый гранат (ИАГ), являющийся также кристаллом корунда с примесью неодима, стекло с примесью неодима. Рабочими частицами являются примеси хрома или неодима. ОКГ на рубине и стекле работают в импульсном режиме, на ИАГ могут работать как в импульсном режиме, так и в непрерывном.

Накачка ОКГ, работающих в импульсном режиме, осуществляется импульсными ксеноновыми лампами, которые питаются от батареи конденсаторов. Рабочее тело и лампу накачки помещают в отражателе с це-

лью более полного и равномерного использования светового потока. При накачке не вся энергия, поглощенная рабочим телом, превращается в излучение. Значительная часть ее теряется на нагрев (для рубина около 50%). Для отвода тепла от рабочего тела в некоторых случаях предусматривают принудительное охлаждение воздухом, водой или жидким азотом.

Рабочим телом газовых лазеров могут быть чистые газы: ксенон, криптон, гелий, азот или смеси газов, например, углекислого газа с азотом и гелием. Накачка осуществляется, как правило, электронами при прохождении электрического тока через газ. При столкновении электрона, движущегося с большой скоростью, с атомом или молекулой газа электрон передает энергию атому и переводит его на более высокий энергетический уровень.

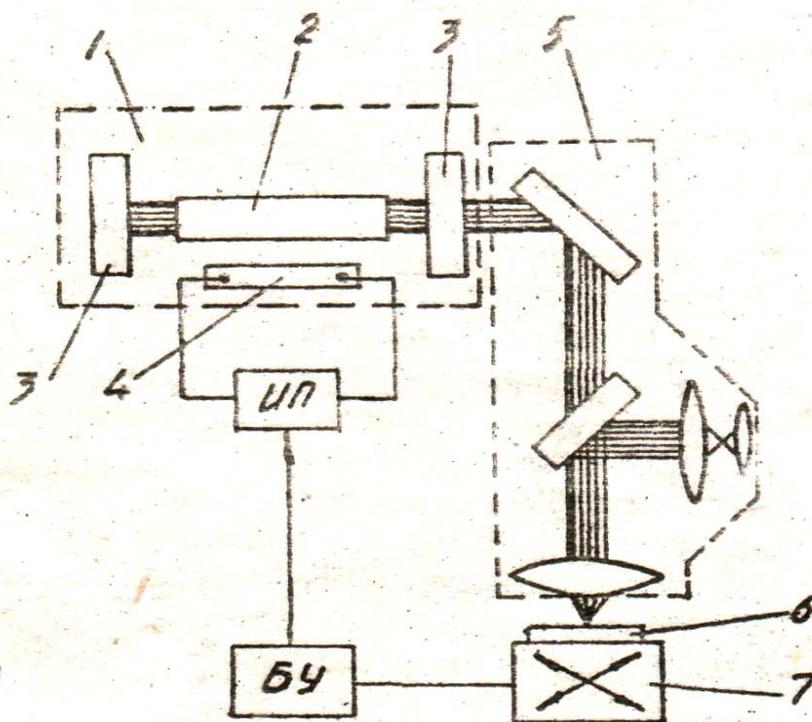


Рис. 6.3.

Газовые лазеры могут работать как в импульсном режиме, так и в режиме непрерывного излучения [4].

При взаимодействии с поверхностью среды лазерное излучение частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и переходит в тепло. Повышение температуры приводит к расплавлению материала, его испарению, вытеканию расплава из зоны облучения и образованию лунки. Этот процесс сопровождается изменением оптических и теплофизических свойств, тепловым расширением, а также фазовыми переходами. Высокие скорости нагревания (до  $10^{10}^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) и охлаждения (до  $10^8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) и большие градиенты температур могут приводить и к другим механизмам разрушения, например, к растрескиванию материала под влиянием термических напряжений, воспламенению и горению, термическому

разложению материала. В ряде случаев эти факторы расширяют возможности лазерной обработки.

Наибольшее применение в промышленности лазеры нашли при резке различных материалов, получении отверстий и сварке.

Лазерная резка обладает существенными преимуществами по сравнению с другими методами:

обширным классом разрезаемых материалов;

— возможностью получать тонкие резы благодаря острой фокусировке лазерного луча;

— малой зоной термического влияния излучения;

— отсутствием механического контакта, что особенно важно при раскоре тонколистовых материалов;

— химической чистотой процесса резки;

— возможностью автоматизации процесса;

— возможностью резки по сложному контуру в двух и даже трех измерениях.

Лазерная резка происходит при относительном движении сфокусированного луча и обрабатываемой детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Резку производят, как правило, с поддувом газа в зону резания. Этот процесс получил название газолазерной резки.

Газ выбирают в зависимости от обрабатываемого материала. При резке дерева, фанеры, бумаги, текстильных материалов, пластмасс в зону резания подается воздух или инертный газ. Газ охлаждает края реза и препятствует воспламенению материала, расширению реза, выдувает из зоны воздействия луча расплавленный материал и очищает зону резания. Это позволяет получать обработанные поверхности реза с малой шероховатостью и высокой точностью [4].

При резке металла в зону нагрева подается кислород. В результате экзотермической реакции окисления металла выделяется дополнительное тепло, что позволяет существенно повысить скорость резки. Ширина реза при обработке многих марок сталей толщиной 4 мм составляет от 0,8 до 1 мм на входе и от 2 до 4 мм на выходе. Скорость разрезания тонколистовой стали достигает 10 м/мин.

Резка тонкостенного трубчатого стекла при изготовлении электровакуумных приборов производится при вращении заготовки. При этом на поверхности трубки создается узкий кольцевой источник тепла, вызывающий в стекле большие температурные градиенты и термоупругие напряжения, приводящие к образованию кольцевой трещины и сколу. В зависимости от скорости роста термических напряжений высота микронеровностей  $R_z$  поверхности раздела может составлять от 40 до 0,2 мкм.

Лазеры непрерывного излучения небольшой мощности применяются для нарезки резисторов путем удаления резистивного слоя в нужных местах с керамической подложки. Для этого излучение фокусируется на поверхности заготовки, которая вращается вокруг продольной оси и одно-

временно перемещается вдоль нее. Нарезка резисторов с помощью лазера позволяет уменьшить их габариты и совместить нарезку с контролем, прекращая практически мгновенно процесс при достижении заданного номинала. Скорость нарезки достигает 12 м/мин.

Простота управления лучом в сочетании с современными средствами программного управления позволяет получитьрезы сложных конфигураций и делает лазерную резку весьма перспективной.

Для сверления отверстий используют лазеры, работающие в импульсном режиме. При сверлении происходит тепловое воздействие неподвижного лазерного луча на материал, его плавление и испарение. В глубину отверстие растет, в основном, за счет испарения, а по диаметру — за счет плавления стенок и вытекания жидкого материала. Показатели обработки в большей степени зависят от свойств материала и параметров излучения.

Форма образующегося отверстия зависит от расфокусировки лазерного луча и положения фокуса относительно обрабатываемой поверхности. При сверлении отверстий в деталях малой толщины обычно используют одиночные импульсы большой энергии. Глубокие отверстия получают при использовании серии импульсов малой энергии (0,1...0,3 Дж). В этом случае получают отверстия с меньшей конусностью и лучшего качества, точность при этом достигает 1...5% диаметра. Освоено сверление отверстий диаметром 0,003...1 мм при отношении глубины к диаметру до 10. Производительность сверления 60...240 отверстий в минуту. Для повышения производительности и качества обработки применяют поддув кислородом, воздухом или инертным газом.

Применение лазерного сверления позволило решить важные технологические задачи. Так, в отечественной промышленности полностью переведена на лазерную технологию обработка часовых камней. Решена проблема чернового профилирования алмазных волок с последующей доводкой ультразвуковым методом. Бесконтактное удаление материала позволяет производить термодинамическую балансировку гироскопов.

Лазерная сварка может быть точечной и шовной, встык, внахлест и т.д. Производительность точечной сварки около 60 операций в минуту, шовной — в зависимости от материала от 0,5 до 4 м/мин при глубине проплавления в несколько миллиметров. Детали свариваются при меньших плотностях мощности, так как при сварке необходимы только разогрев и плавление материала, без его испарения.

Лазерное излучение позволяет сваривать материалы в вакуумной камере или в камере с атмосферой инертного газа, что исключает окисление сварного шва. При сварке материалов с большим коэффициентом отражения их покрывают тонкой пленкой хорошо поглощающего излучение материала, например графита.

С помощью лазерной сварки можно получать высококачественные соединения из нержавеющей стали, молибдена, стекла, кварца и др.

Возможна сварка разнородных материалов, таких как вольфрам и алюминий, медь и сталь. Надежно свариваются детали толщиной от 0,01 до 5 мм. Лазерная сварка наиболее эффективно применяется для сваривания легко деформирующихся деталей, при сварке в труднодоступных местах, при необходимости обеспечить особо чистый шов с минимальной зоной термического влияния [4].

## 6.2. Электронно-лучевая обработка

Электронно-лучевыми называются методы, при которых для технологических целей используют остросфокусированный пучок электронов, движущихся с большой скоростью.

Метод электронно-лучевой обработки (плавки, сварки, резки) основан на использовании тепла, выделяющегося при столкновении потока электронов поверхностью обрабатываемой заготовки. При электронно-лучевой обработке деталь помещают в герметическую камеру, в которой благодаря непрерывной работе вакуумных насосов обеспечивается высокая степень разрежения (до  $10^{-7}$  Па). Поскольку электроны не изменяют химических свойств твердого тела, то обработка ими в вакууме является существенным достоинством этого метода, так как при обработке не происходит химического загрязнения заготовки газами.

Существенной предпосылкой для использования в технике электронного луча как термического инструмента для обработки материалов является относительная простота получения большого количества свободных электронов. Если нагреть в вакууме металлическую, например, танталовую или вольфрамовую проволоку, то с поверхности последней эмитируются электроны (термоэлектронная эмиссия), число и скорость которых зависят от температуры нагрева. Кинематическая энергия этих электронов, беспорядочно движущихся в пространстве, окружающем эмиттер, сравнительно невелика. Ее можно существенно повысить путем ускорения движения электронов в определенном направлении воздействием электрического поля, создаваемого высокой разностью потенциалов между эмиттером, являющимся в данном случае катодом и анодом.

Для этого используют специальное устройство — электронную пушку, которая вместе с электронно-оптической системой создает остросфокусированный пучок электронов, эмитируемых катодом, ускоряемый в вакууме электрическим полем с разностью потенциалов до 150 кВ. Скорость электронов при этом может достигать 100000 км/с и более.

Установки для обработки материалов сфокусированным пучком электронов состоят из трех основных устройств: электронной пушки, фокусирующей системы и рабочей камеры. Схема установки для электронно-лучевой обработки показана на рис. 6.4 (см. с. 95).

Источником электронного луча является катод 1, представляющий вольфрамовую спираль, нагреваемую до температуры 2600...2800°C. При этом происходит интенсивная термоэлектронная эмиссия с катода. Элек-

троны, эмитируемые катодом электронной пушки, формируются в пучок электродом 2, который расположен непосредственно за катодом. На электрод 2 подается отрицательное (относительно катода) напряжение смещения и электроны ускоряются под действием разности потенциалов между катодом и анодом 3. Затем с помощью воздействующих электрод 2 магнитных полей двух пар катушек 4 пучок электронов направляется в электронно-оптический центр магнитной фокусирующей системы 6. Между магнитными системами (4 и 6) установлена вольфрамовая диафрагма 5 с водяным охлаждением. Эта диафрагма служит для улавливания рассеянных электронов. Фокусное расстояние магнитной линзы 6 может изменяться при изменении тока, пропускаемого через обмотку, что используется для установки как рабочего режима (рабочей точки), так и необходимого поперечного сечения луча в месте встречи его с поверхностью обрабатываемой заготовки 9. Ниже фокусирующей системы расположены отклоняющие катушки 7, служащие для автоматического перемещения луча по заданному направлению. Заготовка помещается в рабочую камеру 8, в которой создают разрежение.

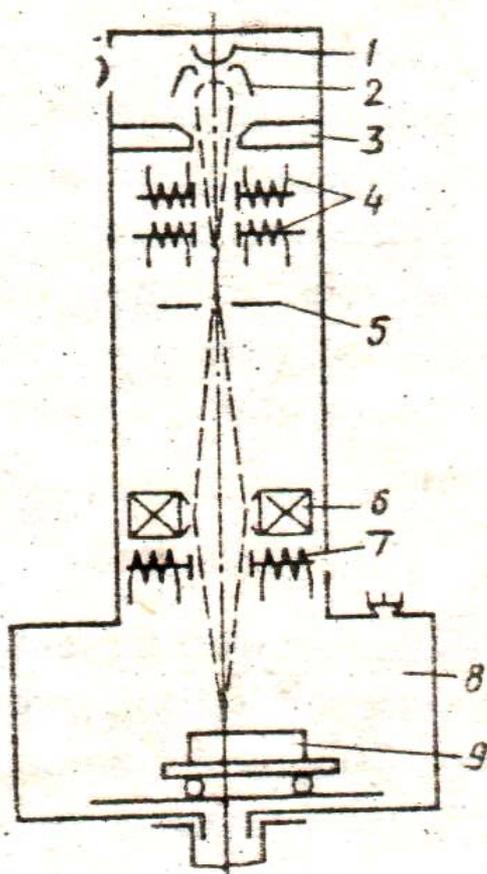


Рис. 6.4

Благодаря кратковременности действия электронных лучей и большой плотности потока излучения обрабатываемый материал плавится и испаряется столь быстро, что тепло не успевает распространиться в стороны от места падения луча (практически зона плавления не больше поперечного сечения луча в месте попадания его на заготовку). В направлении излучения луч электронов действует на значительно превышающую глубину, равную примерно 100 диаметрам луча. Таким образом, электронным лучом можно резать материалы без образования дефектного слоя, практически без отходов и с высокой производительностью. Электронным лучом обрабатывают детали из вольфрама, титана, твердых сплавов, синтетических камней, осуществляется сварка и пайка. Ввиду ма-

лого диаметра пучка электронных лучей, локальности действия создаваемого ими тепла и отсутствия влияния износа инструмента можно получить при обработке высокую точность размеров и малую шероховатость поверхности.

Пучки электронов диаметром 5 мкм позволяют производить прецизионную обработку с точностью  $\pm 1$  мкм. Пучком электронов на доводочных режимах можно получать поверхности с высотой микронеровностей до 1 мкм. Пучком электронов легко управлять, воздействуя на отклоняющие катушки 4 (рис. 6.4). Резку по контуру можно осуществлять, используя механические перемещения стола с обрабатываемой заготовкой [3].

Недостатки электронно-лучевой обработки:

- необходимость ведения обработки в глубоком вакууме;
- необходимость защиты от рентгеновского излучения на установках с напряжением более 20 кВ;
- высокая стоимость оборудования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов/ Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др. — М.: Высшая школа, 1983. — 248 с.
2. Справочник по электрофизическим методам обработки/ Г.Л. Амитен, И.А. Байсуров, Ю.М. Барон и др.; Под ред. В.А. Волосатова. — Л.: Машиностроение, 1988. — 719 с.
3. Бирюков Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. — М.: Машиностроение, 1981. — 128 с.
4. Долгих А.М., Серов Ю.И., Шапошник Р.К. Основы электрофизических методов обработки деталей. Учебное пособие: Саратов, СГТУ, 1994. — 64 с.
5. Овчаров Б.И. Быстрые электроэрозионные зеркальные системы “ПИКА”. Журнал ИТО. — № 3. — 2002.
6. Отто М.Ш., Балицкий В.Б. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. Руководство технолога и электроэрозиониста. — М.: ЭНИИМС, 1989. — 91 с.
7. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник. — М.: Машиностроение, 1982. — 400 с.
8. Электрофизические и электрохимические методы обработки/ З.И. Поляков, И.Я. Мирнов, В.Ю. Шамин и др. Конспект лекций: Челябинск, ЧПИ, 1975. — 118 с.
9. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. — М.: Машиностроение, 1980. — 184 с.
10. Кохановская Т.С. К вопросу о линейном сервоприводе. Журнал ИТО. — № 3, 2000.
11. Серебряницкий П.П. Линейные двигатели нового поколения. Журнал “Двигатель”. — № 3, 2000.
12. Коваленко В.С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. — Киев: Вища школа, 1975. — 234 с.
13. Великий В., Рябов К. Высокопроизводительная обработка жаропрочных и титановых сплавов. Журнал “Двигатель”. — № 3, 2001.
14. Хохряков Б. Трудный опыт выбора. Журнал “Двигатель”. — № 3, 2000.
15. Воронов В.Н. Исследование технологического процесса размерно-чистовой электрохимической обработки деталей автотракторных двигателей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: Челябинск, 1972. — 24 с.