

САНКТ–ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

Кафедра «Технология конструкционных материалов  
и материаловедение»

**В. И. Никифоров**

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ  
И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЕ, ХИМИЧЕСКИЕ  
И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров  
укрупнённой группы «Машиностроение»*

Издательство Политехнического университета

Санкт-Петербург

2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений .....	6
Введение .....	7
1. Классификация технологических методов обработки .....	13
2. Технологические методы электроэрозионной обработки ....	23
2.1. Физические основы электроэрозионной обработки .....	23
2.2. Виды и схемы реализации электроэрозионных методов обработки .....	26
2.3. Технологические параметры режима электроэрозионной обработки .....	35
2.4. Техничко-экономические показатели электроэрозионной обработки.....	49
2.4.1. Качество поверхностного слоя после электроэрозионной обработки .....	49
2.4.2. Точность электроэрозионной обработки .....	53
2.4.3. Производительность электроэрозионной обработки .....	73
2.4.4. Техничко-экономические характеристики электроискрового и электроконтактно-дугового методов электроэрозионной обработки .....	84
2.5. Выбор режима электроэрозионной обработки .....	89
2.5.1. Назначение параметров режима электроэрозионной обработки .....	89
2.5.2. Расчёт основного времени электроэрозионной обработки .....	95
2.6. Оборудование для электроэрозионной обработки .....	99
2.6.1. Классификация и общая характеристика электроэрозионного оборудования .....	99
2.6.2. Генераторы импульсов .....	128
3. Химические методы обработки .....	134
3.1. Химическое травление .....	134
3.2. Химико-механическая обработка .....	142
3.3. Химические методы нанесения покрытий .....	145
3.3.1. Химические методы нанесения покрытий из водных растворов .....	145
3.3.2. Химические методы нанесения покрытий из газовой фазы .....	150
3.3.3. Обозначение покрытий .....	155
4. Электрохимические методы обработки. Теоретические основы и классификация .....	157
4.1. Физико-химические основы электрохимической обработки ....	157
4.2. Основные законы, описывающие процесс электролиза .....	169

4.3. Классификация электрохимических методов обработки .....	172
5. Электрохимические размерные и отделочные методы обработки .....	176
5.1. Методы электрохимической размерной обработки .....	176
5.1.1. Методы, реализуемые на основе анодного растворения поверхности заготовки .....	177
5.1.2. Комбинированные методы электрохимической размерной обработки .....	183
5.2. Методы электрохимической отделочной обработки .....	187
5.2.1. Отделочные методы, реализуемые на основе анодного раство- рения поверхности заготовки .....	187
5.2.2. Комбинированные методы электрохимической отделочной обработки .....	189
5.3. Электролиты .....	193
5.4. Технологические параметры размерной электрохимической обработки .....	200
5.4.1. Напряжение на электродах .....	200
5.4.2. Сила тока в электролите и анодная поляризационная кривая ...	201
5.4.3. Скорость анодного растворения .....	204
5.4.4. Способы регулирования межэлектродного зазора .....	206
5.5. Техничко-экономические параметры электрохимической обработки .....	211
5.5.1. Качество поверхности после электрохимической обработки ....	211
5.5.2. Точность электрохимической размерной обработки .....	215
5.5.3. Обрабатываемость материалов и производительность электро- химической размерной обработки .....	229
5.6. Конструктивные характеристики электрода-инструмента .....	234
5.7. Оборудование для электрохимической размерной обработки ..	245
5.7.1. Типовая структура электрохимического оборудования .....	245
5.7.2. Виды и характеристики электрохимических станков .....	247
5.7.3. Узлы и системы электрохимических станков .....	254
5.7.4. Системы регулирования режима электрохимической размерной обработки .....	261
6. Электрохимические методы нанесения покрытий .....	264
6.1. Методы нанесения покрытий осаждением металлов из рас- творов солей .....	265
6.2. Методы нанесения электрохимических покрытий оксидиро- ванием анода .....	272
6.3. Этапы технологического процесса нанесения покрытия электрохимическими методами .....	274

6.3.1. Подготовка поверхности к нанесению покрытия .....	274
6.3.2. Дополнительная обработка покрытия .....	287
6.3.3. Контроль качества нанесения покрытия .....	290
6.4. Оборудование для нанесения электрохимических покрытий .....	297
Библиографический список .....	301

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- МЭП — межэлектродный промежуток;  
ЧПУ — числовое программное управление;  
ЭФХО — электрофизические и электрохимические методы обработки;  
ЭХО — электрохимическая обработка;  
ЭХРО — электрохимическая размерная обработка;  
ЭЭО — электроэрозионная обработка.

## ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование в машиностроении материалов с особыми физико-механическими характеристиками, обуславливающими их плохую обрабатываемость традиционными методами резания, создание деталей со сложными формами, повышенными требованиями к качеству поверхностного слоя и точности изготовления, а также необходимость снижения себестоимости обработки и повышения производительности труда привели к появлению и широкому распространению в производстве электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭФХО) и основанных на этих методах технологических процессов.

В группу ЭФХО методов обработки включают те технологические методы обработки заготовок, при реализации которых энергетическое воздействие на заготовку осуществляется не традиционными методами резания, обработки пластическим деформированием, термической и химической обработки, а иными видами воздействия или комбинацией нескольких их видов [2, 6, 13, 14, 16, 18]. К таким инновационным видам энергетического воздействия относят электрическое, электрохимическое воздействия и воздействие потоками микро-частиц.

Электрофизические и электрохимические методы и технологии в настоящее время применяют на всех этапах изготовления деталей, начиная от получения заготовок и кончая их отделочной обработкой. На основе использования технологий этой группы на производстве решают уникальные технологические задачи, обеспечивающие заданное удаление, перемещение или приращение (большого или малого) объёма материала заготовки.

Многие методы ЭФХО позволяют обрабатывать материалы с такими высокими прочностными характеристиками, обработка которых традиционно используемыми при обработке методами резания невозможна. Использование методов обработки и технологий группы

ЭФХО позволяет изготавливать детали сложной формы, обрабатывать поверхности в труднодоступных местах, что при использовании механических методов обработки требует значительных экономических и временных затрат. Применение в таких случаях методов и технологий группы ЭФХО даёт неоспоримые преимущества в результирующих технико-экономических показателях изготовления деталей. К таким поверхностям относят, например, отверстия и пазы сверхмалых размеров, исчисляемых микрометрами.

Технологические методы группы ЭФХО в основном характеризуются отсутствием силового взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки. Это даёт возможность изготавливать нежёсткие детали с высокими точностными показателями.

Как правило, при реализации методов группы ЭФХО не требуется создание сложных взаимных перемещений инструмента и заготовки, что значительно упрощает конструкцию технологического оборудования и оснастки и облегчает автоматизацию технологического процесса. При этом во многих случаях обрабатывающий инструмент изготавливается из обычных конструкционных материалов, а это позволяет создать сложный по форме инструмент при малой его стоимости.

Особо следует отметить широкие возможности использования методов группы ЭФХО по нанесению покрытий на поверхности заготовок [1, 3, 17, 20]. Эти методы обеспечивают возможность нанесения, с одной стороны, тонкоплёночных покрытий и, с другой стороны, наплавки материалов с большими толщинами слоя; нанесение покрытий разного функционального назначения и с разной производительностью. В связи с этим в структуру учебного пособия введены разделы, содержащие материалы по методам нанесения покрытий и их сопоставительным характеристикам.

При весьма широких возможностях всей рассматриваемой группы конкретные технологии ЭФХО по области применения, как правило, более ограничены, а по требованиям к точности параметров технологического процесса более узки и жёстки, чем технологии, ис-

пользующие методы механической обработки. Многие технологии ЭФХО весьма энергоёмки, требуют специальных условий для их реализации, характеризуются повышенными требованиями к технике безопасности и утилизации технологических отходов производства. К тому же, некоторые процессы, протекающие при их реализации, ещё недостаточно изучены, в ряде случаев нет чётко установленных структуры технологического процесса, содержания отдельных операций, режимов обработки, обеспечивающих требуемое качество поверхности и точность обработки. Технологическое оснащение технологий ЭФХО специфично и порой сложно в наладке и эксплуатации.

В учебном процессе вопросы разработки и проектирования технологических процессов изготовления изделий непосредственно связаны с изучением студентами таких технологических дисциплин как «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов» и «Технология машиностроения». В рамках учебной дисциплины «Технология конструкционных материалов» студентам даются исходные знания по всей совокупности технологических методов обработки, в том числе и методов группы ЭФХО. Однако этих сведений весьма мало, приводятся они лишь на уровне описания процессов, не содержат, а в силу ограниченности времени на изучение дисциплины «Технология конструкционных материалов» не могут содержать сведений, позволяющих технологу правильно включать их в систему операций технологического процесса изготовления детали. Для современного машиностроения необходимость знания технологами методов ЭФХО и соответствующих электрофизических и электрохимических технологий стала очевидной. Назрела необходимость выпуска вузами системных технологов, способных при решении сложных технологических задач «выйти» за традиционные рамки технологий механической обработки и принимать решения на основе системного подхода к технологии как науке, строящейся на базе всей совокупности технологических методов обработки заготовок.

Эта специфика и в то же время широкое использование в промышленности технологий ЭФХО обусловили введение в учебные



планы подготовки бакалавров по направлениям «Технологические машины и оборудование», «Машиностроение» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства» в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете учебной дисциплины «Электрофизические и электрохимические технологии в машиностроении». В этой дисциплине рассматриваются физико-химические основы процессов обработки, реализуемых на базе применения методов и технологий ЭФХО, элементы технологических систем, обеспечивающие реализацию технологий данной группы, в частности, технологическое оснащение, режимы обработки, основы проектирования технологических процессов. В состав учебных занятий по дисциплине «Электрофизические и электрохимические технологии» входит чтение лекций и проведение лабораторных и практических занятий по изучению технологических систем и проектированию технологических процессов и элементов технологической оснастки, необходимой для реализации электрофизических и электрохимических технологий.

*Цель изучения учебной дисциплины «Электрофизические и электрохимические технологии в машиностроении»* состоит в том, чтобы сформировать систему знаний по электрофизическим и электрохимическим методам и технологиям обработки заготовок, позволяющую использовать эти технологии при разработке технологических процессов изготовления деталей в условиях механосборочного производства.

Задачами изучения дисциплины являются компетенции выпускника, необходимые ему для:

— рационального применения методов ЭФХО при проектировании технологических процессов изготовления традиционных для машиностроения классов деталей;

— проектирования техпроцессов с учётом особенностей технологий электрохимической и электрофизической обработки;

— заполнения технологической документации на уровне маршрутной технологии при использовании операций на основе методов ЭФХО.

Структурно учебная дисциплина «Электрофизические и электрохимические технологии в машиностроении» соответствует структуре дисциплины «Технология машиностроения» [17]. Она включает следующие разделы:

1. Теоретические основы методов и технологий электрофизической и электрохимической обработки, технологические параметры и оснащение.

2. Основы проектирования технологических процессов механо-сборочного производства с использованием электрофизических и электрохимических технологий.

3. Типовые технологические процессы изготовления деталей с использованием электрофизических и электрохимических технологий.

В данном учебном пособии представлены материалы, относящиеся к классификации всей системы технологических методов обработки заготовок, рассмотрено место ЭФХО методов в данной системе, их классификация и раскрыты сущность и характеристики только технологических методов электроэрозионного и электрохимического энергетического воздействия на заготовку.

Отдельным разделом в пособие введён материал по химическим методам обработки заготовок, несмотря на то, что этот метод не относят к группе методов ЭФХО. Выделение этого раздела обусловлено необходимостью обеспечить преемственность и дифференциацию в раскрытии областей использования в машиностроении химических и электрохимических технологий. Нужно это также и потому, что в учебной литературе по технологии машиностроения материалы по химическим технологиям обработки заготовок практически не рассматриваются или распределены в ограниченном объёме по разным учебным дисциплинам.

При характеристике технологических методов обработки каждой группы даны физико-химические основы их реализации, раскрыты области применения каждого из методов группы, приведены схемы и параметры режимов обработки, показатели достигаемой точности обработки и качества поверхностного слоя, особенности используемых инструментов и оборудования.

Рассмотрение аналогичных характеристик технологических методов ЭФХО групп, не вошедших в данное пособие, основ разработки технологических процессов механосборочного производства и типовых технологических процессов изготовления деталей с применением технологий ЭФХО планируется осуществить в рамках последующих подготавливаемых к выпуску учебных пособий по учебной дисциплине «Электрофизические и электрохимические технологии в машиностроении».

Автор выражает искреннюю признательность рецензентам пособия доктору технических наук, профессору Д. В. Василькову и доктору технических наук, профессору Л. А. Ушомирской, а также преподавателям Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Ю. М. Барону, А. П. Гаршину, В. С. Кобчикову, М. Т. Коротих, Д. Ю. Кряжеву, В. С. Медко за конструктивные замечания и предложения, высказанные при прочтении рукописи книги.

# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

*Технологическим методом* согласно ГОСТ 3.1109–82 «Термины и определения основных понятий» называется совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий при выполнении формообразования, обработки или сборки, перемещения, включая технический контроль, испытания в технологическом процессе изготовления или ремонта, установленных безотносительно к наименованию, типоразмеру или исполнению изделия.

Следует обратить внимание в этом определении на то, что «совокупность правил и последовательность обработки» рассматриваются безотносительно к наименованию, типоразмеру и исполнению изделия. Именно этими характеристиками понятие «технологический метод обработки» отличается от понятия «*технологический процесс*», под которым в соответствии с тем же ГОСТ 3.1109–82 понимается часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. В свою очередь, *производственный процесс* — это совокупность всех действий людей и средств производства на предприятии, направленных на изготовление продукции из сырья (материалов, полуфабрикатов).

Перечень правил, на основе которых реализуется тот или иной технологический метод обработки, определяется характеристиками технологической системы, в которой осуществляется обработка. В соответствии с ГОСТ 27.004–85. «Системы технологические. Термины и определения» *технологическая система* — совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций. На рисунке 1.1 схематично представлена схема функционирования технологической системы, раскрывающая структуру «технологической системы» и взаимосвязи материальных

элементов системы на этапах превращения предмета труда (заготовки) в изделие (деталь). К элементам технологической системы отнесены: технологическое оборудование, заготовка, инструмент, приспособление и технологическая среда<sup>1</sup>. Для характеристики результатов функционирования системы в схему включены изготовленное изделие (деталь или полуфабрикат) и технологические отходы производства.

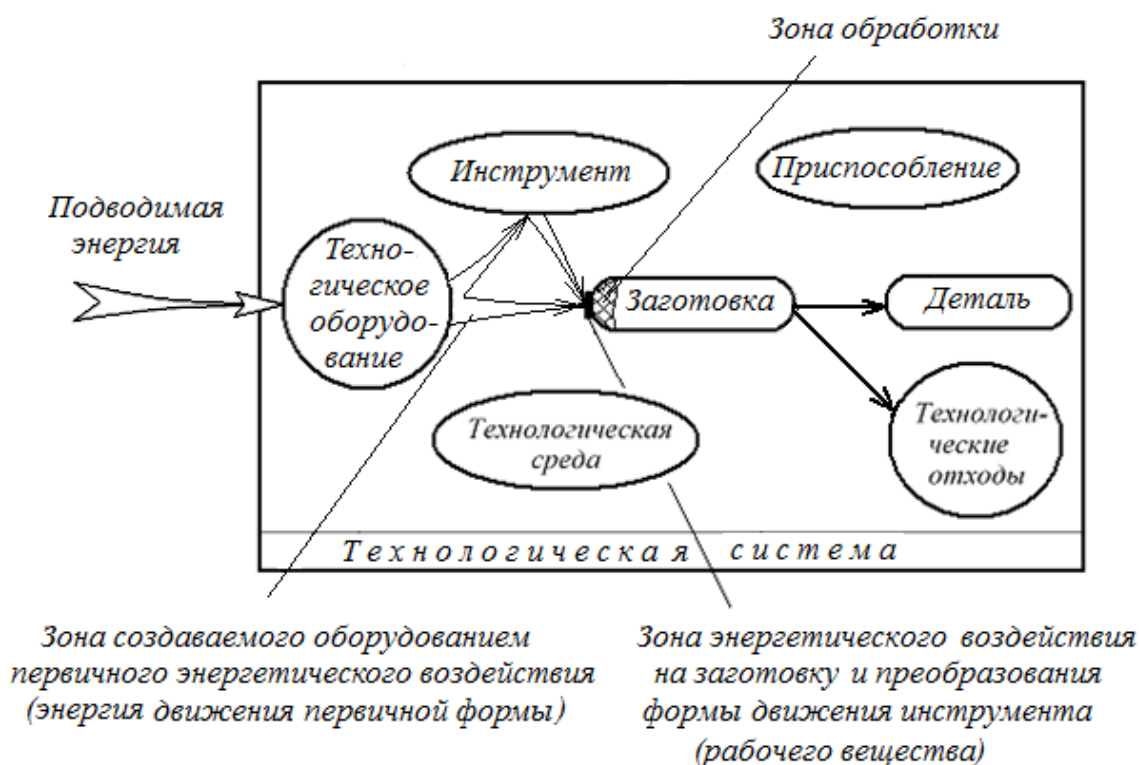


Рис. 1.1. Схема функционирования и элементы технологической системы

Первый элемент технологической системы — технологическое оборудование — на основе подводимой к системе энергии создаёт энергетическое воздействие на заготовку движущимся в определенной технологической среде инструментом или рабочим веществом. Это воздействие на рисунке 1.1 названо первичным энергетическим воздействием, а вид движения инструмента (рабочего вещества) — первичной формой его движения. Важнейшей характеристикой этого движения является значение полученной движущимся инструментом

<sup>1</sup> В состав представленных на рисунке 1.1 элементов технологической системы не включен элемент системы, указанный в ГОСТ 27.004-85, - «исполнители», поскольку в рамках учебной дисциплины «Электрофизические и электрохимические технологии в машиностроении» трудовая деятельность человека в технологической системе не рассматривается.

энергии. В связи с тем, что во многих литературных источниках *энергия* трактуется как *движение*, далее вместо «формы движения инструмента» будем применять понятие «форма энергии».

К формам энергии, создаваемым технологическим оборудованием и подводимым к заготовке, относят механическую, электрическую, магнитную, тепловую, химическую, световую и ядерную формы [7]. Возможно создание оборудованием комбинированного энергетического воздействия на заготовку, обеспечиваемого подачей к ней одновременно энергии двух и более из ранее указанных форм.

Обработка заготовки характеризуется разнообразием видов физико-химических процессов, в результате которых происходит изменение состояния вещества, его структуры, качества поверхностного слоя, формы и размеров. При изготовлении изделий машиностроения изготовление деталей в подавляющем большинстве случаев осуществляется воздействием на заготовки энергией трёх форм или их комбинациями. К этим трём формам относятся механическая, тепловая и химическая формы энергии. Непосредственное воздействие на заготовку электрической, магнитной, световой энергии, как правило, не обеспечивает оптимальных характеристик качества, производительности и себестоимости изделий машиностроения. Для использования этих форм энергии в целях обработки заготовок в зоне обработки или непосредственно в тонком поверхностном слое тем или иным способом осуществляют их преобразование в механическую, химическую или тепловую энергию. Формируется тем самым вторичный вид энергетического воздействия на заготовку, характеризуемый преобразованием первичной формы движения рабочего вещества во вторичную.

Исходя из того, что технологический метод обработки реализуется в рамках технологической системы, можно говорить о том, что последовательность его реализации и содержание действий при обработке определяются характеристиками входящих в систему элементов и параметрами их функционирования и взаимодействия. Результатом этого взаимодействия и обработки является деталь (изделие), выпол-

ненная в соответствии с требованиями чертежа. Многообразие элементов технологической системы и их характеристик указывает на то, что технологические методы обработки можно классифицировать по разным признакам. К таким признакам относят:

- цель обработки, состоящую в изменении свойств и структуры материала, точности размеров, заданной формы, качества поверхностного слоя изделия, производительности и себестоимости обработки;
- физико-химический процесс, проходящий в зоне обработки заготовки и определяющий изменения её характеристик;
- тип применяемого технологического оборудования;
- форму создаваемого оборудованием рабочего движения инструмента (по принятой терминологии – форму энергии);
- вид энергетического воздействия на границе раздела «среда – заготовка» или непосредственно в поверхностном слое, определяющий физико-химические процессы в заготовке при её обработке;
- число форм энергии, одновременно подводимых в зону обработки заготовки;
- вид технологической среды, в которой осуществляется обработка, и другие признаки.

Многообразие признаков затрудняет создание единой обобщённой классификации технологических методов обработки и обуславливает применение в различных научных и учебных изданиях классификаций, строящихся на различных признаках или их сочетаниях [6, 7, 9, 11 и др.].

В учебном пособии принята классификация технологических методов обработки, представленная в виде *дерева технологических методов*. Системообразующим признаком этой классификации принята «форма создаваемой оборудованием и направляемой к заготовке энергии» (см. рис. 1.1). Эта классификация исторически делит все технологические методы обработки на две группы: традиционные (базовые), включающие механические, химические и тепловые методы обработки, и группу методов, реализуемых с использованием других видов энергетического воздействия или представляемых как

комбинации различных видов энергетического воздействия на заготовку. Последняя группа методов получила в научной и учебной литературе название «Электрофизические и электрохимические методы обработки». В некоторых литературных источниках она названа «физико-химическими методами обработки» [11, 18 и др.]. На основе этого подхода разработана в виде схемы трёхуровневая классификация технологических методов обработки (рис. 1.2).

Вошедшие в базовые (традиционные) методы обработки — механические, химические и тепловые методы — характеризуются тем, что формируемое оборудованием первичное энергетическое воздействие в рамках технологической системы является тем воздействием, которое и осуществляет в зоне контакта «среда — заготовка» обработку заготовки. Иначе говоря, энергетическое воздействие на заготовку происходит без преобразования первичной формы энергии во вторичную (см. рис. 1.1).

Для механических и термических методов обработки их дифференциация в дереве технологических методов обработки дана только на первом видовом уровне. Это связано с тем, что изучение технологий и методов данных групп не входит в задачи учебной дисциплины «Электрофизические и электрохимические методы обработки».

Группу химических методов обработки в соответствии со схемой (рис. 1.2) составили методы, в основе которых лежит воздействие на обрабатываемую поверхность заготовки химически активных веществ. К этим методам отнесены методы химического травления и химические методы нанесения покрытий.

В группе «Электрофизических и электрохимических методов обработки» представлены две подгруппы методов. Первая из них характеризуется созданием оборудованием электрической, магнитной или лучевой формы энергии и преобразованием этой формы в зоне контакта «среда — заготовка» в традиционные формы энергии. В этом случае энергетическое воздействие на заготовку происходит с преобразованием первичной формы энергии, создаваемой оборудованием, во вторичную, обеспечивающую осуществление обработки.





Рис. 1.2. Классификация технологических методов обработки заготовок

В составе первой подгруппы электрофизических и электрохимических методов обработки выделены: электроэрозионные методы, электрохимические методы, методы обработки потоками высокоэнергетических микрочастиц и ультразвуковые методы обработки. Классификация методов этих групп, рассмотренных в данном пособии, представлена на рисунке 1.3.



Рис. 1.3. Классификация электрофизических и электрохимических методов обработки, осуществляемых с преобразованием формы энергетического воздействия

В основе обработки заготовок электроэрозионными методами лежит воздействие на заготовку быстро повторяющихся электрических разрядов, в результате которых происходит локальное расплавление на поверхности заготовки материала и удаление его из зоны

обработки. В группу электроэрозионных методов обработки включены электроискровой и электроконтактно-дуговой методы.

Обработка заготовок электрохимическими методами основана на окислительно-восстановительных процессах, проходящих на электродах, опущенных в электролит, при прохождении через электролит электрического тока. Эти методы позволяют осуществлять обработку заготовки со снятием поверхностного слоя (удаление припуска), нанесением покрытий или изменением качества поверхности. В связи с этим в данную группу включены электрохимические методы размерной обработки, методы отделочной обработки и электрохимические методы нанесения покрытий.

Технологические методы, входящие в группу обработки потоками высокоэнергетических микрочастиц, основаны на локальном воздействии на заготовку концентрированного потока микрочастиц, что позволяет достигать плотностей мощности вплоть до  $10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>. В результате воздействия микрочастиц происходит поверхностная обработка заготовки. Микрочастицами, используемыми при обработке, могут быть электроны, фотоны, ионы, частицы плазмы. Соответственно этому, технологические методы обработки заготовок этой группы получили следующие наименования: электронно-лучевые, светолучевые, ионно-вакуумные и плазменные методы обработки.

Вторая подгруппа «Электрофизических и электрохимических технологий» — комбинированные методы обработки — включает те методы обработки, в рамках которых энергетическое воздействие на заготовку осуществляется приложением к ней энергий двух и более форм. При этом результат обработки не является простой суммой воздействия на заготовку каждой из этих форм энергии. При совместном их воздействии происходит взаимовлияние составляющих энергии разных форм друг на друга, приводящее к возникновению новых физико-химических эффектов и получению в результате обработки технико-экономических показателей процесса, недостижимых при обработке каждым из методов или простой их суммой.

Основанием классификации методов обработки этой подгруппы принят признак выделения из совокупности воздействующих на

заготовку энергий разных форм энергии той формы, которая является первопричиной начала процесса обработки. Эта подгруппа технологических методов обработки в настоящее время динамично развивается и непрерывно дополняется новыми методами. Поэтому на рисунке 1.4 перечень её строго не очерчен, а раскрыт в той степени, которая вытекает из цели и задач данного пособия, т. е. преимущественно для групп комбинированных механических и комбинированных химических и электрохимических методов обработки, нашедших наибольшее распространение в механосборочных технологиях.



Рис. 1.4. Классификация комбинированных методов обработки

С целью создания полного представления о возможностях использования конкретных видов энергетического воздействия на заготовку (см. рис. 1.1) в разделы 2, 3 и 4 введены подразделы, раскрывающие сущность и характеристики некоторых комбинированных методов обработки. К этим методам отнесены лишь те, для которых основным энергетическим воздействием, инициирующим обработку, является то, которое составляет основу обработки для методов всего раздела.

Реализация технологического метода при обработке не является одномоментным актом. В технологическом процессе механосборочного производства эта реализация характеризуется не только содержанием метода, но и последовательностью разнообразных действий оператора и оборудования при его выполнении. Отнесённый к конкретному изделию, в рамках которого он реализуется, технологический метод в последовательности действий, необходимых для его выполнения, становится структурным элементом технологического процесса изготовления изделия, имеющего свою структуру и последовательность действий (элементов). Выполнение этих действий предполагает использование оборудования и технологической оснастки различных видов, применение разнообразных режимов обработки и методов контроля. В соответствии с терминологией государственных стандартов Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП) такие действия становятся технологическими и вспомогательными операциями и переходами. В некоторых технологиях число таких операций (переходов) при реализации метода ЭФХО исчисляется несколькими десятками.

В этих случаях обработку заготовок с использованием технологического метода ЭФХО рассматривают как технологический процесс со всеми атрибутами его структуризации и описания. Этот подход к содержанию технологического метода не противоречит ГОСТ 3.1109-83, в соответствии с которым технологический процесс может быть отнесён к изделию, его составной части или к методу обработки, формообразования и сборки. Технологические процессы, в основе которых лежит реализация того или иного технологического метода группы ЭФХО будем называть в дальнейшем технологиями ЭФХО.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

### 2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на разрушении токопроводящих материалов электродов  $1$  и  $2$ , помещённых в ванну с диэлектрической жидкостью  $3$ , при прохождении в зазоре  $\delta$  между электродами часто повторяющихся электрических разрядов, создаваемых источником импульсов электрического напряжения (рис. 2.1). Впервые этот метод был предложен советскими учеными Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко в 1943 году.

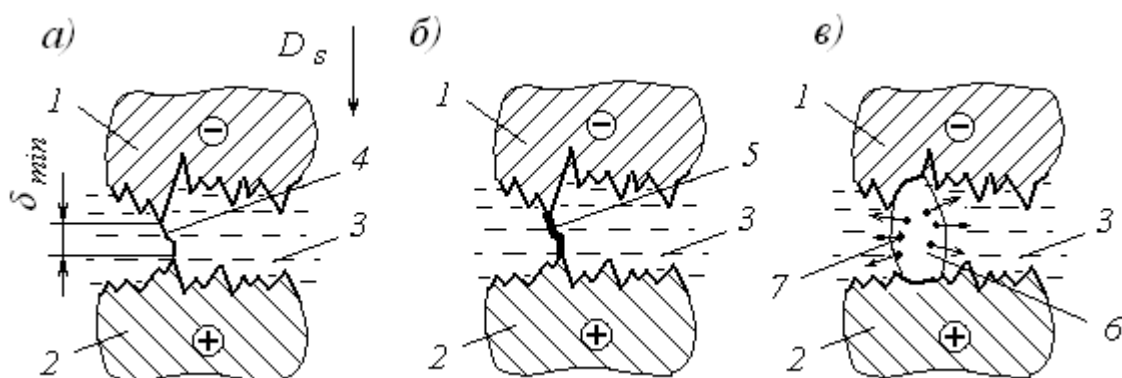


Рис. 2.1. Этапы возникновения и развития электрического разряда

При электроэрозионной обработке одним электродом является заготовка, а вторым — инструмент. Процесс разрушения материала в результате обработки этим методом получил название электрической эрозии. Обработка происходит при поступательном движении  $D_s$  одного из электродов в направлении другого электрода, неподвижно закреплённого в ванне на столе станка.

В промежутке между электродами (межэлектродном промежутке) идут сложные процессы, определяемые физическими явлениями прохождения между электродами импульсов электрического тока. Электроды  $1$  и  $2$  имеют шероховатые поверхности. При их сближении всегда находятся два выступа микронеровностей, расположенных на наименьшем расстоянии  $\delta_{min}$  (рис. 2.1, а). В определённый момент

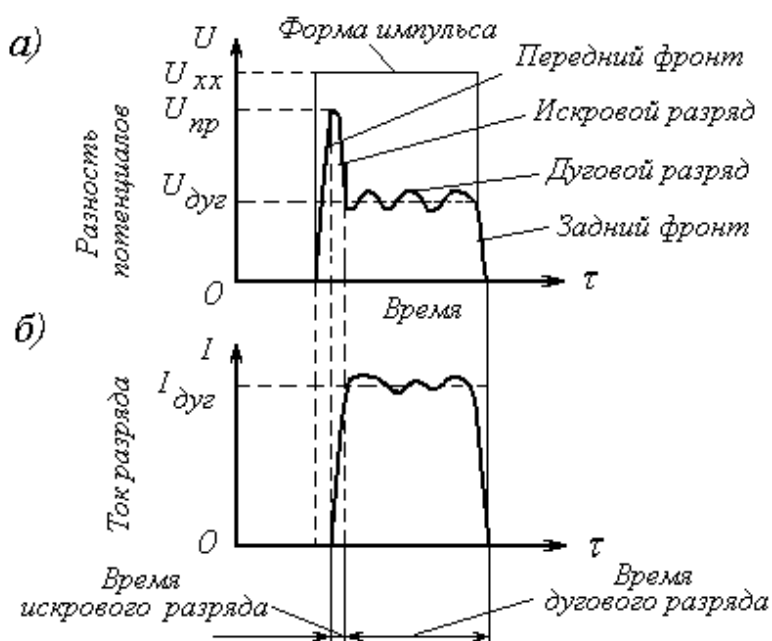
сближения электродов разность потенциалов  $U$  между близко расположенными выступами оказывается достаточной для ионизации молекул диэлектрической жидкости 3. Вышедшие с орбит атомов электроны устремляются к аноду, а образовавшиеся положительно заряженные ионы — к катоду. Образуется токопроводящий канал 4 (рис. 2.1, а). Электроны, двигаясь с высокой скоростью, соударяются с неионизированными молекулами жидкости, выбивая новые электроны и тем самым усиливая ток электрического разряда (рис. 2.1, б). Эта стадия процесса названа фазой (стадией) *искрового разряда*. По образовавшемуся токопроводящему каналу за время  $10^{-8}$ – $10^{-2}$  с протекает импульс тока большой плотности ( $\rho_I = 8$ – $10$  кА/мм<sup>2</sup>), что вызывает расширение канала разряда 5 (рис. 2.1, в) и рост температуры в канале и на его площадках контакта с электродами до 8000–10000 градусов. Фаза неустойчивого искрового разряда переходит в фазу *дугового разряда*.

Физические процессы, идущие в межэлектродном промежутке (МЭП), изучают с помощью осциллограмм напряжения и тока, строящихся при прохождении единичного импульса через диэлектрическую жидкость. Один из возможных видов таких стилизованных осциллограмм, характеризующих изменения напряжения  $U$  и силы тока  $I$  при прохождении единичного прямоугольного импульса через МЭП, представлен на рисунке 2.2 [14].

Известно, что любая цепь помимо активного омического сопротивления обладает ёмкостью и индуктивностью, которые являются инерционными элементами. Наличие их вносит определённую задержку в скорости нарастания и спада напряжения на электродах, что приводит к появлению переднего и заднего фронтов, указанных на рисунке 2.2, а.

Участки электродов в зонах их контакта со столбом электрического разряда плавятся. Расплавленный металл из-за быстрого теплового расширения выбрасывается в виде капель в окружающую жидкость, где застывает в виде мелких твёрдых частиц 7 (рис. 2.1, в). Под действием высоких температур диэлектрическая жидкость в зоне

разряда разлагается и испаряется, благодаря чему здесь образуется быстро расширяющийся парогазовый пузырь б.



На рисунке 2.2 введены следующие обозначения:  
 $U_{хх}$  - напряжение холостого хода;  
 $U_{пр}$  - напряжение пробоя;  
 $U_{дуг}$  - напряжение дуговой стадии разряда;  
 $I_{дуг}$  - сила тока дуговой стадии разряда.

Рис. 2.2. Диаграммы изменения напряжения (а) и силы тока (б) в период прохождения единичного прямоугольного импульса [14]

Твёрдые продукты эрозии выносятся из МЭП в диэлектрическую жидкость под воздействием ударных волн и гидродинамических явлений, вызванных образованием и «захлопыванием» газовых пузырей. На поверхностях электродов образуются эрозионные лунки. Каждая лунка является результатом одного импульсного разряда. Размеры лунок зависят от энергии и длительности импульсов, а также теплофизических характеристик материалов электродов. Большая частота следования разрядов обеспечивает величину общего удельного объёма удаляемого материала достаточную, чтобы использовать данный метод для высокопроизводительной обработки заготовок.

На рисунке 2.3 представлена обобщённая схема электроэрозионной обработки заготовки. На нём изображена схема прошивания отверстия в заготовке 5 электродом-инструментом 3. Заготовка опущена в ёмкость с диэлектрической жидкостью 4. Электрод-инструмент в процессе обработки совершает движение подачи  $D_s$  в направлении к электроду-заготовке таким образом, что между ними



выдерживается постоянный межэлектродный зазор  $\delta_m$ . Обеспечивает постоянство зазора  $\delta_m$  следящая система 2.

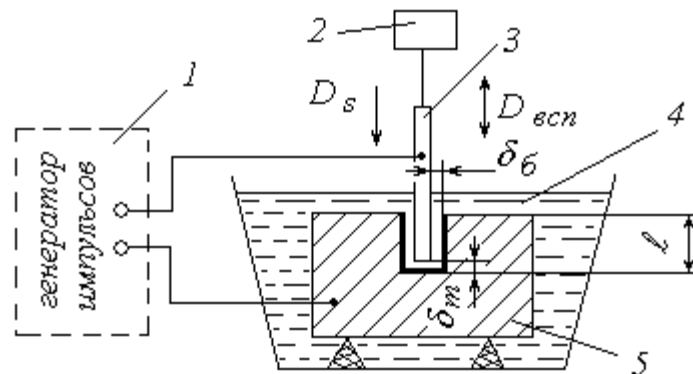


Рис. 2.3. Схема электроэрозионной обработки

Импульсы напряжения на электроды поступают от генератора импульсов 1. Искровые разряды проходят не только по торцу электрода-инструмента, но и по его боковым сторонам. В связи с этим между электродом-инструментом и электродом-заготовкой формируется кроме торцевого зазора  $\delta_m$  ещё и боковой зазор  $\delta_b$ .

## 2.2. ВИДЫ И СХЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКОЙ

Электроэрозионным методом обработки осуществляют процессы формообразования поверхностей заготовок, упрочнения их поверхностного слоя и нанесения на обрабатываемые поверхности покрытий. Основное назначение этого технологического метода из перечисленных областей связано с формообразованием на заготовке поверхностей заданных форм.

### Формообразование поверхностей изделий электроэрозионной обработки

К основным формообразующим электроэрозионным методам обработки относят: электроэрозионное прошивание, электроэрозионное разрезание и вырезание заготовок, электроэрозионное объёмное копирование, электроэрозионное шлифование, маркирование (клеймение) и гравирование. Некоторые схемы их реализации представлены на рисунках 2.4 и 2.5 [2, 4, 9, 10, 16, 18].

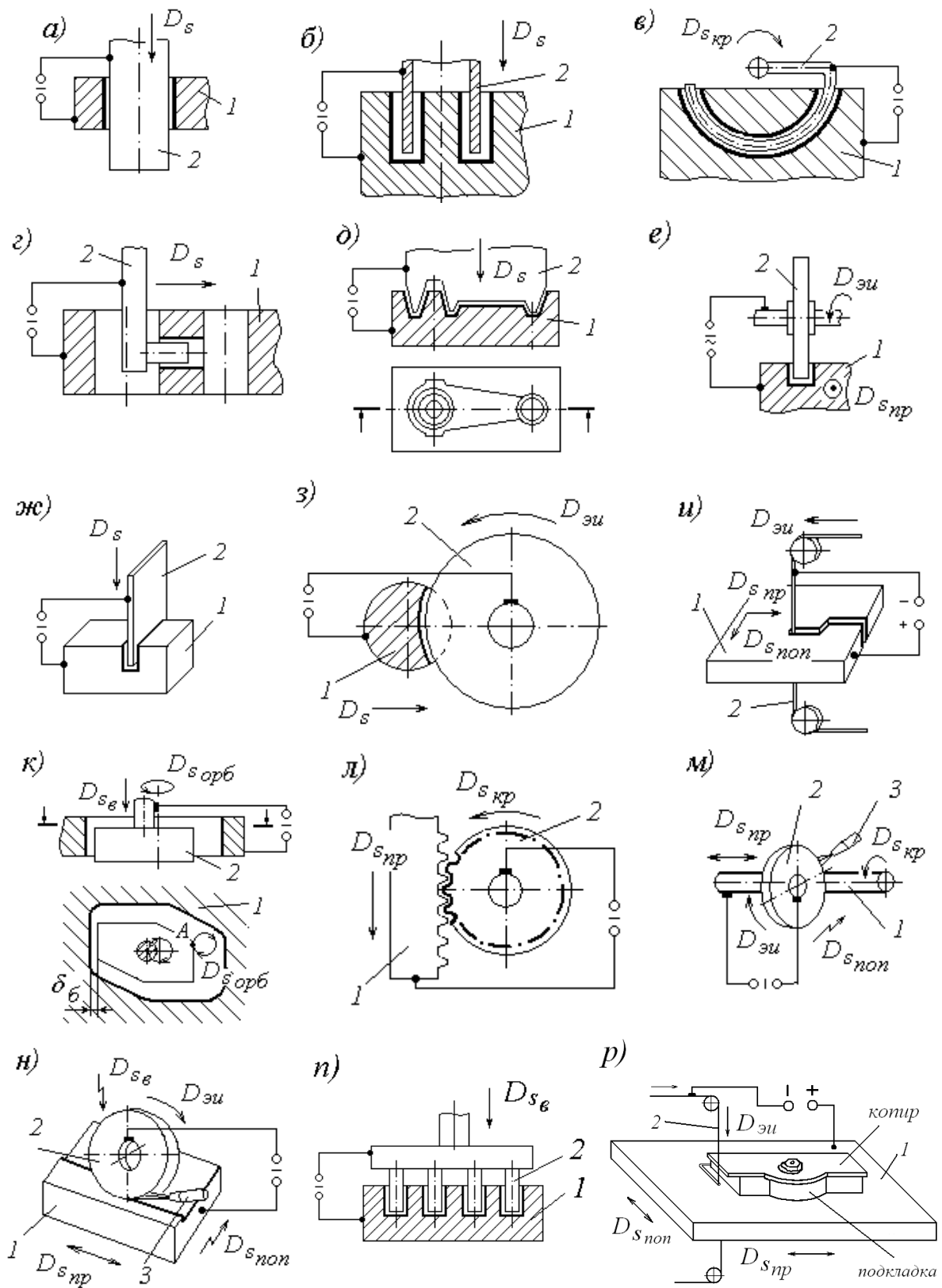


Рис. 2.4. Схемы электроэрозионных работ:

1 – заготовка; 2 – электрод-инструмент; 3 – сопло для подачи  
диэлектрической жидкости

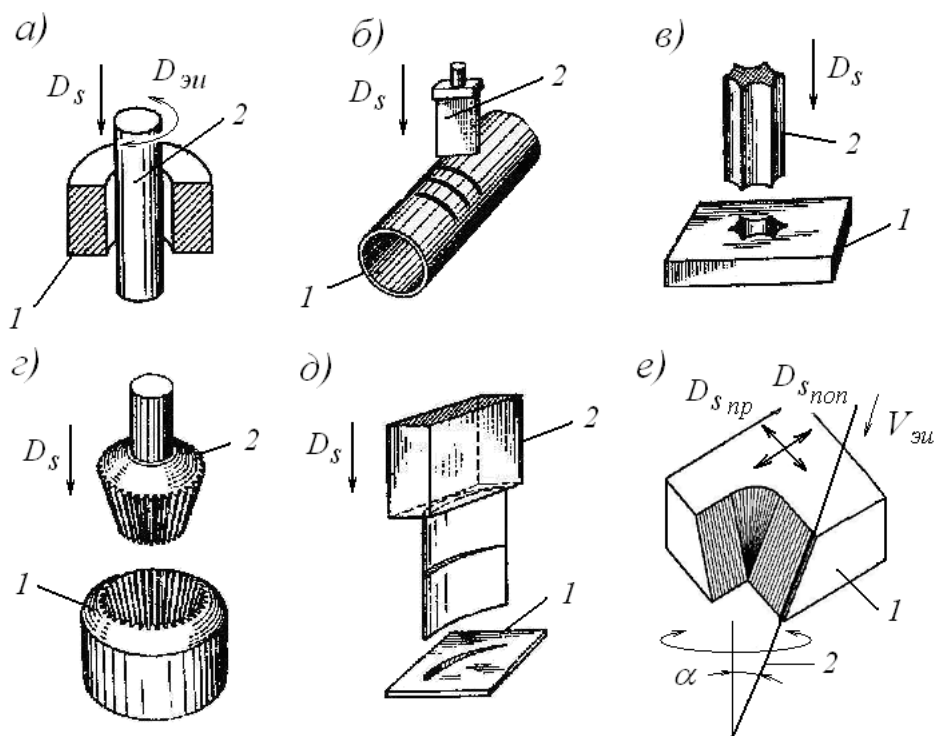


Рис. 2.5. Виды электроэрозионных работ

На схемах обработки, представленных на рисунках 2.4 и 2.5, введены следующие обозначения:

$D_s$  — движения подачи электрода-инструмента или заготовки в продольном (индекс *пр*) или поперечном (индекс *поп*) направлениях, обеспечивающие непрерывность формообразования всей поверхности вплоть до получения заданных размеров;

$D_{эл}$  — дополнительное движение электрода-инструмента, необходимое для обеспечения равномерного его изнашивания по всей рабочей поверхности;

$D_{s_{кр}}$  (рис. 2.4, л) — круговое движение подачи заготовки, являющееся составляющей движений обкатки ( $D_{s_{кр}}$  и  $D_{s_{пр}}$ ), подобное движениям, применяемым при нарезании зубчатых колёс лезвийными инструментами. Заготовке и инструменту при обкатке придают такие движения, при которых обрабатываемая (рабочая) часть электрода-инструмента рядом последовательных приближений «обходит» всю поверхность будущего изделия. Форма образующейся поверхности определяется при обработке таким способом профилями образующих

поверхностей электрода-инструмента и кинематикой инструмента и заготовки.

Формообразование поверхностей изделий электроэрозионными методами осуществляют по трём основным схемам (рис. 2.4):

— копированием формы профилированного электрода-инструмента на электроде-заготовке (рис. 2.4, *а, б, в, г, д, н*);

— взаимными перемещениями обрабатываемой заготовки и не профилированного электрода-инструмента (рис. 2.4, *е, ж, з, и, м, н, р*);

— сочетанием взаимного перемещения заготовки и профилированного электрода-инструмента (метод обкатки или огибания), (рис. 2.4, *к, л*).

Используемые в данных схемах электроды-инструменты подразделяют на профилированные и не профилированные. Профилированными электродами-инструментами называют инструменты, имеющие форму изготавливаемой поверхности и обеспечивающие получение на заготовке поверхности этой формы (рис. 2.4, *а, б, в, д, к, л*). К непрофилированным электродам-инструментам относят инструменты простой геометрической формы, выполненные в виде проволоки, диска или пластины (рис. 2.4, *ж, з, и, н, р*). Электроды-инструменты данного вида используют при разрезании заготовок, обработке плоских поверхностей или вырезании заготовок со сложными контурными поверхностями.

***Электроэрозионное прошивание отверстий.*** Прошивание отверстий реализуют методом копирования на заготовке формы электрода-инструмента. Этим методом изготавливают сквозные и глухие отверстия различной формы, фасонные поверхности штампов и прессформ и удаляют из отверстий сломанный режущий инструмент (рис. 2.4, *а, б, в, г, н*; рис. 2.5, *а, в, г, д*).

Поскольку электроэрозионная обработка осуществляется практически без силового воздействия на заготовку, этот метод прошивания отверстий успешно применяют в тонкостенных изделиях типа фильтров и сит. Электроэрозионным методом можно получить соединительные каналы и пазы в деталях гидро- и пневмоаппаратуры

практически любой формы, даже если они расположены в труднодоступных местах. Для выполнения таких операций рекомендуется использовать схемы, представленные на рисунках 2.4, в, г. Электроэрозионным методом можно получать отверстия малых диаметров (от 0,02 мм) в форсунках, распылителях, сетках и в заготовках других деталей.

Электроэрозионное прошивание отверстий может вестись на черновом, получистовом и чистовом режимах обработки. Для снижения погрешностей формы поперечного сечения обработанного отверстия, вызываемому погрешностями формы электрода-инструмента, ему могут придать дополнительное вращение  $D_{эи}$  (рис. 2.5, а).

Электроэрозионной обработкой обычно прошивают отверстия на глубину до 20 диаметров при использовании стержневого электрода-инструмента и до 40 диаметров — трубчатого электрода-инструмента. При большой глубине отверстия ( $l/D > 25$ ) прошивание осуществляют за несколько переходов, последовательно увеличивая диаметр электрода-инструмента и периодически выводя его из отверстия для удаления продуктов эрозии. Глубина прошивания отверстия может быть значительно увеличена (до  $300D$ ), если вращать электрод-инструмент, прокачивать рабочую жидкость через МЭП или отсасывать её из зоны обработки.

**Электроэрозионное объёмное копирование.** Электроэрозионное объёмное копирование предполагает фасонное формообразование полости, которое обычно получают обработкой на копировально-фрезерных станках или станках с числовым программным управлением. Обрабатываемая поверхность на заготовке является при этом обратным отражением формы соответствующей поверхности электрода-инструмента (рис. 2.4, д). Этот метод характеризуется простотой рабочих движений и широко используется при изготовлении штампов, прессформ, форм для литья, обработке рабочих колёс турбин, турбинных и компрессорных лопаток с площадью обработки  $S$  до  $5000 \text{ мм}^2$ .

Электроэрозионное объёмное копирование ведут сначала на черновом режиме обработки черновым электродом-инструментом. Не доводя глубину полости до окончательного размера, электрод-

инструмент заменяют на чистовой. Далее обработку ведут на чистовом режиме.

**Электроэрозионное разрезание.** При выполнении этой операции от исходного прутка или материала другой формы отрезается заготовка с заданными геометрическими размерами (рис. 2.4, *ж, з, и*). Электроэрозионное разрезание заготовок осуществляют пластинчатым, дисковым или проволочным электродом-инструментом. Производительность электроэрозионного разрезания труднообрабатываемых материалов от двух до десяти раз выше, чем при разрезании заготовок из аналогичных материалов методами резания.

**Электроэрозионное вырезание.** К распространённым методам электроэрозионной обработки относят метод вырезания на заготовке непрофилированным проволочным электродом-инструментом прямолинейных и криволинейных поверхностей (рис. 2.4, *и*). В работе используется проволока диаметром от 0,015 до 0,50 мм.

Проволочный электрод-инструмент постоянно возобновляется в зоне обработки путём перемотки с подающей катушки на приёмную (движение  $D_{эи}$ ). Узкие прямолинейные резы шириной менее 0,15 мм получают при относительном перемещении заготовки  $1$  и электрода-инструмента  $2$  последовательно по двум координатным направлениям  $D_{s_{np}}$  и  $D_{s_{non}}$  (рис. 2.4, *и*). Детали со сложными контурными поверхностями получают посредством перемещения электрода-инструмента по копиру  $3$  (рис. 2.4, *р*) или заданием этих перемещений с помощью управляющей программы на станках с числовым программным управлением. Таким способом изготавливают кулачки, вырубные штампы, шаблоны и другие детали сложной конфигурации.

**Электроэрозионное формообразование канавок и поверхностей сложной формы.** Пример формообразования прямоугольного канавки (паза) на заготовке электроэрозионным методом представлен на рис. 2.4, *е*. Этот метод реализуется прямолинейным движением подачи заготовки  $1$  и вращательным движением  $D_{эи}$  электрода-инструмента  $2$ .

На рис. 2.4, л представлена схема формообразования зубчатой поверхности типа венца цилиндрического колеса. Обработка в соответствии с этой схемой осуществляется путём сочетания взаимного перемещения профилированного электрода-инструмента и заготовки. Форма обрабатываемой поверхности заготовки при этом не совпадает с формой электрода-инструмента. Последний представляет собой гребёнку с фасонными элементами, образующими в результате согласованных движений (движения обкатки электрода-инструмента и заготовки) заданный чертежом профиль. Такой способ обкатки фасонным электродом-инструментом используется для изготовления ручьёв на валках для проката изделий, при правке фасонных шлифовальных кругов, для получения узких канавок шириной менее 0,5 мм в стальных и твёрдосплавных роликах и при выполнении других подобных работ.

**Электроэрозионное шлифование.** Этот вид электроэрозионной обработки применяется для черновой и чистовой обработки плоских, наружных и внутренних цилиндрических и конических поверхностей заготовок из труднообрабатываемых материалов, магнитных, твёрдых сплавов. Электроэрозионным шлифованием достигают шероховатость поверхности по параметру  $Ra$  до 0,63 мкм.

Для реализации данного метода используют вращающиеся дисковые (рис. 2.4, м, н), пластинчатые и проволочные электроды-инструменты. При обработке заготовка может погружаться в рабочую жидкость, но применяются также схемы с подачей диэлектрической жидкости в зону обработки поливом.

**Электроэрозионное маркирование (клеймление) и гравирование.** Эти операции применяют в целях нанесения на поверхность заготовки различных знаков, надписей и рисунков. Электроэрозионное маркирование (клеймление) выполняется непрофилированным проволочным или профилированным электродом-инструментом и характеризуется чёткостью и стойкостью на истирание наносимых знаков. Профилированным электродом-инструментом в основном выполняют глубокое клеймление. Нанесение знаков выполняют за один

рабочий ход и сразу всей надписи независимо от числа знаков. Для ускорения процесса часто используют дополнительную вибрацию электрода-инструмента.

Производительность клеймления невысока и зависит от глубины наносимых знаков, которая обычно не превышает 0,1–0,3 мм. Особенно эффективно использование этого метода при нанесении знаков на выпуклые и вогнутые поверхности, на тонкостенные, закалённые, твёрдосплавные и особо точные изделия, которые механически клеймить трудно или невозможно.

***Схемы повышения производительности электроэрозионной обработки.*** Для интенсификации процесса и повышения точности электроэрозионной обработки можно использовать разные приёмы и оригинальные схемы. Например, для прошивания нескольких отверстий применяют параллельную обработку заготовки несколькими электродами-инструментами (рис. 2.4, *п*).

При изготовлении глубоких отверстий малого размера для улучшения выноса продуктов эрозии создают вибрацию или вращение электрода-инструмента. Кроме этого, можно применять прокачку рабочей жидкости через отверстия в электроде-инструменте.

Для улучшения удаления продуктов эрозии также используют способ орбитального (плоскопараллельного) перемещения электрода-инструмента (рис. 2.4, *к*), которое осуществляется перпендикулярно к направлению его рабочей подачи. При этом перемещение электрода-инструмента происходит таким образом, что все его грани во время движения остаются параллельными самим себе. Величина зазора в зоне обработки увеличивается, благодаря чему улучшаются условия удаления продуктов эрозии из межэлектродного промежутка.

### **Электроискровое упрочнение (легирование) поверхностного слоя заготовки**

Электроискровое упрочнение (легирование) является эффективным методом поверхностного упрочнения деталей машин, изготовленных из обычных конструкционных материалов. Оно позволяет



получать покрытия, прочно сцеплённые с материалом основы и обладающие высокими эксплуатационными характеристиками.

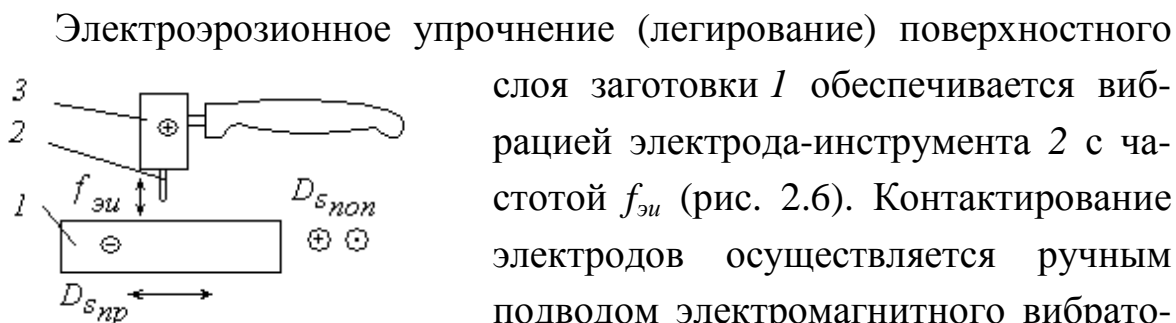


Рис. 2.6. Схема электроэрозионного упрочнения поверхности заготовки

Процесс электроискрового легирования основан на преимущественном разрушении (эрозии) материала анода при искровом разряде и переносе материала анода на поверхность катода (заготовки). Механизм процесса характеризуется значительной сложностью, представляя собой совокупность эрозионного, термического и термохимического процессов и контактного переноса материала.

При электроискровом легировании получается упрочнённая поверхность толщиной до 0,1 мм. Упрочнение поверхностного слоя детали происходит не только за счёт осаждения материала анода, но и в результате взаимодействия этого материала с основой и образования твёрдых растворов, химических соединений, оксидов, нитридов. Эффект упрочнения при электроискровом легировании увеличивается ещё и потому, что происходит импульсное воздействие температур и давлений, приводящих к измельчению структуры и образованию новых фаз.

Для изготовления упрочняющих электродов (анодов) применяют твёрдые сплавы, составляющими которых являются карбиды титана и вольфрама и кобальт; феррохром, хром-марганец, хром, алюминий, белый чугун и графит.

Верхний белый «нетравящийся» слой заготовки после упрочнения состоит из аустенита, мартенсита, нитридов железа и карбидов

легирующих элементов. Подслоя представляет собой структуру типа мартенсита и троостита, а иногда и сорбита, и является диффузионным слоем, постепенно переходящим в материал основы.

Электроискровое упрочнение применяют для повышения износостойкости и твердости поверхностей деталей машин, работающих в условиях повышенных температур; для увеличения размеров изношенных деталей машин при ремонте. Технологию электроискрового легирования используют для упрочнения поверхностей рабочих деталей дорожных, строительных и землеройных машин, работающих в абразивной среде; лопаток дробеструйных аппаратов; деталей механизмов литейных цехов. Этот метод упрочнения получил также применение для восстановления и упрочнения посадочных мест в неподвижных сопряжениях и в соединениях деталей по посадке скольжения.

Электроискровое упрочнение не требует предварительного нагрева и последующей термообработки заготовки, не вызывает её коробления. Упрочнённый слой имеет высокую износостойкость, а при достаточной глубине и соответствующем подборе электродов — высокую жаростойкость. Наклёп поверхностного слоя позволяет исключить неблагоприятное влияние электроискрового упрочнения на сопротивление усталости материала.

### **2.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Режимом обработки принято называть совокупность численных значений параметров, характеризующих условия протекания обработки и определяющих технико-экономические показатели процесса. Основными технико-экономическими показателями электроэрозионной обработки, как и при резании металлов, являются производительность, себестоимость обработки, качество получаемой поверхности и точность обработки.

В режиме электроэрозионной обработки выделяют электрические, гидродинамические и механические группы параметров.

## Электрические параметры режима электроэрозионной обработки

При электроэрозионной обработке энергия в зону съёма материала вводится отдельными порциями в виде электрических импульсов малой длительности. В паузах между импульсами жидкость восстанавливает свои диэлектрические свойства, при этом происходит её деионизация. Характеристики, определяющие энергетические параметры воздействия на заготовку этими импульсами, и составляют группу электрических параметров режима электроэрозионной обработки.

К ним относят: форму импульсов и полярность электродов, частоту  $f_u$  и скважность  $q_u$  импульсов, напряжение на электродах  $U$ , силу тока  $I$  в МЭП, энергию  $W_u$  и мощность импульса  $N_u$ .

Если характеристики этих импульсов выбраны неправильно, то обработка может стать неуправляемой, а чаще всего и невозможной. В связи с этим электрические параметры режима электроэрозионной обработки среди параметров перечисленных трёх групп являются основными, в большой степени определяющими значения остальных параметров режима.

**Формы создаваемых на электродах при электроэрозионной обработке импульсов напряжения** можно разбить на четыре группы: униполярные (рис. 2.7, а, б, в), униполярные с постоянной составляющей (пульсирующий ток), симметричные относительно начала координат знакопеременные импульсы (рис. 2.7, г) и несимметричные знакопеременные импульсы (на рисунке 2.7 не представлены).

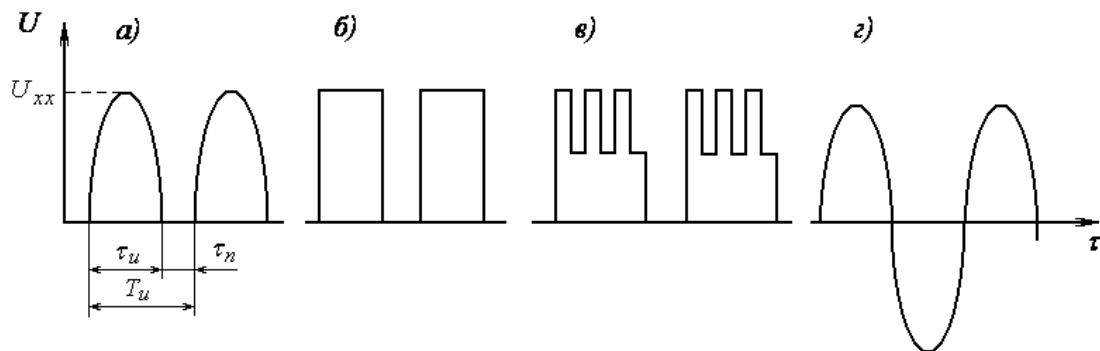


Рис. 2.7. Формы импульсов напряжения на электродах

Внутри каждой группы различают импульсы синусоидальные (рис. 2.7, *а, з*), прямоугольные (рис. 2.7, *б*), трапецеидальные, треугольные, гребёнчатые (рис. 2.7, *в*) и импульсы других форм. На рисунке 2.7 показаны только основные формы импульсов напряжения, используемые при электроэрозионной обработке.

Импульсы прямоугольной формы могут быть сгруппированы в пакеты, число которых, как и длительность паузы между пакетами, при необходимости меняется.

Число гребней в импульсах гребёнчатой формы и длительность паузы между импульсами также регулируются. При обработке импульсами гребёнчатой формы электрод-инструмент изнашивается значительно меньше, чем при обработке импульсами прямоугольной формы. Особенно заметно снижение величины износа при работе на повышенных частотах. Использование импульсов гребёнчатой формы позволяет получать поверхности заданной шероховатости при большей энергии импульса (по сравнению с энергией импульса прямоугольной формы) благодаря объединению в гребне группы импульсов.

Форма импульса и его полярность определяют величину эрозии материала обоих электродов. Так, при униполярном импульсе эрозионное удаление материала происходит преимущественно с одного из электродов, даже если материалы электродов одинаковы. На каком именно электроде съём будет больше, зависит от полярности электродов. Заготовку в связи с этим подключают к тому полюсу источника электрических импульсов, на котором эрозия интенсивнее.

При малой длительности униполярных импульсов  $\tau_{и} = 10^{-5} - 10^{-7}$  с ионная составляющая разрядного тока незначительна из-за весьма малой длительности дугового этапа разряда или просто его отсутствия (см. рис. 2.2). Поэтому основным энергоносителем на границе раздела заготовки и рабочей жидкости в этих условиях являются электроны. В результате объём удаленного материала на катоде становится меньше, чем на аноде, так как большему тепловому воздействию подвергается анод. В связи с этим в качестве анода при малой длительности импульсного разряда используют заготовку, а инструмент становится катодом. Процесс характеризуется низкой

интенсивностью эрозионного разрушения при малом расходе электрода-инструмента.

При длительности импульсов  $\tau_{ii} = 10^{-3} - 10^{-4}$  с значительно возрастает дуговой этап разряда (рис. 2.2), растёт и кинетическая энергия ионов. Большшему тепловому воздействию и термическому разрушению в этих условиях подвергается катод. Соответственно этому заготовка при длительных разрядах должна быть катодом.

Электроэрозионную обработку с подключением заготовки к положительному полюсу источника тока (аноду), а электрода-инструмента к отрицательному полюсу (катоду) называют обработкой с *прямой полярностью электродов*. Обработка с противоположным потенциалом на электродах считается обработкой с *обратной полярностью*.

Исторически режим электроэрозионной обработки с использованием прямой полярности получил название *электроискровой обработки*, а режим обработки на обратной полярности — *электроимпульсной обработки*. Такое приравнивание содержания понятий «режим обработки» и «метод обработки» не является правильным, так как изменение полярности электродов как одного из элементов режима обработки не приводит к изменению метода обработки. В связи с этим в принятой классификации методов электроэрозионной обработки (см. рис. 1.3) эти разновидности режима электроэрозионной обработки названы электроискровой обработкой. Принципиальная схема электроискрового вида электроэрозионной обработки при прошивании отверстия приведена на рисунке 2.3.

В зависимости от требуемых точности выполнения размеров и значений параметров шероховатости обработанных поверхностей электроэрозионную обработку разделяют на черновую (предварительную), получистовую и чистовую. Границы достигаемых при каждом виде обработки требуемых по чертежу параметров в данном случае, как и при других методах обработки, весьма условны. Так, за чистовую обработку принимают обработку, обеспечивающую 6–9-й качества точности размеров и шероховатость поверхности

по параметру  $Ra$  не более 1,25...3,2 мкм. Черновая обработка, в свою очередь, характеризуется 12–14 квалитетами точности и высотой микронеровностей профиля обработанных поверхностей  $Ra$  12,5 мкм и более.

Исходя из особенностей физических процессов в зоне обработки и достигаемой производительности снятия припуска электроискровую обработку, реализуемую на прямой полярности, относят, в основном, к чистовым методам электроэрозионной обработки. Обработку, характеризуемую обратной полярностью электродов, используют при реализации черновой обработки заготовок. Современное оборудование обеспечивает работу как на режиме прямой, так и на обратной полярности, что позволяет проводить черновую и чистовую обработку на одном станке при неизменном закреплении заготовки.

При использовании симметричных знакопеременных импульсов полярность электродов периодически меняется, что в целом увеличивает удельный износ электрода-инструмента по отношению к электроискровой обработке униполярными импульсами как с прямой, так и с обратной полярностями. С целью снижения влияния этого фактора на удельный износ электрода-инструмента, приходящийся на единицу длины его рабочей части при знакопеременном импульсе, используют вращающийся электрод-инструмент, выполненный в виде диска (рис. 2.8, а).

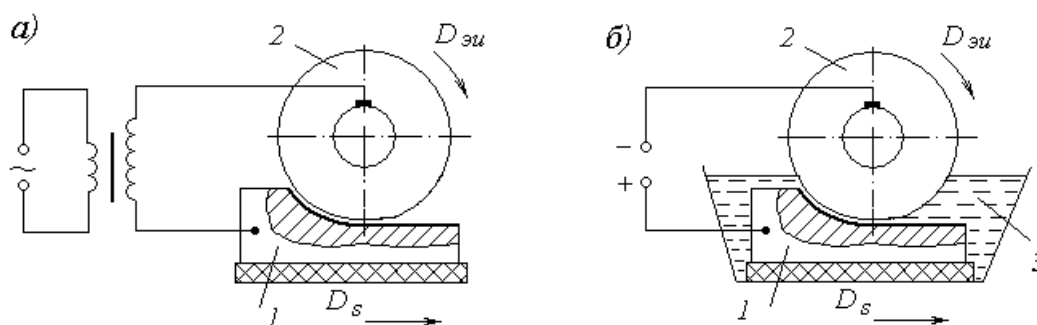


Рис. 2.8. Принципиальные схемы электроконтактно-дуговой обработки:

а) — на воздухе; б) — в жидкости

На вращающемся электроде удельная тепловая нагрузка на единицу площади рабочей поверхности в сотни раз меньше, чем на

заготовке. В результате этого диск-электрод изнашивается значительно меньше перемещающегося электрода-инструмента при реализации электроискровой обработки с не вращающимся электродом-инструментом. Такой процесс, реализуемый на воздухе, получил название в литературе электроконтактной обработки [2, 16].

Развитием метода электроконтактной обработки стало проведение обработки заготовки вращающимся диском (электродом-инструментом) в диэлектрической жидкости при униполярном напряжении на электродах с прямой полярностью без применения генератора импульсов (рис. 2.8, б). Обрабатываемая заготовка в этом случае принимается за анод. Данный способ реализации электроэрозионной обработки получил название *электроконтактно-дуговой обработки*.

В связи с более высокими показателями процессов реализации электроконтактно-дугового метода (см. рис. 2.8, б) по отношению к схеме обработки электроконтактным методом на воздухе (см. рис. 2.8, а) электроэрозионная обработка на воздухе вращающимся электродом-инструментом в настоящее время не применяется. За всеми разновидностями электроэрозионной обработки вращающимся электродом-инструментом закреплено название электроконтактно-дуговой обработки (см. рис. 1.3).

Механизм протекания процесса эрозии при электроконтактно-дуговой обработке существенно отличается от рассмотренного ранее механизма удаления материала при электроискровой обработке. Импульсы тока при обработке вращающимся диском, используемым как электрод-инструмент, формируются непосредственно в МЭП между электродом-инструментом и заготовкой, поверхности которых имеют микронеровности. При вращении электрода-инструмента микровыступы на его периферии периодически приближаются к заготовке вплоть до контакта между ними. На определённом расстоянии между электродами происходит одиночный разряд, переходящий в дуговой разряд и вызывающий расплавление металла заготовки. Расплавленные частицы металла удаляются из зоны контакта быстровращающимся

инструментом. Часть из них, контактируя с обработанной поверхностью, внедряется в неё, значительно ухудшая качество этой поверхности. В связи с этим электроконтактно-дуговая обработка выполняется чаще всего на заготовительных операциях и на таких черновых операциях, где не предъявляются какие-либо требования к качеству обрабатываемых поверхностей.

**Параметры импульсов разрядного тока.** Основными параметрами импульсов являются: длительность импульсов  $\tau_u$ , (с), (см. рис. 2.6, а), частота их следования  $f_u$  (Гц), скважность  $q_u$  и энергия импульса  $W_u$  (Дж). Импульсы характеризуются также крутизной переднего и заднего фронтов, напряжением холостого хода  $U_{xx}$ , максимальными и средними значениями силы тока ( $I_{max}$ ,  $I_{cp}$ ) и напряжения ( $U_{max}$ ,  $U_{cp}$ ).

Импульсы следуют друг за другом с определённой периодичностью, характеризуемой *длительностью импульса  $\tau_u$ , паузой* между ними  $\tau_n$  и *периодом импульсного процесса  $T_u$*  (см. рис. 2.3):

$$T_u = \tau_u + \tau_n. \quad (2.1)$$

*Частота следования импульсов  $f_u$*  (Гц) обратно пропорциональна их периоду и определяется в зависимости от заданных длительности импульсов и пауз между ними по формуле

$$f_u = 1/T_u = 1/(\tau_u + \tau_n). \quad (2.2)$$

При электроэрозионной обработке используются частоты следования импульсов в пределах от 50 Гц до 2 МГц.

*Скважность импульсов  $q_u$*  — параметр режима электроэрозионной обработки, характеризующий отношение периода импульсного процесса  $T_u$  к длительности импульса  $\tau_u$ :

$$q_u = T_u/\tau_u = 1/f_u \tau_u. \quad (2.3)$$

*Энергию импульса  $W_u$*  (Дж) определяют по формуле

$$W_u = \int_0^{\tau_u} U(\tau)I(\tau)d\tau, \quad (2.4)$$

где  $U(\tau)$  и  $I(\tau)$  — текущие значения напряжения на электродах и силы тока в МЭП при прохождении импульса.



Энергию импульсов выбирают в зависимости от обрабатываемого материала и требуемой шероховатости поверхности. По энергии импульсов режимы электроэрозионной обработки разделяют на мягкие (менее 0,05 Дж), средние (от 0,05 до 0,5 Дж) и жёсткие (от 0,5 до 5 Дж), что соответствует выполнению чистовой, получистовой и черновой видов обработки.

Вместо энергии импульса  $W_u$  на практике часто используют значение энергии  $W$ , затрачиваемой за период импульсного процесса  $T_u$ . Для этого определяют легко измеряемые по приборам оборудования средние значения силы тока в МЭП  $I_{cp}$  (А) и напряжение  $U_{cp}$  (В) на электродах в период прохождения дугового этапа разряда. Рассчитывают энергию импульса в этом случае по формуле

$$W = I_{cp} U_{cp} T_u = I_{cp} U_{cp} / f_u. \quad (2.5)$$

Средняя мощность  $N$ , затрачиваемая на обработку в период импульсного процесса  $T_u$ , определяется по формуле (2.6).

$$N = I_{cp} U_{cp}. \quad (2.6)$$

Для определения связи физических процессов с вводимой в МЭП энергии используют характеристику *плотности мощности*  $\rho_u$  (Вт/м<sup>2</sup>), определяемую по формуле

$$\rho_u = N/S, \quad (2.7)$$

где  $S$  — площадь заготовки, на которую воздействует одиночный импульс, м<sup>2</sup>.

При электроэрозионной обработке плотность мощности достигает  $10^8$ – $10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>. Создание таких плотностей возможно только на относительно малых площадях.

### **Гидрокинематические параметры электроэрозионной обработки**

Электроэрозионная обработка, как правило, ведётся в среде диэлектрической жидкости, которая способствует возбуждению электрического разряда между электродами при относительно низком напряжении, обеспечивает естественную и (или) принудительную эвакуацию продуктов эрозии из рабочей зоны и охлаждает рабочую зону, заготовку и инструмент.

Очевидно, что весь металл, поступающий из лунок в рабочую межэлектродную зону в единицу времени, должен быть из неё удалён за этот же период. В противном случае МЭП заполнится отходами эрозии (шламом). Образование шлама приводит к изменению электрических параметров МЭП (электропроводимости и др.), ухудшению точности обработки и снижению технико-экономических показателей процесса. Удаление продуктов эрозии осуществляется естественной и искусственной организацией движения жидкости.

При естественной эвакуации продуктов эрозии движение жидкости возникает в результате расширения канала разряда и последующего роста объёма газового пузыря. Газовый пузырь действует как поршень, перемещая в МЭП жидкость, способствуя обновлению её состава и удалению взвешенных частиц. Скорость эвакуации продуктов эрозии определяется скоростью движения жидкости в МЭП и степенью захвата образовавшихся эрозионных частиц потоком, которая зависит от кинематической вязкости жидкости.

При повышенных режимах обработки и сложной форме обрабатываемой поверхности естественная эвакуация не обеспечивает полного удаления отходов. В связи с этим возможно зашламливание МЭП продуктами эрозии. Для устранения этого явления осуществляют прокачку жидкости через межэлектродный промежуток. Прокачка ускоряет процесс удаления продуктов эрозии, но усложняет протекание и достижение заданных параметров электроэрозионной обработки. Возникающие при прокачке гидродинамические силы вызывают деформацию и колебания инструмента и заготовки, которые приводят к появлению погрешностей обработки и снижению точности изготовленной детали.

Сложности прокачки жидкости через МЭП связаны с тем, что величина зазора, особенно при чистовых режимах обработки, небольшая. Значения его находятся в пределах 0,05–0,35 мм. Поэтому для создания требуемой скорости движения рабочей жидкости в МЭП прокачку жидкости осуществляют под давлением. В связи с малым межэлектродным зазором давление рабочей жидкости на входе в

рабочую зону доводят до 200 кПа. При прошивке глубоких отверстий диаметром 0,2...0,5 мм применяют станции для подачи рабочей жидкости под давлением до 10 МПа.

На рисунке 2.9 представлен ряд схем реализации искусственной промывки межэлектродного промежутка.

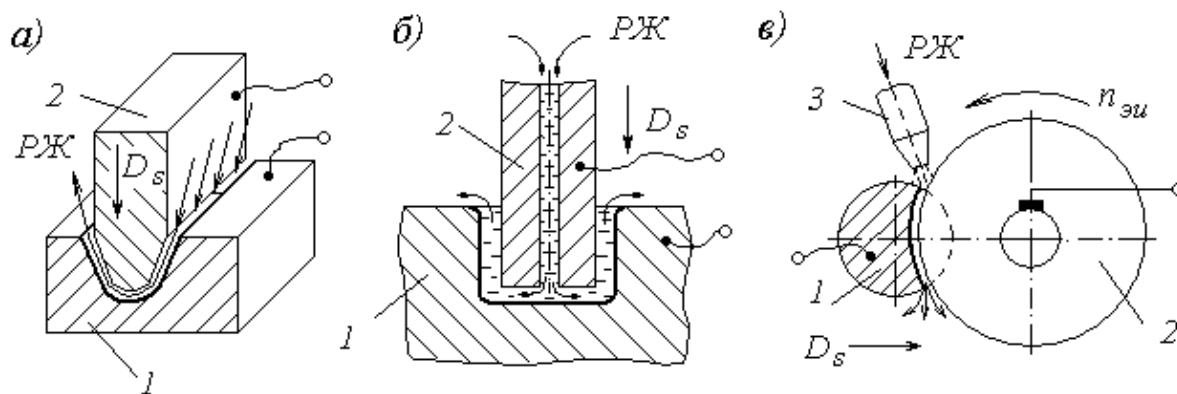


Рис. 2.9. Схемы искусственной промывки межэлектродного промежутка: а) — боковой прокачкой рабочей жидкости (РЖ); б) — прокачкой рабочей жидкости через инструмент; в) — поливом рабочей жидкости из сопла

С целью улучшения условий удаления отходов из зоны обработки на современном оборудовании вводится искусственная эвакуация шлама, реализуемая путем низкочастотного и прерывистого импульсного движения электрода-инструмента по следующему циклу: быстрый отвод от заготовки (увеличение межэлектродного зазора) — промывка — восстановление рабочего зазора. На схеме электроэрозионной обработки (см. рис. 2.3) это движение обозначено как  $D_{всп}$ .

Наибольшее распространение в качестве диэлектрических жидкостей получили низкомолекулярные углеводородные продукты переработки нефти, так как они пригодны для обработки различных материалов, дают минимальный износ электрода-инструмента при прочих равных условиях. В прошивных станках используются специальные жидкости на основе нефтепродуктов с температурой вспышки более 100 °С, температурой кипения более 200 °С, высокой стойкостью к окислению, высокой моющей способностью и хорошей фильтруемостью.

При электроэрозионной проволочной вырезке в качестве рабочей жидкости применяют дистиллированную воду, кремнийорганические и водные растворы двухатомных спиртов. В особо точных вырезных станках используется масло. Электроэрозионное упрочнение поверхности, как правило, осуществляется на воздухе или в среде безокислительных газов — аргона и гелия.

Основными характеристиками рабочей жидкости, обуславливающими реализацию требуемых функций при обработке, являются кинематическая вязкость  $\nu_k$ , плотность, температура вспышки (не менее  $61^\circ\text{C}$ ), охлаждающая способность, химическая токсичность и себестоимость.

В целях наиболее эффективного ведения процесса на получистовых и чистовых режимах, где межэлектродные зазоры малы, следует использовать маловязкие рабочие жидкости ( $\nu_k = (1,8-3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ), на черновых режимах наиболее эффективны жидкости с коэффициентом кинематической вязкости  $\nu_k = (5-6,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Важнейшим параметром режима гидродинамической прокачки жидкости является величина расхода  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), зависящая от величины межэлектродного зазора и влияющая на износ электрода-инструмента и производительность процесса. Рассчитывается  $Q$  по формуле (2.8).

$$Q = v_n S_n, \quad (2.8)$$

где  $v_n$  — скорость потока жидкости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $S_n$  — площадь поперечного сечения потока,  $\text{м}^2$ .

При электроэрозионной обработке скорость потока жидкости  $v_n$  достигает  $0,8 \text{ м}/\text{с}$  и определяется видом обработки и маркой используемого электрода-инструмента. При этих условиях расходы жидкости  $Q$  составляют от  $5 \cdot 10^{-10}$  до  $5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ .

### **Механические параметры электроэрозионной обработки**

К механическим параметрам электроэрозионной обработки относят скорость подачи электрода-инструмента  $v_s$  в направлении движения подачи  $D_s$ , значения межэлектродных торцового  $\delta_m$  и бокового  $\delta_b$  зазоров (см. рис. 2.3) и кинематические параметры вспомогательных движений. Вспомогательные движения, реализуемые, как правило,

электродом-инструментом, при принятой схеме формообразования поверхности создаются с целью уменьшения износа инструмента путём смены рабочего участка, обеспечения выноса из зоны обработки продуктов эрозии или повышения производительности обработки.

Значения скорости подачи  $v_s$ , торцового  $\delta_m$  и бокового  $\delta_b$  зазоров зависят от принятых электрических параметров электроэрозионной обработки и самоустанавливаются при реализации конкретного вида обработки для заданных параметров его режима и режима прокачки жидкости через межэлектродный промежуток.

Экспериментально установлено, что величины зазоров в наибольшей степени зависят от энергии импульса  $W_u$  или среднего тока  $I_{cp}$  и частоты импульсов  $f_u$ , расхода жидкости  $Q$  через МЭП и размеров обрабатываемой поверхности.

Для расчёта межэлектродных зазоров в работе [16] предложены экспериментально полученные интерполяционные модели, приведённые далее в виде формул (2.9) – (2.11). Формулы рекомендуются для расчёта как боковых  $\delta_b$ , так и торцовых  $\delta_m$  зазоров при прошивании отверстий цилиндрическим электродом-инструментом и обработке фасонных полостей для диапазонов режимов электроэрозионного прошивания, указанных в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Диапазоны параметров режимов электроэрозионного прошивания, используемые при расчёте по формулам (2.9) – (2.11)

Параметр режима	Единица измерения	Расчёт $\delta_b$ по формуле 2.9 (чистовая обработка)	Расчёт $\delta_b$ по формуле 2.10 (черновая и получистовая обработка)	Расчёт $\delta_m$ по формуле 2.11 (черновая обработка)
1	2	3	4	5
Средний ток, $I_{cp}$	А	2–10	4–85	4–80
Частота, $f_u$	кГц	22–200	1–44	0,4–44
Скважность, $q$		1,5–4,0	1,1–5,0	1,1–5,0

1	2	3	4	5
Амплитудное значение напряжения холостого хода, $U_{xx}$	В	65–200	50–300	50–300
Плотность тока, $\rho_I$	А/мм <sup>2</sup>	0,01–0,3	0,005–0,49	0,004–0,28
Длина вертикальной трассы эвакуации продуктов эрозии, $\ell$	мм	1–50	2–55	–
Отношение $Q/R$	см <sup>2</sup> /с	1–10	0,14–36,0	–

На чистовых режимах электроискровой обработки, реализуемых при прямой полярности процесса, боковой межэлектродный зазор  $\delta_6$  (мкм), определяется по формуле

$$\delta_6 = k (2,12 + 4,12I_{cp} - 0,0001f_u + 3,29q + 0,195U_{xx} + 39\rho_I + 0,785\ell - 6,5I_{cp}\rho_I - 0,02I_{cp}\ell - 0,008I_{cp}U_{xx}), \quad (2.9)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий сочетания материалов электрода-инструмента и заготовки: для сочетаний «медь — сталь 45»  $k = 1$ , «медь — твёрдый сплав»  $k = 0,5$ , «углеграфит — сталь 45»  $k = 0,7$ ;  $U_{xx}$  — напряжение холостого хода, В;  $f_u$  — частота импульсов, Гц;  $\rho_I$  — плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;  $\ell$  — глубина прошиваемого отверстия (полости), мм (см. рис. 2.3).

На черновых и получистовых режимах при использовании обратной полярности электродов и прокачке жидкости через МЭП  $\delta_6$  (мм) равен:

$$\delta_6 = k \frac{0,7 \cdot e^{1,252} I_{cp}^{0,377} q^{0,039} (\ln \ell)^{0,25}}{(\ln f_u)^{1,65} U_{xx}^{0,117} \rho_I^{0,076} \left(\frac{Q}{R}\right)^{0,0863}}, \quad (2.10)$$

где  $e$  — основание натуральных логарифмов, равное 2,71;  $Q$  — расход жидкости, см<sup>3</sup>/с;  $R$  — радиус эвакуации продуктов эрозии, см.

При чистовых режимах обработки (прямая полярность электродов-инструментов) боковые зазоры  $\delta_6$  составляют сотые доли миллиметров. При черновых режимах, реализуемых при использовании

обратной полярности электродов-инструментов, они могут достигать одного миллиметра и более.

Значение торцового зазора  $\delta_m$ , образующегося на черновых и получистовых режимах, определяется по экспериментально полученной формуле

$$\delta_m = k \frac{3,63 I_{cp}^{0,59} f^{0,02} U_{xx}^{0,5} \rho_I^{0,28}}{e^{7,1} q^{0,05} Q^{0,46}} . \quad (2.11)$$

Расчёты межэлектродных зазоров по формулам (2.9) – (2.11) дают приближённые значения, которые при проектировании технологических процессов должны уточняться в ходе экспериментальных исследований и при изготовлении пробных деталей. Производство современного электроэрозионного оборудования с ЧПУ предусматривает проведение таких исследований непосредственно в лаборатории завода-изготовителя и введение полученных данных по зависимостям межэлектродных зазоров от режимов обработки и достигаемых при этом технико-экономических показателей процесса в управляющую программу. В связи с этим учёт значений межэлектродных зазоров на таких станках при расчётах параметров обработки с целью получения заданных чертежом размеров с указанной точностью осуществляется автоматически.

При электроконтактно-дуговой обработке (см. рис. 2.4, *e*; 2.8) в силу специфики процесса эрозии расчёт зазоров по формулам (2.9) – (2.11) не представляется возможным. При реализации этого вида электроэрозионной обработки представляют интерес только боковые зазоры  $\delta_b$ , возникающие между торцовыми поверхностями вращающегося электрода-инструмента (движение  $D_{su}$ ) и заготовкой. Экспериментально установлено, что эти зазоры при разрезании заготовки или вырезании паза составляют от 0,5 до 2 мм.

Перечень, вид и параметры вспомогательных движений электрода-инструмента определяются выбранной схемой электроэрозионной обработки. Эти движения для различных схем электроэрозионной обработки представлены на рисунках 2.4 и 2.5. Например, на схеме

электроэрозионного вырезания заготовки непрофилированным электродом-инструментом (см. рис. 2.4, и) таким вспомогательным движением является поступательное движение электрода — проволоки  $D_{эл}$ , реализуемое со скоростью  $v_{эл}$ . Параметры этих движений устанавливаются, как правило, экспериментальным способом.

## 2.4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Технико-экономические показатели электроэрозионной обработки относят к результирующим (выходным) характеристикам процесса. В них включают: качество обработанной поверхности, определяемое параметрами шероховатости обработанной поверхности и структуры поверхностного слоя, точность обработки, производительность и себестоимость обработки.

### 2.4.1. Качество поверхностного слоя после электроэрозионной обработки

При ЭЭО в результате воздействия импульсных разрядов на обработанной поверхности образуются характерные для этого метода обработки неровности, определяющие форму и размеры шероховатости поверхности, а поверхностные слои металла подвергаются тепловому воздействию и структурным превращениям.

**Шероховатость обработанной поверхности.** Поверхность, полученная при ЭЭО, по микрорельефу существенно отличается от поверхности, полученной при обработке заготовки методами резания. При ЭЭО на поверхности заготовки формируются неровности в виде перекрывающихся друг друга лунок (рис. 2.10).

Каждая лунка образуется от своего импульса-разряда и характеризуется диаметром  $d_i$ .

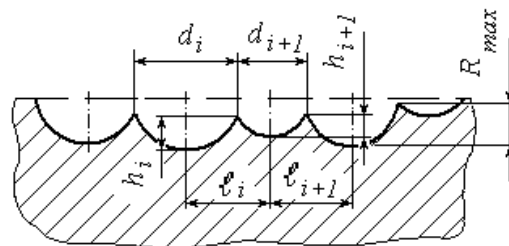


Рис. 2.10. Шероховатость поверхности при электроэрозионной обработке



В связи с тем, что разряды по поверхности идут хаотично и проходят в тех её местах, где создаётся минимальный межэлектродный зазор, профиль поверхности принимает нерегулярный характер. Соответственно этому расстояния между микровыступами  $l_i$ , также как и величины микровыступов  $h_i$ , существенно различаются между собой. При этом границы между отдельными микронеровностями выражены нечётко.

Эти особенности формы и параметров шероховатости поверхностей, полученных методом ЭЭО, указывают на то, что наиболее объективной характеристикой шероховатости при этой обработке является максимальная высота микронеровностей  $R_{max}$ . При электроэрозионной обработке на чистовых режимах  $R_{max}$  может достигать значений 4–6  $Ra$ . При этом величина  $R_{max}$  должна определяться без каких-либо усреднений измеренных значений, кажущихся случайными.

Обрабатываемые поверхности при ЭЭО могут располагаться как перпендикулярно, так и параллельно оси канала возбуждаемых разрядов. В связи с этим для различно ориентированных формируемых поверхностей имеет место различная схема образования микрорельефа. Экспериментально установлено, что высота микронеровностей у поверхностей, располагающихся перпендикулярно каналу разряда, в 1,5–2 раза превышает высоту микронеровностей, образованных в направлении канала разряда.

Микрогеометрия обработанной поверхности зависит от условий обработки, теплофизических свойств обрабатываемого материала, рабочей жидкости и других параметров процесса. Первостепенное значение при этом имеет электрический режим, диапазон регулирования которого весьма широк. При регулировании электрического режима основным параметром, определяющим микрогеометрию обработанной поверхности, является энергия импульсов. Соотношение между высотой микронеровностей  $Rz$  (мкм) и энергией импульсов  $W_u$  (Дж) имеет следующий вид:

$$Rz = k_{Rz} W_u^{x_{Rz}} = k_{Rz} \left( \frac{I_{cp} U_{cp}}{f_u} \right)^{x_{Rz}}, \quad (2.12)$$

где  $k_{Rz}$  — коэффициент, зависящий от режима обработки, материала электродов, их размеров, вида и состояния рабочей среды. При чистовых режимах твёрдых сплавов принимают  $k_{Rz} = 1 \dots 5$ , для сталей —  $k_{Rz} = 2 \dots 12$ ; при черновых режимах  $k_{Rz}$  изменяется в диапазоне от 10 до 50;  $x_{Rz} = 0,3 \dots 0,4$  — показатель степени, характеризующий форму лунки на поверхности заготовки.

Из формулы (2.12) и значения коэффициента  $x_{Rz}$  следует, что рабочая среда и материал электрода-инструмента вследствие малой зависимости высоты микронеровностей от энергии импульсов не могут существенно влиять на шероховатость обработанной поверхности.

Низко- и среднечастотная электроэрозионная виды обработки (области частот 50–1000 Гц), характеризующиеся высокой производительностью процесса, создают поверхности с шероховатостью по параметру  $Rz$  более 50 мкм, что соответствует характеристикам полустовой и черновой обработки. Чистовую обработку ведут на высоких частотах  $f_u$  от 7 кГц до 1,5 МГц при малых значениях энергии импульса, снижая при этом производительность обработки и значения  $Ra$  до 0,032–0,8 мкм.

**Изменения в поверхностных слоях металла при электроэрозионной обработке.** В поверхностном слое заготовки при ЭЭО в зоне воздействия электрического разряда происходит локальный кратковременный и весьма интенсивный нагрев и плавление металла. Большая часть его выносится из зоны обработки образующимися газовыми пузырями, а оставшаяся часть расплавленного металла на поверхности лунки активно вступает в химическое взаимодействие с продуктами распада диэлектрической жидкости и парами, образующимися в рабочей зоне под действием высоких температур. В результате такого взаимодействия поверхностный слой обрабатываемой заготовки насыщается веществом, содержащимся в жидкой фазе и входящим в состав электрода-инструмента, а интенсивный отвод тепла через

рабочую жидкость и прилегающий в зоне разрушения холодный металл создаёт условия сверхскоростной закалки поверхностного слоя. Одновременное действие этих факторов приводит к образованию поверхностного слоя с изменённой структурой и химическим составом. Толщина этого слоя после серии импульсов значительно превышает высоту микронеровностей. В большинстве случаев такой слой не отвечает требованиям к качеству поверхности детали и требует удаления как дефектный слой материала.

Глубина, состав и микротвёрдость зоны термического влияния зависят в значительной степени от обрабатываемого материала. При ЭЗО незакалённых углеродистых сталей изменённая зона состоит из так называемого «белого» плохо травящегося слоя 1, слоя вторичной закалки — 2 и основного стабильного по структуре и твёрдости исходного материала — 3 (рис. 2.11).

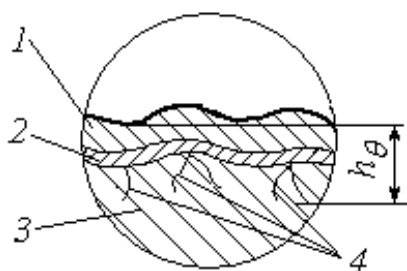


Рис. 2.11. Структура поверхностного слоя детали

Верхний слой 1, наблюдаемый под микроскопом на шлифах в виде белой полоски, содержит очень дисперсные фазы в метастабильном состоянии.

Поверхностный слой закалённой углеродистой стали после ЭЗО имеет верхний «белый» слой вторичной закалки, ниже которого

располагается слой отпуска. Для жаропрочных сплавов зона термического влияния представляет собой «белый» слой, под которым залегает металл с исходной структурой.

Нестационарное и резко неравномерное температурное поле, возникающее под действием импульсного разряда, приводит к тому, что твёрдые поверхностные слои металла подвергаются действию термических напряжений. Величина этих напряжений может превосходить предел прочности материала. Следствием этого является возникновение в поверхностном слое остаточных напряжений и возможность образования в основном материале микротрещин 4. Особенно

склонны к растрескиванию хрупкие материалы, например, твёрдые сплавы.

Глубина зоны термического влияния  $h_\theta$  зависит в первую очередь от обрабатываемого материала и энергии импульсов. Эта зависимость может быть записана в виде степенной зависимости

$$h_\theta = C_{h_\theta} W^{x_{h_\theta}}, \quad (2.13)$$

где  $C_{h_\theta}$  — коэффициент, определяемый обрабатываемым материалом;  $x_{h_\theta}$  — показатель степени (для сталей  $x_{h_\theta} = 0,40 \dots 0,42$ ).

При черновых режимах обработки ( $W_u > 0,5$  Дж) глубина зоны термического влияния составляет от 0,1 до 1,0 мм. При чистовых режимах обработки, проводимых с энергией импульса  $W_u$  менее 0,05 Дж, глубина термического влияния  $h_\theta$  снижается до значений 0,002–0,005 мм.

Значительно большими значениями глубины термического влияния характеризуется электроконтактно-дуговая обработка, при реализации которой дефектный слой достигает 2–3 мм.

#### 2.4.2. Точность электроэрозионной обработки

**Общие сведения.** Под точностью детали в технологии машиностроения понимается степень её соответствия установленным параметрам чертежа [19]. Точность детали характеризуется точностью выполнения размеров, точностью формы поверхностей и точностью относительного расположения поверхностей.

Достижимые параметры точности изделия определяются возникающими в процессе её изготовления погрешностями, к которым относят:

- геометрические погрешности оборудования;
- погрешность приспособления;
- погрешности измерительного и профильного инструментов;
- погрешности измерений;
- погрешность от упругих деформаций элементов технологической системы;

- тепловые деформации элементов технологической системы;
- размерный износ инструмента;
- погрешность начальной размерной наладки и последующей подналадки оборудования;
- погрешность установки заготовки;
- погрешность от перераспределения остаточных внутренних напряжений;
- погрешность, вызываемую колебаниями элементов технологической системы;
- погрешность, определяемую конструктивными особенностями системы управления технологическим процессом.

В технологии машиностроения принято различать систематические постоянные погрешности, систематические закономерно изменяющиеся погрешности и случайные погрешности. Систематические погрешности обработки изучаются с помощью теоретических или экспериментальных исследований закономерностей, которым они подчиняются. Случайные погрешности изучаются с применением теории вероятности и математической статистики.

Электроэрозионная обработка характеризуется теми же видами погрешностей, которые свойственны и другим методам обработки, наиболее изученными из которых являются погрешности механической обработки. В то же время некоторые виды погрешностей, характерные механической обработке, при ЭЭО приобретают специфику, определяемую особенностями физических явлений, проходящих в зоне обработки. Так, в суммарной погрешности ЭЭО изменяется значимость отдельных видов погрешностей и появляются погрешности, свойственные только этому технологическому методу получения поверхностей — погрешности, вызываемые особенностями съёма припуска с поверхности заготовки как результата эрозионного разрушения материала.

Расчёт погрешностей обработки и соответственно определение точностных характеристик электроэрозионной обработки производят

применительно к конкретным видам обработки заготовок (см. рис. 2.4; 2.5), создаваемым формам поверхностей и их размерам.

***Погрешности, создаваемые геометрическими неточностями станков  $\Delta_{cm}$ .*** Вследствие погрешностей изготовления основных деталей станков, их износа, неточностей сборки возникают отклонения основных точностных характеристик станков от номинальных, установленных стандартами значений. Точность станков в ненагруженном состоянии называют геометрической точностью. Геометрические погрешности станка частично или полностью переносятся на обрабатываемые заготовки в виде систематических погрешностей.

К показателям, характеризующим геометрическую точность станков, относят:

1) точность базовых поверхностей, служащих для установки заготовок и инструмента;

2) точность траекторий перемещения рабочих органов станка, несущих заготовку и инструмент;

3) точность расположения осей вращения и направлений прямолинейных перемещений рабочих органов станка, на которых устанавливаются заготовка и инструмент, относительно друг друга и относительно базовых станочных поверхностей;

4) точность взаимосвязанных относительных линейных и угловых перемещений рабочих органов, несущих заготовку или инструмент;

5) точность делительных и установочных перемещений рабочих органов станка;

6) точность координатных перемещений (точность позиционирования) рабочих органов станка;

7) стабильность рабочих параметров при многократном повторении проверки, например, точности подвода на жёсткий упор, точности малых перемещений подвода.

Величины допускаемых отклонений на геометрические неточности станков в ненагруженном состоянии регламентируются нормами точности оборудования и приведены в стандартах. Погрешности

от геометрической неточности увеличиваются по мере износа станков, что требует периодического их ремонта для приведения в соответствие с требованиями стандартов в области геометрической точности.

Общие требования к точности отечественного металлообрабатывающего оборудования приведены в ГОСТ 8-82 «Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность». Конкретные требования к геометрической точности станков даются отдельными стандартами, разрабатываемыми применительно к конкретным группам и типам станков.

Например, в области электроэрозионного оборудования действует ГОСТ 30098-93. «Станки электроэрозионные. Копировально-прошивочные». Представленные в данном стандарте нормы точности к прямолинейности (плоскостности) рабочей поверхности стола, прямолинейности и параллельности траектории продольного и поперечного перемещений стола, прямолинейности и перпендикулярности траектории перемещения головки (шпинделя) станка к рабочей поверхности стола, точность позиционирования стола (головки) и ряд других дают возможность определения геометрических погрешностей станка, которые могут быть вызваны неточностями его изготовления.

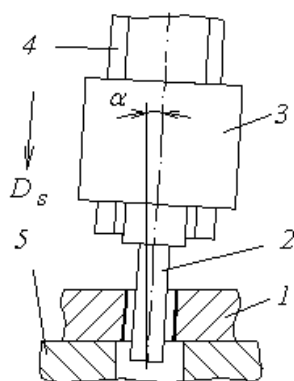


Рис. 2.12. Схема образования погрешности обработки из-за геометрической неточности станка

Так, рабочим движением, обеспечивающим получение перпендикулярности оси обрабатываемого отверстия к торцовой поверхности заготовки 1, на копировально-прошивочных станках является вертикальное перемещение  $D_s$  электрода-инструмента 2, устанавливаемого в шпиндельной головке станка 3 (рис. 2.12). Отклонение от перпендикулярности направления рабочего перемещения шпинделя к по-

верхности стола 5, определяемое углом  $\alpha$  и вызванное неточностью

изготовления направляющих станка 4, вызывает неперпендикулярность оси отверстия к торцу заготовки.

Для станков нормальной точности эти неточности изготовления сравнительно невелики. Например, для станков с длиной перемещения шпинделя 200 мм они в соответствии с ГОСТ 30098-93 не должны превышать 16 мкм. При глубине прошивания 50 мм, что соответствует средним глубинам прошивания для фасонных поверхностей, наибольшее отклонение оси отверстия от его требуемого положения, вызванное данной геометрической погрешностью изготовления станка, составит таким образом  $16 \cdot 50/200 = 4$  мкм.

Аналогичным образом могут определяться и другие погрешности обработки, вызванные геометрическими неточностями изготовления электроэрозионного оборудования.

***Погрешности, вызываемые неточностью наладки электроэрозионного оборудования  $\Delta_{нал}$ .*** В соответствии со стандартами ЕСТД (Единая система технологической документации) наладкой называется подготовка технологического оборудования и технологической оснастки к выполнению технологической операции. Часть наладки, относящаяся к установке инструмента, рабочих элементов станка и установочных элементов приспособления в положения, которые обеспечивают получение размера в поле допуска, называется размерной наладкой станка.

Погрешность наладки станка  $\Delta_{нал}$  изменяется как случайная величина в результате воздействия погрешности регулирования положения обрабатываемого инструмента  $\Delta_{рег}$  и отдельных узлов станка относительно установленного инструмента и под влиянием погрешности измерения пробных заготовок  $\Delta_{изм}$ , по которым производится наладка станка. Суммарная погрешность наладки в общем случае определяется выражением

$$\Delta_{нал} = 1,2\sqrt{\Delta_{изм}^2 + \Delta_{рег}^2} \cdot \quad (2.14)$$

Теоретические основы определения погрешности наладки и её составляющих в условиях электроэрозионной обработки соответ-



ствуют основам расчёта, принятым в технологии машиностроения для условий механической обработки заготовок [19]. В то же время для этого метода обработки есть свои специфические особенности наладки оборудования, которые должны быть учтены при расчёте суммарной погрешности обработки.

Такие особенности в первую очередь связаны с установкой и выверкой на станке электрода-инструмента. Так, при прошивании сквозного отверстия электрод-инструмент должен устанавливаться на станок таким образом, чтобы ось его была строго перпендикулярна рабочей поверхности стола станка и параллельна направлению движения его подачи  $D_s$ . Отклонение оси инструмента в любом направлении с неизбежностью приводит к искажению размера и формы прошиваемого отверстия заготовки 1 (рис. 2.13, а).

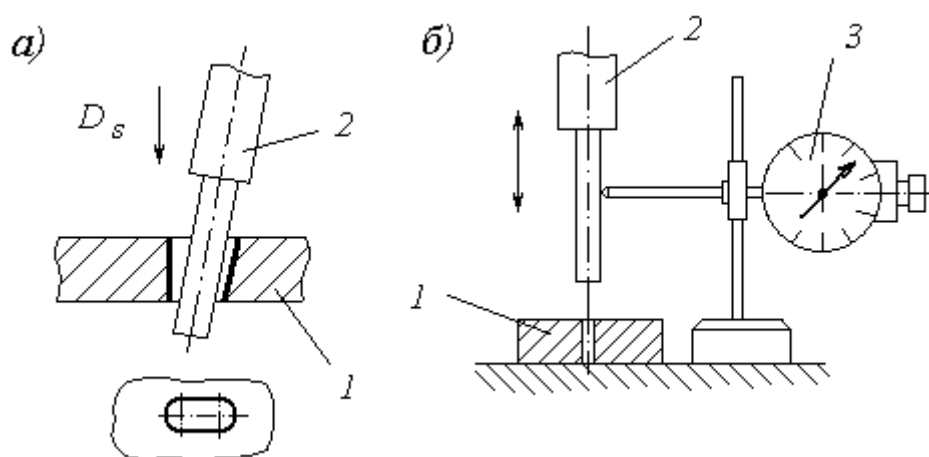


Рис. 2.13. Схемы установки электрода-инструмента с наклоном (а) и контроля правильности его положения (б)

Точность координирования электрода-инструмента относительно заготовки зависит от конструкции электрододержателя станка, метода установки, применяемых приспособлений и измерительных инструментов, навыка рабочего и некоторых других факторов.

Для предотвращения такого рода погрешностей обработки электрод-инструмент 2 после закрепления выверяют. Выверку производят с помощью устройства, позволяющего поворачивать его в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. При этом используются

поверочные угольники, установочные шаблоны, плоскопараллельные плитки и индикаторы, отсчётные микроскопы.

Контроль правильности установки электрода-инструмента при этом осуществляют с помощью индикатора 3, закреплённого на стойке, по схеме, представленной на рис. 2.13, б. При выверке наконечник индикатора с натягом 1...2 мм прижимают к электроду-инструменту. Последний через привод подачи вручную перемещают вверх или вниз. Отклонения от параллельности оси электрода-инструмента направлению движения подачи, улавливаемые индикатором, устраняют с помощью винтов, поворачивающих подвижные части электроодержателя.

Выверку электрода-инструмента производят в направлениях, совпадающих с направлениями перемещений шпиндельной головки станка с установленным в ней электродом. Погрешность расположения электрода-инструмента после выверки по каждому координатному направлению не должна превышать 0,01 мм на длине 100 мм.

Рассмотрим особенности установки электрода-инструмента на электроэрозионном копировально-прошивном станке Sure First ED-203, обеспечивающие возможность его закрепления и выверки. С этой целью в конструкции станка предусмотрен специальный инструментальный патрон, устанавливаемый на пиноли шпиндельной бабки (рис. 2.14). Патрон крепится фланцем 1 к шпинделю станка при помощи болтов 8. К фланцу патрона присоединен корпус 2, имеющий возможность поворачиваться вокруг вертикальной оси патрона (движение  $D_{всп_1}$ ) на угол  $\pm 10^\circ$  с помощью винтов 7. В поворотном корпусе 2 установлен сферический шарнир, обеспечивающий возможность качания закреплённого на нём малого патрона 3, в котором при помощи винта 4 крепится электрод-инструмент. Четыре винта (поз. 5 и 6, ещё две позиции не указаны) позволяют совершать качание малого патрона в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и фиксировать его в необходимом положении при установке и выверке электрода-инструмента (движения  $D_{всп_2}$ ).

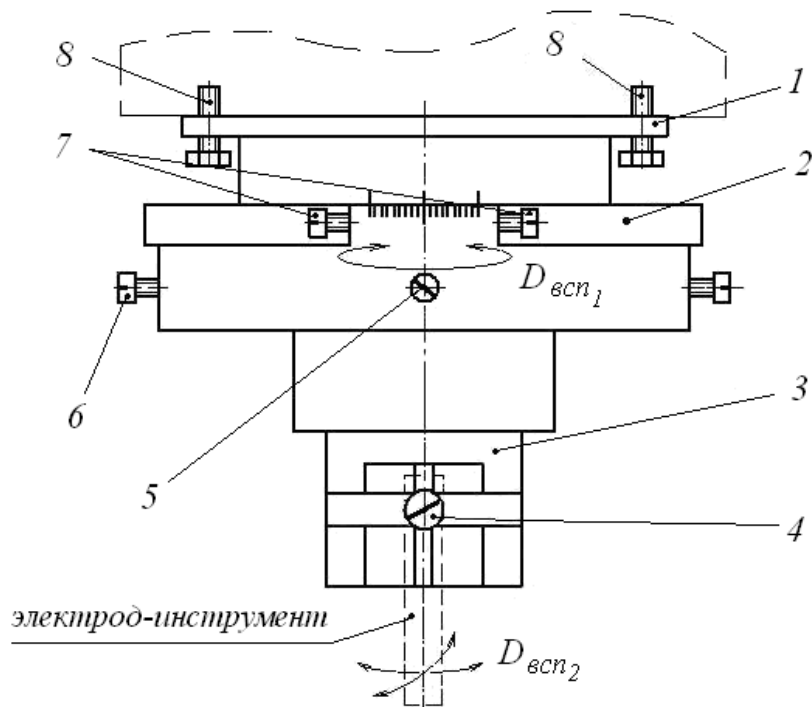


Рис. 2.14. Инструментальный патрон

Кроме универсальных держателей электродов, позволяющих осуществлять регулировку его углового положения в электроэрозионных прошивных станках очень часто используется высокоточная модульная оснастка, позволяющая уменьшить погрешность положения электрода-инструмента до 2 мкм. Основой достижения такой высокой точности расположения инструмента с использованием модульной оснастки является наличие двух базовых высокоточных патронов и использование их при изготовлении электрода-инструмента заданной формы. Один патрон устанавливается на столе вертикально-фрезерного станка, другой на пиноли прошивного станка. Заготовка электрода-инструмента закрепляется в оправке, которая устанавливается в патрон на фрезерном станке. Происходит обработка заготовки с получением из неё электрода-инструмента требуемой пространственной формы. Далее, оправка вместе с изготовленным с заданной точностью электродом снимается с фрезерного станка и ставится на электроэрозионный станок. В результате этих действий погрешность положения электрода-инструмента становится равной сумме погрешностей его закрепления в патроне и погрешности установки самого патрона на станок.

Этим приёмом электрод-инструмент может быть установлен на прошивной электроэрозионный станок с высокой точностью за минимальное время. Дополнительная его выверка не требуется.

**Погрешности, вызванные тепловыми деформациями элементов технологической системы  $\Delta_\theta$ .** При непрерывной работе станка происходит постепенный нагрев всех элементов технологической системы, вызывающий появление переменной систематической закономерно изменяющейся погрешности обработки заготовок. Нагреваются также электрод-инструмент, заготовка и рабочая жидкость. Температура рабочей жидкости, в которой производится обработка, зависит от загрузки станка. При обработке партии заготовок с перерывами основного (машинного) времени в момент прекращения работы начинается охлаждение рабочей среды и соответственно электрода-инструмента и заготовки, которое продолжается до начала следующего периода обработки. Повышение и снижение температуры происходит по экспоненциальному закону по мере смены заготовок. Вследствие нагрева среды при различных материалах электрода-инструмента и заготовки могут возникать сравнительно большие температурные деформации, приводящие к появлению погрешности обработки  $\Delta_\theta$ .

Величина температурных деформаций электрода-инструмента в направлении, перпендикулярном к направлению движения подачи, составит при этом

$$\Delta_\theta = L(\alpha_\theta - \alpha_{заг}) \cdot (\theta_2 - \theta_1), \quad (2.15)$$

где  $L$  — размер обрабатываемой поверхности, изменяющийся в результате температурных деформаций, мм;  $\alpha_\theta$  — коэффициент линейного расширения электрода-инструмента, мм/°С;  $\alpha_{заг}$  — коэффициент линейного расширения материала заготовки, мм/°С;  $\theta_1$  — температура окружающей среды, °С;  $\theta_2$  — температура рабочей жидкости к концу обработки, °С.

Существенное значение температурные деформации могут иметь при длительной обработке фасонных поверхностей. Например,

при обработке лопаток обработка может проводиться на черновых режимах непрерывно в течение нескольких часов. При таких условиях работы повышение исходной температуры может составлять более 40 °С, а температурные погрешности достигать 0,1 мм. При обработке небольших заготовок размерами 15–20 мм температурная погрешность невелика и не оказывает большого влияния на суммарную точность обработки.

Современные электроэрозионные станки сконструированы так, чтобы погрешности, связанные с температурными деформациями, сводились к минимуму. Это достигается использованием следующих конструкторских приёмов:

— рабочая зона станка полностью изолируется от источников внешнего тепла – генератора и электрошкафа;

— температура диэлектрической жидкости поддерживается с помощью специальных устройств близкой к постоянной (в пределах 0,5 °С, а на особо точных станках до 0,1 °С);

— ходовые винты линейных перемещений стола и других узлов станка снабжаются внутренним охлаждением;

— стол станка и пиноль иногда изготавливаются из керамики, имеющей минимальный коэффициент термического расширения.

***Погрешности, вызванные непостоянством межэлектродного зазора  $\Delta_\delta$ .*** Процесс электроэрозионной обработки характеризуется наличием зазоров  $\delta$  между электродом-инструментом и заготовкой по всем получаемым в процессе обработки поверхностям. Так, при электроэрозионном прошивании глухих отверстий рассматривают торцовый  $\delta_m$  и боковой  $\delta_b$  межэлектродные зазоры (см. рис. 2.3). Номинальные величины этих зазоров, рассчитываемые по формулам (2.9) – (2.11), не влияют на точность выполняемых размеров. Они учитываются при проектировании электрода-инструмента путём коррекции размеров его профиля по отношению к профилю формируемой поверхности. Например, при прошивании цилиндрического отверстия диаметр электрода-инструмента рассчитывается с учётом величины бокового межэлектродного зазора по формуле

$$d_{эи} = D - 2\delta_б, \quad (2.16)$$

где  $d_{эи}$  — номинальный диаметр электрода;  $D$  — номинальный диаметр отверстия детали,  $\delta_б$  — расчётное значение межэлектродного бокового зазора.

В связи с особенностями физических процессов, проходящих в МЭП, величина межэлектродного зазора может при изготовлении поверхности даже на одной заготовке изменяться. Эти изменения и оказывают влияние на точность обработки, приводя к появлению погрешностей формы создаваемых поверхностей и их размеров. Так, для прошивания сквозного отверстия эта погрешность связана с изменением расчётного диаметра детали  $d$  и учитывается как случайная погрешность  $\Delta\delta_б$ , вызванная колебаниями бокового межэлектродного зазора  $\Delta\delta_б = \delta_б^{факт} - \delta_б$ .

В условиях черновой обработки погрешности, вызванные отклонением фактического значения зазора  $\delta_б^{факт}$  от расчётной величины  $\delta_б$ , принимают значения, не позволяющие получить высокую точность обработки. Например, фактический межэлектродный торцовый зазор, который определяет точность отображения заданного профиля при объёмном копировании (см. рис. 2.4,  $\delta$ ), к концу обработки может иметь любое значение от нуля до максимальной величины — пробивного промежутка.

В связи с этим окончательный профиль углубления при объёмном формообразовании создаётся, как правило, на чистовых переходах неизношенным электродом-инструментом и использованием не зашламлённой диэлектрической жидкости. Экспериментально установлено, что погрешность межэлектродного зазора, связанная с отклонениями напряжения на электродах и колебаниями состава среды в связи с её загрязнением при правильном построении процесса обработки на чистовых переходах изготовления поверхности принимает значения 0,007–0,01 мм.

***Погрешности, связанные с размерным износом электрода-инструмента  $\Delta_{и}$ .*** изнашивание электрода-инструмента, связанное с

изменением его формы и размеров рабочей части во время обработки, является результатом эрозионного разрушения поверхностных слоёв его рабочей части. Оно представляет серьёзную проблему в организации электроэрозионной обработки, та как электроэрозионный износ снижает точность изготовления детали и требует периодической замены электрода-инструмента.

В процессе электроэрозионной обработки методом прямого копирования электрод-инструмент, внедряясь в обрабатываемую заготовку, изнашивается на рабочем участке по длине и диаметру. Вид изношенной части цилиндрического электрода-инструмента 2, прошивающего сквозное отверстие в заготовке 1, представлен на рисунке 2.15, а. Здесь пунктирными линиями указаны исходная длина и форма электрода-инструмента.

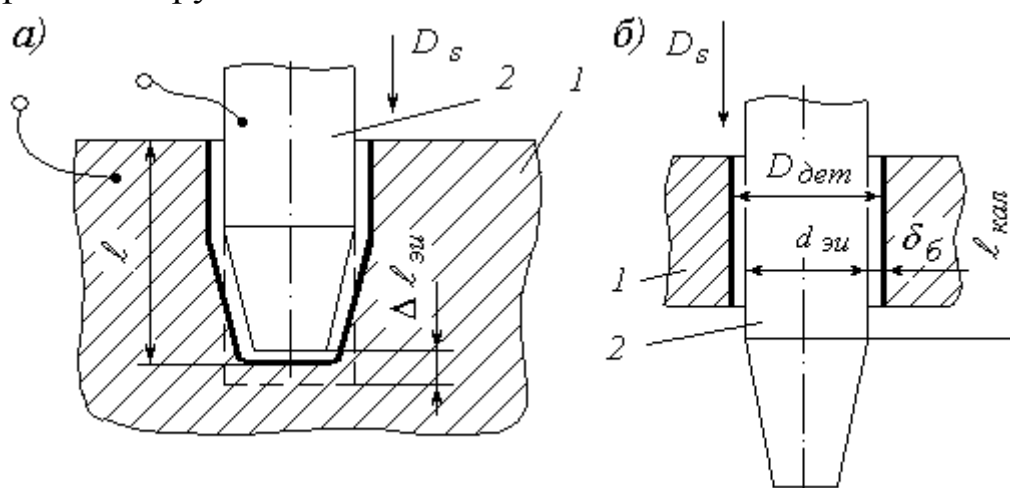


Рис. 2.15. Схемы электроэрозионного изнашивания электрода-инструмента при прошивании цилиндрического отверстия

Для количественной оценки электроэрозионного износа электрода-инструмента 2 используют значения его относительного износа по объёму или по длине, выраженные в процентах и рассчитываемые по формулам (2.17) и (2.18).

$$h_{V_{отн}} = \frac{\Delta V_{эи}}{\Delta V_{заг}} \cdot 100, \quad (2.17)$$

$$h_{l_{отн}} = \frac{\Delta l_{эи}}{l} \cdot 100, \quad (2.18)$$

где  $h_{v_{отн}}$  — относительный объёмный износ, %;  $h_{\ell_{отн}}$  — относительный линейный износ, %;  $\ell$  — длина прошитого отверстия, мм;  $\Delta\ell_{эи}$  — линейный износ электрода-инструмента в направлении движения подачи, мм.

Относительный износ по длине  $h_{\ell_{отн}}$  чаще всего используется как характеристика износа при выполнении операции прошивания отверстия. Значения его в зависимости от параметров режима электроэрозионного прошивания, обрабатываемого материала и материала электрода-инструмента, свойств рабочей жидкости могут колебаться в весьма значительных пределах: от 0,2 до 90 %. При этом следует учитывать, что сам износ электрода-инструмента при прошивании сквозного отверстий не влияет на точность диаметрального размера отверстия  $D_{дет}$ , если на электроде-инструменте есть калибрующий участок  $\ell_{кал}$  (рис. 2.15, б). В этом случае процесс электроэрозионной обработки прекращается и прекращаются разряды по боковой стороне электрода-инструмента, когда межэлектродный боковой зазор  $\delta_b$  на всех участках прошитого отверстия при принятом напряжении на электродах станет равным пробойному значению.

Износ на различных участках инструмента различается и по величине, и по форме. На рис. 2.16 схематично показано изменение плотности разрядов при прошивании в заготовке 1 отверстия сложной формы электродом-инструментом 2. Возможное число импульсов, реализуемых в МЭП, характеризуется на рисунке числом стрелок, плотность которых в местах сопряжения поверхностей существенно отличается от плотности импульсов на прямолинейных участках. На участках электрода-инструмента, имеющих

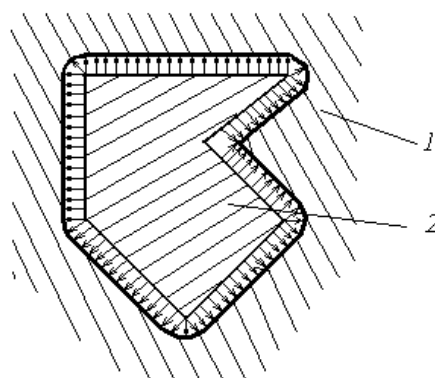


Рис. 2.16. Схема плотности разрядов тока на поверхности электрода-инструмента сложной формы



вогнутость, число разрядов меньше, следовательно, износ на них будет выражен слабее. Если учесть особенности удаления продуктов обработки из различных точек МЭП, то различия в износе отдельных участков электрода-инструмента ещё более возрастут.

Величина износа электрода-инструмента возрастает при увеличении частоты  $f_u$  и скважности  $q_u$  импульсов электрического разряда, амплитудного значения силы тока  $I$  и падает с ростом длительности импульсов  $\tau_u$ . Изменение длительности импульсов сказывается на изменении износа в очень сильной степени. С точки зрения износостойкости электродов-инструментов целесообразно процесс обработки осуществлять при больших длительностях импульса (при постоянной скважности) и низкой частоте.

В качестве материала электрода-инструмента при электроэрозионной обработке чаще всего используют медь, латуни, серый чугун, алюминиевые сплавы, углеродистые материалы, вольфрам. Медные электроды обеспечивают устойчивую работу в широком диапазоне электрических режимов и обладают хорошей электропроводностью и износостойкостью (относительный износ находится в диапазоне от 0,2 до 20 %). Электроды из чугуна имеют примерно тот же характер износа, что и медные электроды, но характеризуются повышенными его значениями. Алюминиевые электроды-инструменты используют на низких частотах при длительности импульсов свыше 500 мкс.

Значительно лучшие результаты по износу показывают электроды-инструменты, изготовленные из графитизированных материалов марки ЭЭГ. Износ таких электродов-инструментов в десятки раз меньше медных. Для выполнения отдельных видов работ электроэрозионным способом пригодны материалы на базе графита, содержащие медь, а также графиты с медной пропиткой.

Одним из способов снижения износа электрода-инструмента является использование таких режимов обработки, при которых на рабочей поверхности электрода-инструмента формируется графитовая плёнка. Появление её связывают с пиролизом углеродосодержащих рабочих жидкостей (керосина, масла и др.) при высокой температуре

(более 700 °С) и при достаточно большой длительности импульсов электрического разряда ( $\tau_u = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ с}$ ), достаточной для прохождения этого процесса и отложения продуктов пиролиза на рабочей поверхности инструмента. Графитовая плёнка защищает рабочую поверхность электрода-инструмента от эрозии. Увеличение длительности импульсов и снижение скважности приводит к более интенсивному выпадению углеродистых защитных плёнок. Эти режимы характерны для электроэрозионной обработки на режиме обратной полярности.

Для создания углеродистых защитных плёнок при режиме обработки с прямой полярностью электродов используют импульсы гребёночной формы (см. рис. 2.7, в). После каждого импульса канал разряда сохраняется из-за электрических мостиков тока между ними. Второй импульс идет следом за первым, сохраняя выделенное ранее тепло. Для создания гребёночных импульсов используют широкодиапазонные генераторы импульсов (ШГИ).

*Погрешности, обусловленные неточностью изготовления электрода-инструмента  $\Delta_{ин}$ .* Неточность изготовления размерного электроэрозионного инструмента во многих случаях непосредственно переносится на заготовки, обуславливая появление систематических погрешностей формы и размеров обработанных поверхностей. В связи с этим изготовление электродов-инструментов, как правило, осуществляют с высокой точностью, которая соответствует точности изготовления режущих инструментов. Рабочие размеры электрода-инструмента изготавливают на один — два качества точнее, чем соответствующие размеры детали, а допуски на них соответственно этому составляют 30–40 % от допуска на её размеры.

В то же время на современных электроэрозионных прошивочных станках с ЧПУ обработка ведется с использованием двух или трёхмерных орбитальных движений (см. рис. 2.4, к). В этих случаях нет необходимости изготавливать электрод-инструмент с высокой точностью. Достаточно знать его фактические размеры, чтобы рассчитать траекторию движения, обеспечивающую достижение необходимой

точности размеров обработанной поверхности, и ввести полученные данные в управляющую программу.

В связи с малыми допусками на размеры и форму электродов-инструментов влияние неточности их изготовления незначительно влияют на точность изготовленных деталей.

***Погрешности обработки, вызываемые колебаниями электрода-инструмента  $\Delta_{кол}$ .*** Электроэрозионная обработка характеризуется практически полным отсутствием силового воздействия на заготовку. В связи с этим отсутствуют и деформации элементов технологической системы, что позволяет получить высокие точностные показатели изготовленных этим способом деталей и предоставляет возможность обработки нежестких заготовок.

В то же время существенное влияние на получаемую точность размеров и формы изготавливаемой поверхности может оказать прокачка рабочей жидкости через МЭП. Давление жидкости и турбулентный характер её потока при недостаточной жесткости заготовки или электрода-инструмента могут вызвать их колебания или деформации в плоскости, перпендикулярной направлению движения подачи. Возникающее при этом смещение вертикальной оси электрода-инструмента приводит к появлению погрешности горизонтальных размеров, которые при электроэрозионной обработке могут быть больше погрешности вертикальных размеров. Амплитуда поперечных колебаний электрода-инструмента по экспериментальным данным по этой причине может достигать 0,05 мм.

При разрезании заготовок значительной толщины проволочным электродом-инструментом под действием гидродинамической силы и из-за изменения проводимости воды проволока изгибается по схеме, представленной на рисунке 2.17, а, что вызывает погрешности реза по высоте (выпуклость, вогнутость, прямой или обратный конус). В системах с адаптивным контролем влияние факторов, вызывающих появление этих погрешностей снижают путём комплексного контроля всех параметров обработки и наложения микропланетарных движений на проволочный электрод-инструмент (рис. 2.17, б).

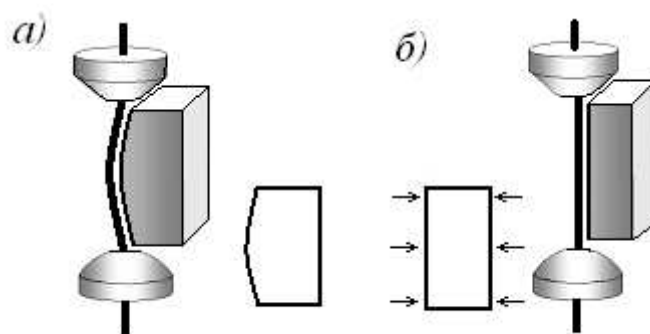


Рис. 2.17. Погрешность обработки из-за изгиба электрода-проволоки

**Суммарная погрешность и точность электроэрозионной обработки.** В соответствии с теорией точности суммарная погрешность обработки определяется как сумма значений отдельных постоянных и закономерно изменяющихся систематических погрешностей и суммарного рассеивания случайных составляющих погрешностей  $\Delta p = 6S_{\Sigma}$ , где  $S_{\Sigma}$  — среднеквадратическое отклонение случайной величины (размера) от её среднего значения, вызванное совокупностью случайных погрешностей.

В общем случае суммарная погрешность обработки определяется по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta_{сист_i} + K \sqrt{\sum_{j=1}^j \Delta_{сл_j}^2}, \quad (2.19)$$

где  $\Delta_{сист_i}$  — систематическая погрешность, вызванная  $i$ -ой причиной;  $\Delta_{сл_j}$  — случайная погрешность, вызванная  $j$ -ой причиной;  $K$  — коэффициент, характеризующий возможность несоответствия закона распределения отдельных погрешностей закону нормального распределения (принимается  $K = 1,1-1,2$ ).

Для исследования точности электроэрозионной обработки используются также, как и для механической обработки, расчётно-аналитический, вероятностно-статистический и расчётно-статистический методы [18].

Как правило, электроэрозионная обработка на высокопроизводительных режимах при больших энергиях импульсов  $W_u$  не даёт высокой размерной точности и низких параметров шероховатости

обработанной поверхности. Поэтому на практике в условиях единичного и мелкосерийного производств электроэрозионную обработку выполняют последовательно в несколько переходов (черновой, получистовой и чистовой) с использованием для каждого перехода электрода-инструмента своих размеров и режимов обработки, в том числе и смены полярности при переходе от черногого к чистовому переходу. Выполнение работы в этом случае характеризуется значительными временными затратами на смену инструмента, установку режима обработки и наладку станка.

В условиях крупносерийного и массового производств для прошивания отверстий может быть использован комбинированный электрод-инструмент, обеспечивающий возможность за один установ заготовки выполнить на одном оборудовании все три технологических перехода. Каждый этап обработки при данной технологии характеризуется использованием своего режима. На рисунке 2.18 представлена схема электроэрозионного прошивания отверстия в заготовке комбинированным электродом-инструментом с двумя ступенями (черновой 1 и чистовой 2) и этапы этой обработки.

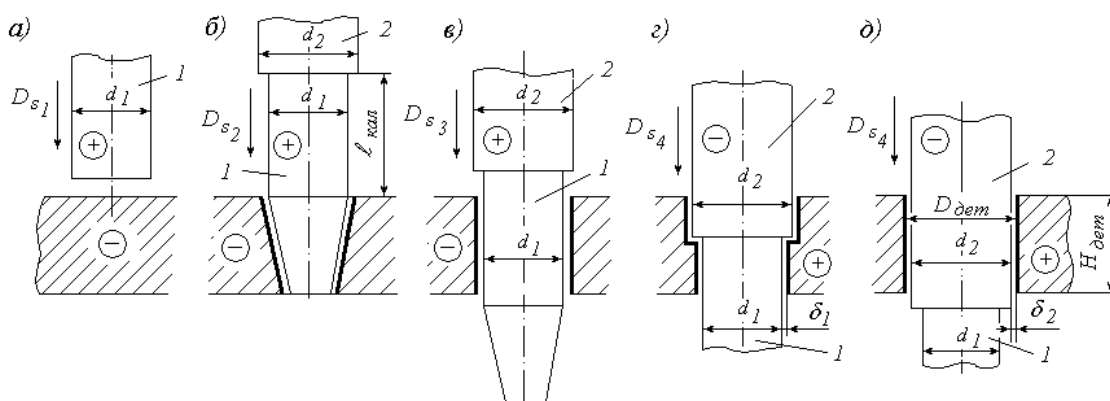


Рис. 2.18. Этапы прошивания отверстия комбинированным электродом-инструментом

Черновая обработка отверстия осуществляется тремя этапами и выполняется на обратной полярности, характеризуемой повышенным износом катода (заготовки). Электрод-инструмент быстро (движение  $D_{s1}$ ) подводится к заготовке (рис. 2.18, а). Этап черногого прошивания отверстия выполняется электродом-инструментом

диаметром  $d_1$  (2.18, б) на режиме высокой производительности с большой энергией импульсов  $W_u$  и подачей  $S_2$ . Полученное при этом отверстие имеет значительную конусность. Для её уменьшения продолжают прошивку отверстия калибрующей частью электрода-инструмента длиной  $l_k$  (рис. 2.18, в), при этом осуществляется переход на средний режим обработки (движение подачи  $D_{S_2}$ ). Величина калибрующей части принимается равной  $(1,2 \dots 1,5) H_{dem}$ .

После калибровки предварительно прошитого отверстия для удаления дефектного слоя и получения требуемой шероховатости поверхности производят прошивку отверстия на чистовом режиме второй ступенью электрода-инструмента 2 с диаметром  $d_2$  (рис. 2.18, з, д). На данном режиме обработки используются импульсы малой мощности при прямой полярности процесса (заготовка — анод) и малых подачах  $S_4$ .

Использование комбинированного электрода-инструмента и реализации на одном станке черновой и чистовой обработки требует использования генератора импульсов, позволяющего осуществлять регулировку режима обработки в широком диапазоне значений силы тока  $I_u$ , частоты импульсов  $f_u$ , скважности  $q_u$  и энергии импульсов  $W_u$ . Такими возможностями обладают отечественные широкодиапазонные генераторы импульсов (ШГИ).

Расчет диаметров ступеней электрода-инструмента на чистовом и черновом переходах обработки отверстия осуществляют по формулам (2.20):

$$d_2 = D_{dem} - 2\delta_2; \quad d_1 = d_2 - 2\delta_1 - 2Z_{min_2}, \quad (2.20)$$

где  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — межэлектродные зазоры соответственно на черновом и чистовом переходах прошивания отверстия;  $2Z_{min_2}$  — минимальный припуск на чистовую обработку, рассчитываемый по формуле

$$2Z_{min_2} = 2 \left( Rz_1 + h_\theta + \sqrt{\rho_1^2 + \varepsilon_{y_1}^2} \right), \quad (2.21)$$

где  $Rz_1$  — средняя высота микронеровностей, рассчитанная по десяти точкам микропрофиля после чернового прошивания отверстия (этап *в* на рис. 2.17);

$h_\theta$  — глубина дефектного слоя на поверхности отверстия диаметром  $d_1$ , полученного черновой ступенью электрода-инструмента;

$\rho_1$  — пространственное отклонение отверстия, полученного на черновом переходе, от требуемого его расположения;

$\varepsilon_y$  — погрешность установки заготовки при прошивке второй ступенью, соответствующая несоосности диаметров черновой и чистой ступеней электрода-инструмента, полученных при его изготовлении.

Необходимость проведения расчётов по определению размеров ступеней комбинированного электрода-инструмента и его изготовления отпадает при использовании современных технологий получения точных сквозных отверстий в заготовках. Эти технологии предусматривают прошивание небольшого отверстия диаметром 0,5...3 мм (глубиной до 300 мм) на электроэрозионных прошивных станках типа «Электроэрозионная супердрель» с последующим вырезанием отверстия по контуру на проволочно-вырезных станках. Реализация данной технологии позволяет при сокращении затрат на изготовление деталей значительно повысить производительность электроэрозионного изготовления отверстий в заготовках из труднообрабатываемых материалов.

Точность изготовления деталей при электроэрозионной обработке соответствует 5...16 квалитетам и зависит от применяемого способа реализации (схемы обработки). При режиме, реализуемом при прямой полярности профильным электродом-инструментом, точность достигает 6...7-го квалитета точности, непрофилированным — 5...6-го квалитета; при режиме обратной полярности точность соответствует 9...11-му квалитетам точности.

При электроконтактно-дуговой обработке в жидкой среде на чистовых режимах точность обработки не превышает 7...8-го квалитета точности, а при разрезании на воздухе она соответствует 12...14-му

квалитетам точности. В связи с низкими параметрами точности, получаемыми в процессе электроконтактной обработки на воздухе, этот технологический метод обработки в настоящее время практически не применяется.

### 2.4.3. Производительность электроэрозионной обработки

Производительность электроэрозионной обработки рассчитывают для всех схем технологических методов, приведённых на рисунках 2.4 и 2.5, за исключением разрезания и вырезания непрофилированным электродом-инструментом, как отношение объёма ( $V$ ) или массы ( $m$ ) металла, удалённого с обрабатываемой заготовки, к основному времени обработки по формулам

$$P_v = V/\tau_o; \quad P_m = m/\tau_o, \quad (2.22)$$

где  $P_v$  — объёмная производительность электроэрозионной обработки, мм<sup>3</sup>/мин;  $P_m$  — производительность обработки по массе, кг/мин;  $V$  — объём удалённого с заготовки материала, мм<sup>3</sup>;  $\tau_o$  — основное время обработки, мин.

Такие критерии оценки производительности обработки при работе непрофилированным электродом-инструментом (проволокой, пластиной, лентой) неприменимы. Действительно, возрастание съёма материала путём увеличения диаметра проволоки или толщины пластины, используемых при разрезании (вырезании), не связано с реальной скоростью выполнения операции. Объёмная или массовая производительность в данных случаях в большей степени характеризует коэффициент использования материала заготовки (КИМ). В связи с этим под производительностью электроэрозионного разрезания или вырезания заготовок непрофилированным (проволочным) электродом-инструментом (см. рис. 2.4, *и, р*) понимают отношение площади боковой поверхности прорезанного паза  $S_{\delta}$  (мм<sup>2</sup>) к основному времени обработки:

$$P_s = S_{\delta}/\tau_o, \quad (2.23)$$

Площадь боковой поверхности реза  $S_{\delta}$  определяется как произведение расстояния, пройденного проволочным электродом-



инструментом в направлении движения подачи за время обработки  $\tau_0$ , на толщину заготовки.

В зависимости от вида обработки (черновая, получистовая или чистовая) объёмная производительность электроэрозионной обработки находится в пределах  $\Pi_v$  от 0,3 до 15000 мм<sup>3</sup>/мин. Конкретные её значения определяются энергией импульсов, частотой их следования, характеристиками материала заготовки и электрода-инструмента и конкретными условиями обработки. Расчёт производительности электроэрозионной обработки рекомендуется вести по следующей приближённой формуле [16]:

$$\Pi_v = k f_u W, \quad (2.24)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от электроэрозионной обрабатываемости (стойкости) материалов электрода-инструмента и заготовки, геометрических размеров и формы обрабатываемой поверхности, в частности, площади её поперечного сечения  $S$  и глубины обработки  $\ell$ ; наличия или отсутствия прокачки рабочей жидкости через МЭП, характеристик прокачки.

Простота данной формулы, предполагающая примерно одинаковую эффективность действия всех импульсов, не соответствует сложности физических процессов, протекающих в зоне обработки и определяющих электроэрозионный съём материала. В действительности условия прохождения каждого отдельного импульса могут различаться в зависимости от условий проведения обработки и процессов, идущих в МЭП. Так, кроме рабочих импульсов в МЭП реализуются холостые, короткозамкнутые и фиктивные импульсы, которые не производят съёма металла. Это приводит к тому, что коэффициент  $k$  формулы (2.24) не имеет постоянного значения, а изменяется в весьма широких пределах, находясь в зависимости не только от указанных ранее условий проведения обработки, но и от значений входящих в формулу (2.24) параметров энергии импульса ( $I_{cp}$ ,  $U_{cp}$ ,  $\tau_u$ ,  $f_u$ ). В связи с отсутствием математических моделей физических процессов в МЭП, что связано со сложностью процесса, коэффициент  $k$  выбирается

по справочным данным для конкретных условий производства или при отсутствии таковых определяется экспериментально.

Для того чтобы обеспечить наивысшую производительность при заданных выходных параметрах точности обработки и шероховатости поверхности, необходимо подобрать для обрабатываемого материала заготовки оптимальное сочетание факторов, позволяющих увеличивать долю полезной энергии импульса, его мощность и количество рабочих импульсов.

**Электроэрозионная обрабатываемость материалов.** Электроэрозионная обрабатываемость материалов при прочих одинаковых условиях обработки оценивается по критерию фазового превращения Палатника  $P_{нал}$ :

$$P_{нал} = c \lambda \rho \theta_{пл}^2, \quad (2.25)$$

где  $c$  — теплоёмкость обрабатываемого материала;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\rho$  — плотность материала;  $\theta_{пл}$  — температура плавления материала.

В своей практической значимости сопоставление критериев Палатника различных материалов позволяет указать, какой из этих материалов, находящихся в одинаковых условиях, раньше или позже нагревается до температуры плавления. Исходя из того, что основные процессы съёма материала при электроэрозионной обработке связаны с нагревом и расплавлением материала заготовки, этот критерий становится относительным коэффициентом электроэрозионной стойкости материала. Чем больше  $P_{нал}$ , тем при равных условиях выше эрозионная стойкость и соответственно ниже обрабатываемость данного материала.

В формулу (2.25) не входят механические характеристики обрабатываемого материала, что характеризует отсутствие зависимости производительности электроэрозионной обработки от таких свойств материала, как его твёрдость и прочность.

Сравнение электроэрозионной обрабатываемости различных материалов с позиции их электроэрозионной стойкости осуществляют расчётом коэффициента обрабатываемости, представляющего

отношение критериев Палатника для рассматриваемого материала и стали 45:

$$k_{обр} = \frac{П_{нал}}{П_{ст45}}, \quad (2.26)$$

где  $П_{нал}$  — критерий Палатника для обрабатываемого материала;  $П_{ст45}$  — критерий Палатника для стали 45.

Рассчитанные таким образом коэффициенты обрабатываемости ряда материалов имеют в среднем следующие значения: вольфрама — 0,7; молибдена — 0,8; твёрдого сплава — 0,1...0,3; меди — 1,3; алюминия — 1,5. Чугун имеет пониженную по отношению к стали 45 обрабатываемость ( $k_{обр} = 0,6...0,9$ ) из-за включений свободного графита, а жаропрочные сплавы обрабатываются лучше стали 45 благодаря их более низкому значению коэффициента теплопроводности. Их коэффициент обрабатываемости электроэрозионным методом по отношению к обрабатываемости стали 45 находится в пределах от 1,2 до 1,5.

**Производительность обработки (скорость съёма материала) — сила тока.** С увеличением силы тока  $I$  при постоянной площади обработки  $S$  и напряжении на электродах  $U$  скорость съёма и эвакуация продуктов эрозии из МЭП сначала растут примерно пропорционально росту энергии импульса  $W_u$ . При некоторой силе тока рост скорости съёма замедляется в связи с тем, что МЭП начинает наполняться газами и шламом. При чрезмерно больших энергиях и остающейся неизменной площади обработки наступает момент, когда газы совсем вытесняют жидкость из МЭП. Скорость съёма становится равной нулю и одновременно прекращается дальнейшее газообразование. Жидкость снова заполняет зазор, процессы съёма и газообразования возобновляются, то есть описанный цикл повторяется. Повторение процессов указывает на то, что при больших энергиях импульса и малых площадях обработки в зоне обработки возникают автоколебания процесса, характеризующиеся циклическим изменением скорости съёма при резком снижении её среднего значения.

Таким образом, зависимость «производительность обработки — сила тока» носит экстремальный характер (рис. 2.19). Значение силы тока, при которой наступает экстремум производительности, не является величиной постоянной, а нелинейно зависит от площади обрабатываемой поверхности.

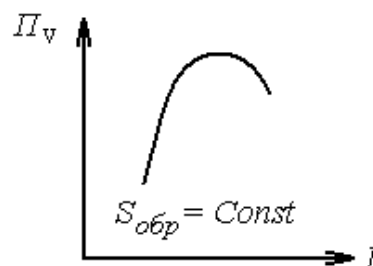


Рис. 2.19. Зависимость производительности обработки от силы тока

При черновом режиме величина рабочего тока выбирается максимально допустимой для данной площади обрабатываемой поверхности. Однако она должна быть выбрана такой, чтобы не вызывать оплавления заготовки, быстрого износа электрода-инструмента и нарушения стабильности процесса. Оптимальный диапазон значений средней силы тока можно определить из графика зависимости области оптимальных значений силы тока от площади обрабатываемой поверхности, представленного на рисунке 2.20 [10].

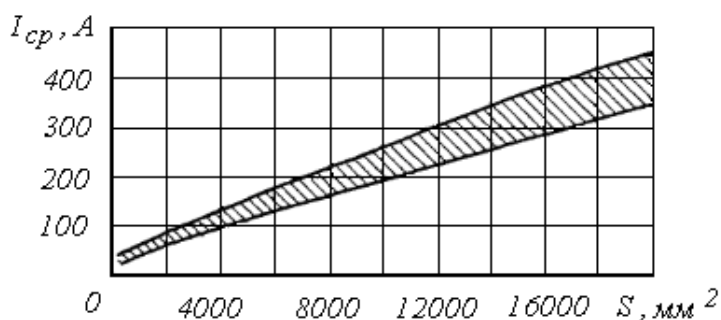


Рис. 2.20. График зависимости области оптимальных значений силы тока от площади обработки [10]

**Производительность обработки — площадь обрабатываемой поверхности.** На производительность электроэрозионной обработки при прочих равных условиях, в частности постоянной энергии импульса, оказывает влияние площадь обрабатываемой поверхности  $S$ .

При малой площади обработки число участков, на которых возможен разряд, значительно меньше, чем число импульсов, поступающих от генератора. Это связано с тем, что часть обрабатываемой площади оказывается перекрытой газовыми пузырями, возникшими

от предшествующих разрядов. Время существования газового пузыря в 5–10 раз больше длительности импульса, а разряд через газ возможен только при более высоком напряжении, чем разряд через диэлектрическую жидкость. Поэтому с увеличением площади обрабатываемой поверхности при постоянном значении энергии импульса скорость съёма металла сначала возрастает, но при достижении определённого её значения начинает снижаться.

Это снижение производительности съёма объясняется тем, что с увеличением площади обработки ухудшаются условия удаления продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. Всё большее число электрических импульсов не вызывает съёма материала из-за накопления в МЭП газов и металлических частиц.

Таким образом, зависимость «производительность обработки — площадь обрабатываемой поверхности» также, как и зависимость «скорость съёма — сила тока», имеет экстремальный характер. В диапазоне меньших площадей (по отношению к точке максимума) определяющим для значения производительности обработки является механизм эвакуации газов из МЭП, а в диапазоне больших — механизм эвакуации твёрдых продуктов эрозии. При изменении условий обработки значение оптимума площади обработки изменяется.

**Пространственные диаграммы.** Рассмотренные зависимости производительности обработки от силы тока и площади обработки для удобства работы с ними представляют в виде пространственных диаграмм  $P_v - I_{cp} - S$  (производительность обработки — сила тока (энергия импульса) — площадь обработки). Разработка пространственных диаграмм проводится для конкретных значений частоты следования импульсов при определённых остальных условиях обработки, в частности формы обрабатываемой поверхности, вида рабочей жидкости, материалов электродов, глубины обработки, амплитуды импульса напряжения и скважности.

Пример пространственной диаграммы, разработанной применительно к частоте следования импульсов  $f_u = 400$  Гц, представлен на рисунке 2.21.

В соответствии с этой диаграммой каждому значению силы тока  $I$  соответствует своя оптимальная площадь обработки  $S$ , обеспечивающая максимально возможную при принятых других условиях обработки производительность обработки  $P_v$ .

При достижении силы тока некоторой критической величины (на рис. 2.21  $I = 300$  А) его дальнейшее повышение при любом изменении площади ведёт к снижению скорости съёма. Это критическое значение и устанавливается предельным максимальным значением силы тока, для которой разрабатываются пространственные диаграммы.

Пространственные диаграммы, строящиеся для стандартных условий обработки (частоты и скважности импульсов, материалов электродов и вида рабочей жидкости), являются базой для выбора режима электроэрозионной обработки по заданным геометрическим характеристикам обрабатываемой поверхности и создания управляющих программ для станков с ЧПУ, предусматривающих выбор режима обработки в автоматическом режиме без участия оператора.

**Производительность съёма — частота импульсов.** Частота импульсов  $f_u$  является одним из основных параметров управления режимами электроэрозионной обработки. Из формулы (2.24) следует, что с повышением частоты приложения импульсов должна расти производительность обработки, так как увеличивается количество энергии  $W$ , поступающей в зону обработки в единицу времени. Однако с ростом частоты импульсов одновременно увеличивается объём продуктов эрозии, затрудняется их удаление из МЭП, что приводит к постепенному снижению скорости съёма материала. При достижении

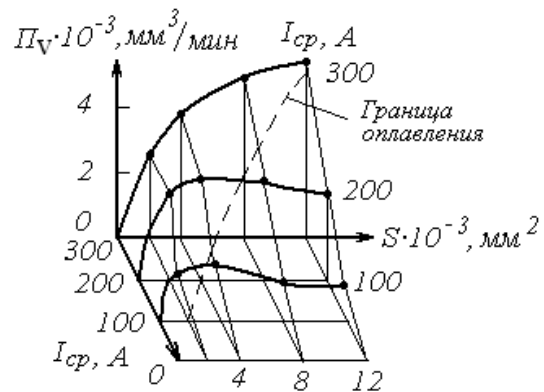


Рис. 2.21. Пространственная диаграмма зависимостей параметров электроэрозионной обработки ( $f_u = 400$  Гц) [16]

некоторого значения частоты импульсов при прочих постоянных условиях обработки рост производительности обработки прекращается, а при дальнейшем наращивании  $f_u$  происходит уменьшение производительности.

Экспериментами установлено, что предельное значение частоты импульсов, обеспечивающее максимально возможную производительность процесса, зависит от физических условий обработки, важнейшими из которых являются амплитуда импульса напряжения, площадь обработки, вид рабочей жидкости и условия эвакуации продуктов эрозии. Общая тенденция влияния частоты импульсов на производительность электроэрозионной обработки такова, что с ростом частоты предельно возможная для данной частоты и при других постоянных физических условиях ведения процесса производительность падает. Однако чрезмерное снижение частоты импульсов, проводимое на черновых режимах обработки с целью достижения максимально возможной производительности съёма, ведёт к нагреву и расплавлению уже не локальных объёмов материала, а заготовки в целом, что также недопустимо.

Это позволяет использовать частоту следования импульсов как основную характеристику управления режимами электроэрозионной обработки современных широкодиапазонных установок, используя так называемые *частотные характеристики электроэрозионной обработки*. Частотные характеристики процесса устанавливают для заданных условий обработки связь между частотой следования импульсов напряжения и производительностью обработки, энергоёмкостью процесса и другими технико-экономическими показателями электроэрозионной обработки.

На рисунке 2.22 показана частотная характеристика процесса, устанавливающая связь между диапазоном значений силы тока, который обеспечивает возможность достижения при принятых для построения данной частотной характеристики максимальной производительности обработки, и частот следования импульсов в диапазоне 10 Гц — 1 МГц. Представленная частотная характеристика согласована

с соответствующими пространственными диаграммами (см. рис. 2.21) таким образом, что каждому значению средней силы тока соответствует своя оптимальная площадь обработки.

Принятие специальных мер, в частности, по созданию искусственной устойчивости процесса, оптимизации выбора параметров импульсов по амплитуде, скважности, позволяет

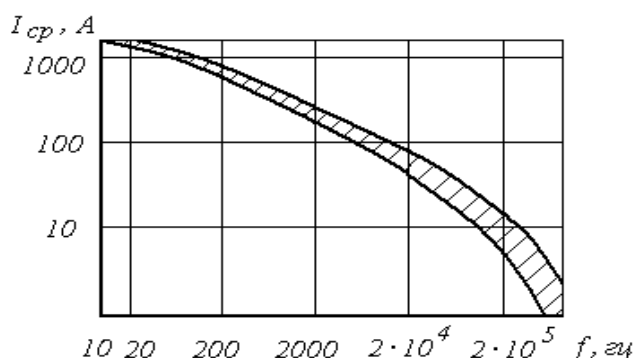


Рис. 2.22. Частотная характеристика электроэрозионной обработки [15]

превысить как верхние, так и нижние значения предельных токов, указываемых в частотных характеристиках.

В соответствии с рассмотренными физическими процессами и диаграммами устанавливаются верхние и нижние диапазоны частот, а соответственно и возможности электроэрозионного метода обработки в целом. Область использования высоких частот, достигающих на современном оборудовании 2 МГц, и большой скважности ( $q = 15-30$ ) рекомендуется для получения низкой шероховатости обработанной поверхности с минимально возможной зоной структурных превращений. Эта область частот импульсов соответствует минимальной производительности обработки, использованию схемы обработки при прямой полярности электродов на чистовых режимах.

Область низких частот оптимальна при обработке больших площадей. Эта область характеризуется высокой производительностью, но и значительными дефектными слоями, большой энергоёмкостью и высокой шероховатостью обработанных поверхностей. Низкие частоты, соответствующие десяткам импульсов в секунду, используются при реализации электроэрозионной обработки на обратной полярности.



***Производительность обработки — глубина обработки.*** По мере углубления электрода-инструмента в обрабатываемую заготовку осложняется поступление в рабочую зону диэлектрической жидкости и затрудняется удаление продуктов эрозии из МЭП. В межэлектродном промежутке увеличивается концентрация твёрдых частиц — продуктов эрозии, свойства диэлектрической жидкости ухудшаются. Это приводит к увеличению числа фиктивных и короткозамкнутых импульсов, и, следовательно, к снижению производительности обработки. Для устранения указанных негативных факторов применяют такие способы интенсификации удаления продуктов эрозии из зоны обработки, как прокачку или отсос жидкости, вибрацию электрода-инструмента, продувку межэлектродного промежутка воздухом.

***Производительность обработки — рабочая жидкость.*** В решении задачи достижения высокой производительности процесса существенное значение имеют характеристики используемой рабочей жидкости. Как показано в разделе 2.3, рабочая жидкость в процессе обработки выполняет три функции: способствует возбуждению электрического разряда между электродами при относительно низком напряжении, обеспечивает естественную и принудительную эвакуацию продуктов эрозии из МЭП и охлаждает рабочую зону, заготовку и инструмент.

Различие технологических задач при реализации разных видов обработки (см. рис. 2.4; 2.5) определяет необходимость выбора рабочей жидкости, которая способствует достижению наилучших показателей процесса при обеспечении максимально возможной производительности обработки. Так, при чистовых видах обработки, характеризующихся малыми межэлектродными зазорами и малой энергией импульса, высокая производительность обеспечивается применением маловязких рабочих жидкостей — технической воды или керосина. При черновой обработке с большей энергией импульса применяют масла с высокой температурой вспышки.

Загрязнённость рабочей жидкости продуктами эрозии значительно снижает производительность обработки, поэтому её необходимо периодически заменять.

**Многоэлектродная и многоконтурная обработка.** Большим резервом повышения производительности электроэрозионной обработки является возможность использования многоэлектродных (многоинструментальных) и многоконтурных схем. Если несколько электродов-инструментов размещены между собой параллельно и подключены к одному генератору импульсов, то такая обработка называется многоэлектродной (многоинструментальной) (см. рис. 2.4, n).

Многоконтурные схемы обработки предполагают наличие нескольких электрических контуров. При этом под контуром следует понимать электрическую цепь питания с одним или несколькими электродами-инструментами, в которой можно поддерживать режим, отличный от режима других контуров. Таким образом, в разных контурах многоконтурной схемы можно осуществить работу с разными режимами. Одна из возможных схем многоконтурной обработки приведена на рисунке 2.23.

В производственных условиях реализация возможностей многоконтурной обработки, применение многоинструментальных наладок определяются технологическими возможностями используемого оборудования.

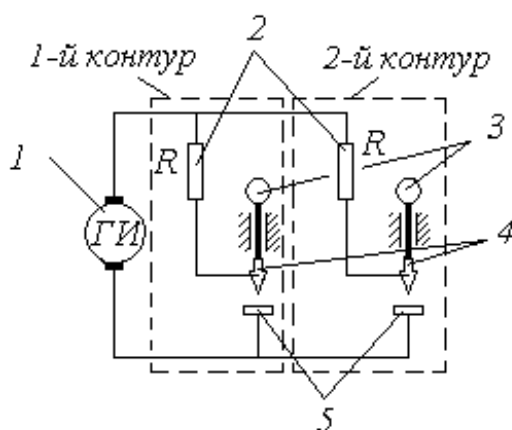


Рис. 2.23. Схема двухконтурной электроэрозионной обработки: 1 – генератор импульсов; 2 – резисторы; 3 – регуляторы; 4 – электроды-инструменты; 5 – заготовки

#### 2.4.4. Техничко-экономические характеристики электроискрового и электроконтактно-дугового методов электроэрозионной обработки

В соответствии с классификацией методов электроэрозионной обработки, приведённой на рисунках 1.2 и 1.3, электроэрозионный метод обработки по способу генерирования разрядов подразделён на группы электроискровых и электроконтактно-дуговых методов обработки. Рассмотрим далее особенности режима обработки, достигаемые технико-экономические параметры и основные области применения каждой из этих групп методов электроэрозионной обработки, вытекающие из представленных в предыдущих разделах физических основ их реализации.

##### *Электроискровая обработка*

Электроискровой метод обработки реализуется униполярными импульсами при прямой или обратной полярности электродов в широком диапазоне используемых значений параметров режима обработки. По характеристикам параметров обработки выделяют чистовой, получистовой и черновой режимы электроискровой обработки.

*Чистовая электроискровая обработка* реализуется при прямой полярности электродов и характеризуется использованием разрядов малой длительности ( $\tau_u = 10^{-4} \dots 10^{-7}$  с) и большой скважности ( $q_u > 10$ ). Это соответствует наличию в прохождении электрического разряда  $\tau_u$  только искровой стадии (см. рис. 2.2). Дуговая стадия при коротких импульсах разряда либо отсутствует, либо мала по длительности и нестабильна.

Напряжение на электродах  $U_{xx}$  при чистовой электроискровой обработке принимается в пределах 40–180 В, а средняя сила тока в канале разряда составляет от 2 до 10 А.

В зависимости от принятого режима и площади обработки производительность чистовой электроискровой обработки  $P_v$  находится в пределах 0,1–800 мм<sup>3</sup>/мин. При использовании проволочного электрода-инструмента она составляет 6–600 мм<sup>2</sup>/мин.

Электроискровая обработка как чистовой метод обработки позволяет получить размеры с точностью по 6–9-му квалитетам точности. Применительно к проволочно-вырезным станкам и при изготовлении поверхностей малых размеров (например, отверстий) для характеристики точности выполнения размеров оценивают суммарную погрешность обработки, не зависящую от значения выполняемого размера. На современных высокоточных станках этой группы размеры детали выполняются с погрешностью до  $\pm 0,5$  мкм.

Шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$  при электроискровой обработке находится в пределах 0,125–0,63 мкм. Глубина дефектного слоя в зависимости от принятого режима колеблется в пределах 0,05–0,35 мм.

Чистовой режим электроискровой обработки позволяет осуществлять отделочную, прецизионную обработку с обеспечением высокого качества поверхности. На режимах обработки, характеризующихся энергией импульса  $W_u$  менее 0,05 Дж, глубина термического влияния  $h_\theta$  может быть снижена до 2 мкм.

При достижении высокого качества поверхности чистовая электроискровая обработка характеризуется:

- сравнительно низкой производительностью процесса, так как длительность импульса мала, а, следовательно, обладая недостаточным количеством энергии, воздействие этих импульсов на поверхность невелико;

- большим относительным износом электрода-инструмента, достигающим 100 % от объёма снятого материала.

Этот метод можно использовать для обработки заготовок небольших размеров из всех токопроводящих материалов, однако, как правило, его целесообразно применять при обработке заготовок из материалов, плохо поддающихся резанию (труднообрабатываемых материалов). Чистовую электроискровую обработку широко используют для изготовления штампов на заключительных операциях, фильер, пресс-форм, фасонных резцов, копиров, сеток, деталей для

ювелирной промышленности, для прорезки пазов, вырезки по контуру, для соединения каналов в корпусах деталей гидроаппаратуры. В качестве инструментального материала электродов-инструментов используют медь М1, М2, медный сплав МЦ1, латуни, а также алюминий и его сплавы.

*Получистовая и черновая электроискровая обработка.* Решение задачи использования электроискровой обработки, обеспечивающей снятие значительных припусков при невысоком качестве обработанных поверхностей, стало возможным после создания генераторов импульсов, позволяющих реализовать импульсы большой длительности ( $\tau_u = 10^{-2} - 10^{-4}$  с) и мощности  $W_u$  более 0,5 Дж, а также в связи с открытием эффекта обратной полярности. Именно на обратной полярности электродов и осуществляются черновой и получистовой режимы электроискровой обработки.

Изучение физических основ реализации режимов электроэрозионной обработки на обратной полярности показало, что преимущественному износу при этом в отличие от обработки на прямой полярности подвергается не анод, а катод. Это явление и было названо эффектом обратной полярности. В связи с этим обработку материалов на режиме обратной полярности осуществляют, принимая заготовку катодом, а инструмент — анодом.

Электрический разряд при электроискровой обработке на обратной полярности характеризуется наличием двух стадий (см. рис. 2.2). Непосредственно вслед за искровой стадией наступает дуговой период, который продолжается до окончания импульса напряжения. В отличие от искрового разряда, температура в зоне которого достигает  $10000^\circ\text{C}$ , дуговой разряд имеет температуру порядка  $4000 \dots 5000^\circ\text{C}$ , что позволяет увеличивать длительность импульсов, уменьшать промежутки между ними и таким образом вводить в зону обработки значительные мощности, увеличивая производительность обработки.

Внедрение электроискровой обработки на режиме обратной полярности позволило повысить производительности процесса в 8–10 раз по отношению к электроискровой чистой обработке и довести  $P_v$  до  $1,5 \cdot 10^4$  мм<sup>3</sup>/мин для стали и  $(3–5) \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup>/мин для твёрдого сплава.

При черновой обработке по сравнению с чистой электроискровой обработкой электрические разряды характеризуются меньшей скважностью ( $q < 10$ ), меньшей частотой следования импульсов ( $f_u$  от 50 до 1000 Гц) и большей их мощностью ( $W_u > 0,5$  Дж).

Черновая электроискровая обработка реализуется преимущественно на низких значениях напряжения холостого хода ( $U_{xx} = 18–36$  В) и при больших силах тока  $I_{cp}$ , достигающих 1000 А.

При этом методе обработки износ электрода-инструмента значительно меньше, чем при чистой электроискровой обработке. Например, для графитового электрода он составляет 0,1...0,5 %.

В связи с мощными электрическими разрядами и длительными импульсами качество поверхностного слоя и точность размеров при черновой электроискровой обработке невысокие. Жёсткий режим приводит к получению шероховатости поверхности по параметру  $Ra$  в пределах 6,3...50 мкм и появлению дефектного поверхностного слоя  $h_\theta$  глубиной до 0,2–0,4 мм. Заданные чертежом геометрические параметры изготавливаемых поверхностей находятся в пределах 9–11-го квалитетов точности.

Черновая электроискровая обработка применяется для 3-х координатной обработки фасонных поверхностей с площадью до сотен тысяч квадратных миллиметров у стальных деталей и деталей, изготовленных из жаропрочных и магнитных сплавов, титана и его сплавов. Метод электроискровой обработки на обратной полярности целесообразен для проведения предварительной (черновой) обработки фасонных поверхностей штампов, лопаток турбин и компрессоров, изготовления каналов сложного сечения с криволинейной осью, получения соединительных каналов в деталях гидроаппаратуры.

Обобщённые данные по режимам обработки и технико-экономическим показателям видов электроискровой обработки приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Параметры режимов электроискровой обработки

Параметры режима обработки	Вид обработки		
	чистовая	получистовая	черновая
Полярность	прямая	обратная	обратная
$W_u$ , Дж	$< 0,05$	0,05-0,5	$> 0,5$
$I_{cp}$ , А	2–5	5–10	10–1000
$\tau_u$	$< 10^{-5}$	$10^{-5}-10^{-4}$	$10^{-4}-10^{-2}$
$f_u$ , Гц	$7 \cdot 10^3-1,5 \cdot 10^6$	1000–7000	50–1000
$q_u$	$> 10$	$< 10$	
$Ra$ , мкм	3,2–0,125	12,5–3,2	$> 12,5$

### ***Электроконтактно-дуговая обработка***

Метод электроконтактно-дуговой обработки основан на электроэрозионном разрушении заготовки под воздействием разряда, возникающего в жидкой среде или в воздухе после начального контакта микронеровностей между вращающимся электродом-инструментом 2 и перемещающимся электродом-заготовкой 1. Принципиальные разновидности схем электроконтактно-дуговой обработки представлены на рисунке 2.3.

Соприкосновение под небольшим давлением электрода и заготовки приводит в месте контакта к повышенному электрическому сопротивлению, разогреву, размягчению и плавлению металла заготовки. Затем разогретый или расплавленный металл удаляется из зоны обработки механическим путём, увлекаемый быстрым движением электрода-инструмента относительно заготовки. Рабочий инструмент не расплавляется за счёт быстрого вращения (30–50 м/с) и охлаждения его вне зоны обработки диэлектрической жидкостью.

Вращением электрода-инструмента саморегулируются параметры импульса, поэтому при реализации электроконтактно-дугового метода обработки генератора импульсов не требуется. Используется постоянный или переменный ток низкого напряжения  $U = 12-60$  В. Электроконтактно-дуговая обработка на воздухе проводится при низших значениях напряжения этого диапазона. В настоящее время этот метод практически не применяется.

Электроконтактно-дуговой метод обработки не обеспечивает высокую точность (10–14 квалитеты точности), а шероховатость обработанной поверхности превышает 5 мкм по параметру  $Ra$ . Производительность процесса весьма высокая: при черновых режимах  $P_v$  достигает  $(0,5-3) 10^6$  мм<sup>3</sup>/мин.

Применение электроконтактно-дугового метода рекомендуется при обработке углеродистых и легированных сталей, чугуна, тугоплавких и труднообрабатываемых материалов. Этот метод применяют при разрезании заготовок, отрезании у заготовок, полученных литьём, литников и прибылей, при обработке цилиндрических, конических и плоских поверхностей заготовок из труднообрабатываемых материалов в различных отраслях машиностроения.

## **2.5. ВЫБОР РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

### **2.5.1. Назначение параметров режима электроэрозионной обработки**

Определение оптимального режима обработки является одной из самых распространённых технологических задач в машиностроении. Это вызвано тем, что технико-экономические показатели процесса существенно зависят от назначенного режима обработки.

Решение задачи оптимизации электроэрозионной обработки сводится к отысканию режима обработки, обеспечивающего для конкретных условий изготовления изделия наилучшее значение выбранного критерия оптимальности. Чаще всего в качестве такого показателя



принимают минимальную себестоимость обработки заготовки или максимальную производительность труда, то есть минимальное основное время обработки. В отдельных условиях производства могут быть приняты и другие критерии оптимизации, например, минимальный расход применяемого инструмента.

Критерий минимальной себестоимости обработки приемлем для большинства операций электроэрозионной обработки, но его применение требует проведения большого объема расчётных работ при подготовке производства и многочисленных сведений по исходной информации, зачастую известных не полностью. В связи с этим основным критерием оптимальности процесса электроэрозионной обработки принимают максимально достижимую производительность обработки на электроэрозионных операциях, которые в силу, как правило, значительно меньшей производительности, чем производительность механической обработки, могут ограничивать в тех или иных показателях последующие операции технологического процесса изготовления детали.

При оптимизации режима обработки необходимо учесть все технологические и организационно-технические ограничения, накладываемые на параметры режима, и выразить эти ограничения аналитически или графически. Число таких ограничений достаточно велико. Важнейшими из них являются ограничения, накладываемые требованиями по качеству обработки заготовки (шероховатость поверхности, качество поверхностного слоя детали, точность размера и формы обрабатываемой поверхности), ограничения, связанные с характеристиками станка, условиями обработки.

Поэтому в общем случае исходными данными для расчёта режима обработки на электроэрозионной операции являются:

- вид выполняемой электроэрозионной работы (см. рис. 2.4; 2.5);
- технологический эскиз операции с указанием выполняемых размеров, точности изготовления, требуемой шероховатости, способа базирования и закрепления заготовки на станке;
- материал заготовки;

- исходное состояние обрабатываемой поверхности;
- размер припуска на обработку;
- модель и характеристики принимаемого для обработки оборудования;
- требования к инструменту и условия обработки.

В основе методики выбора режима электроэрозионной обработки лежат вытекающие из физических моделей взаимосвязи между параметрами режима обработки, исходными (входными) параметрами процесса и заданными (выходными) технико-экономическими показателями.

В режиме электроэрозионной обработки (см. раздел 2.3) выделяют три группы параметров: электрические характеристики (энергия, амплитуда, мощность, длительность, скважность, частота, форма и полярность импульсов), гидродинамические параметры (давление, температура и расход рабочей жидкости) и механические параметры, в число которых входят величины межэлектродных зазоров, скорость движения подачи электрода-инструмента и вспомогательные движения, соответствующие принятой схеме реализации процесса.

Эффективное использование электроэрозионной обработки, характеризующееся выбираемыми критериями оптимизации, должно достигаться согласованием:

- энергетических и электрических характеристик импульса с теплофизическими характеристиками изделия;
- электрических режимов с размерами, точностью, формой обрабатываемой поверхности и принятой схемой обработки.

Для осуществления такого согласования на электроэрозионном оборудовании предусматривается регулирование в широких пределах, порознь или совместно, большинства электрических параметров режима обработки.

Существуют различные методы оптимизации режимов обработки, выполняемой различными технологическими методами. В области электроэрозионной обработки эта задача реализуется *методом*

*последовательного определения элементов режима обработки по параметрам всех трёх групп.*

В общем случае выбор элементов режима обработки предполагает выполнение технологом далее представленных действий.

1. Определение вида обработки (черновая, получистовая, чистовая) и полярности напряжения на электродах (прямая или обратная).

2. Выбор критерия оптимизации, которым чаще всего принимается максимальная производительность процесса по объёму  $P_v$ .

3. Выбор марки материала электрода-инструмента и определение его конструктивных характеристик.

4. Выбор диэлектрической жидкости, схемы её прокачки через МЭП и назначение гидрокинематических параметров прокачки.

5. Определение примерного значения энергии импульса  $W_u$  по заданному значению шероховатости поверхности (см. формулу (2.12)).

6. Выбор частоты следования импульсов  $f_u$  как основного параметра режима обработки, определяющего производительность обработки.

7. Выбор напряжения холостого хода  $U_{xx}$  на электродах и среднего напряжения  $U_{cp}$  (см. рис. 2.2). Большие значения напряжения на электродах соответствуют более высоким требованиям к точности размеров и шероховатости обработанной поверхности.

В тех диапазонах напряжения на электродах, когда процесс протекает стабильно, зависимость скорости съёма от напряжения  $U_{xx}$  при постоянном среднем токе  $I_{cp}$  очень мала.

8. Определение средней силы тока  $I_{cp}$ , обеспечивающей максимальную производительность обработки при заданной площади обрабатываемой поверхности при черновой обработке или при заданной шероховатости поверхности и площади обрабатываемой поверхности — при чистовой обработке. В определении  $I_{cp}$  используются пространственные диаграммы, экспериментально получаемые для генераторов импульсов конкретных моделей, по типу диаграммы, приведённой на рисунке 2.21, и рекомендации по зависимостям

параметров режима обработки от условий обработки, представленные в разделе 2.4.3.

При обработке фасонных поверхностей (объёмном копировании) расчётная величина площади по мере углубления электрода-инструмента изменяется. Под обрабатываемой поверхностью в этом случае понимается только та поверхность, которая подвергается обработке в текущий момент. Например, при обработке сложной поверхности, представленной на рисунке 2.24, вначале вступает в работу небольшой участок электрода-инструмента. Соответственно этому величина расчётной площади мала (рис. 2.24, поз. 1). По мере углубления электрода в заготовку площадь обработки растёт, постепенно достигая максимума (рис. 2.24, поз. 2). Поэтому с изменением площади обрабатываемой поверхности заготовки 3 с целью оптимизации процесса и достижения на каждом этапе обработки максимальной производительности должна изменяться и величина рабочего тока  $I_{cp}$ .

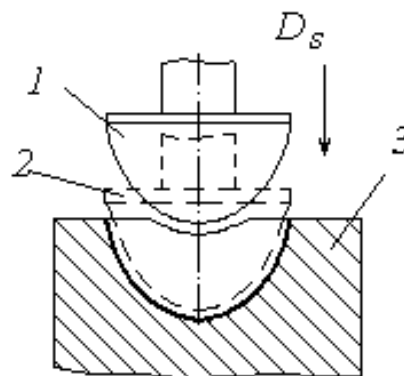


Рис. 2.24. Обработка фасонной поверхности

9. Расчёт длительности импульсов  $\tau_u$  с учётом выбранных значений среднего тока в импульсе  $I_u$ , напряжения  $U_u$  и принятой к расчёту энергии импульса  $W_u$ .

10. Определение скважности импульсного процесса  $q_u$  по формуле (2.13).

11. Расчёт межэлектродных зазоров ( $\delta_m$ ;  $\delta_o$ ) и определение размеров электрода-инструмента.

12. Определение скорости подачи электрода-инструмента  $v_s$ , объёмной производительности процесса  $\Pi_v$  и основного времени на обработку  $\tau_o$ .

13. Выбор модели электроэрозионного оборудования или корректировка принятого режима обработки применительно к используемому на производстве типу станка и виду обработки.

Виды закономерностей, численные значения входящих в обобщённые закономерности коэффициентов и другие необходимые данные определяются по материалам справочников, содержащих формулы, таблицы, номограммы зависимостей, например, [9, 16]; по литературным источникам, например, [2, 6, 7, 18], производственным нормативам, паспортным данным и номограммам электроэрозионного оборудования. В ряде случаев отсутствующие в указанных документах параметры режима обработки должны устанавливаться экспериментально.

Степень полноты реализации представленной общей последовательности выбора режима обработки определяется уровнем автоматизации используемого электроэрозионного оборудования.

При использовании универсальных электроэрозионных станков с ручным управлением (не имеющих систем ЧПУ) выбор режима обработки и наладка оборудования для его реализации осуществляется для каждой изготавливаемой детали индивидуально в два этапа. На первом этапе технолог проводит определение параметров обработки по представленной последовательности, а оператор настраивает станок и устанавливает выбранный режим обработки на панели управления станком. Второй этап содержит действия оператора по отладке установленного режима обработки на основе визуальной и звуковой информации, поступающей с приборов панели управления в процессе изготовления первой детали, с выходом на последующих заготовках на оптимальный режим.

При использовании современных электроэрозионных станков с ЧПУ и встроенными микроЭВМ работа по наладке станка на обработку заготовки резко упрощается. Использование систем ЧПУ и микроЭВМ позволяет осуществлять автоматическую установку параметров режима обработки, исходя только из заданных характеристик изготавливаемой поверхности и требований, предъявляемых к их качеству. Все аналитические зависимости технико-экономических показателей обработки и значения формирующихся при этом межэлектродных зазоров от параметров режима и условий обработки для

используемого на станке типа генератора импульсов определяются экспериментально в лаборатории и вводятся в память ЭВМ при изготовлении станка. При получении задания на обработку в виде чертежа и технологической документации оператор с пульта управления в диалоговом режиме вводит в оперативную память микроЭВМ сведения о материалах электрода-инструмента и заготовки, параметрах изготавливаемой поверхности (площадь обработки при прошивании, высоту заготовки при проволочном вырезании) и требуемую шероховатость поверхности. Дальнейшее назначение и установка режима обработки с оптимизацией процесса по наибольшей производительности осуществляется, как правило, в автоматическом режиме управляющей программой с помощью ЭВМ станка.

### **2.5.2. Расчёт основного времени электроэрозионной обработки**

Основное (машинное) время  $\tau_o$  является одним из важнейших составляющих штучно-калькуляционного времени на обработку. Знание его необходимо при проектировании нового технологического процесса и для сопоставления сравниваемых вариантов по себестоимости обработки или по другому принятому критерию при выборе технологического метода изготовления заданной поверхности.

В общем случае основное время на электроэрозионную обработку определяют делением объёма припуска  $V_z$  на объёмную производительность процесса

$$\tau_o = \frac{V_z}{P_v}, \quad (2.27)$$

где  $V_z$  — объём удаляемого с заготовки припуска, мм<sup>3</sup>.

Однако применение формулы (2.27) в реальных условиях затруднено в связи со сложной зависимостью объёмной производительности электроэрозионной обработки от условий и режимов обработки, формы обрабатываемой поверхности и отсутствием математических моделей, устанавливающих однозначные взаимосвязи между производительностью, параметрами изготавливаемой детали и условиями обработки. В связи с этим определение  $\tau_o$  теоретическими расчётами при

проектировании новых технологических процессов или модернизации существующих может быть выполнено только приближённо, на основе использования далее приведённых рекомендаций.

Если при обработке обеспечивается оптимальное соотношение между средним током  $I_{cp}$  и площадью обработки  $S$ , то расчёт основного времени при черновой обработке заготовки можно производить, основываясь на графике зависимости скорости движения подачи электрода-инструмента  $v_s$  от площади обработки (рис. 2.25) [7].

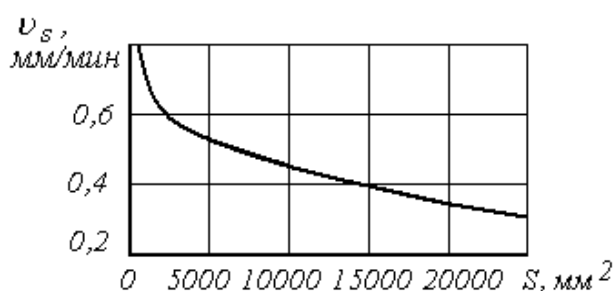


Рис. 2.25. Зависимость скорости движения подачи электрода-инструмента от площади обработки [7]

График получен при обработке стали 45.

Расчёт основного времени при прошивании сквозного отверстия производится при использовании графика по формуле

$$\tau_o = \frac{\ell}{v_s}, \quad (2.28)$$

где  $\tau_o$  — основное время

обработки, мин;  $\ell$  — высота прошиваемого отверстия, мм;  $v_s$  — скорость подачи электрода-инструмента, мм/мин.

При несовпадении условий обработки с теми, которые использованы при получении графика (рис. 2.25), в формулу (2.28) вводятся поправочные коэффициенты.

При черновой обработке сложных фасонных поверхностей (см. рис. 2.24) припуск часто удаляется с изменением среднего значения силы тока  $I_{cp}$  по мере углубления электрода-инструмента в заготовку. Следовательно, скорость съёма материала, а потому и скорость подачи электрода-инструмента  $v_s$  в процессе обработки при этом изменяются. Расчёт основного времени на обработку в таких случаях должен выполняться поэтапно, путём определения трудоёмкости удаления последовательных слоёв припуска, характеризуемых разной рабочей площадью и используемым режимом обработки (рис. 2.26).

Для этого на чертеже детали делают сечения, перпендикулярные направлению движения подачи и отстоящие друг от друга на расстояниях, соответствующих более или менее значительным изменениям в площадях сечений  $S_1, S_2, \dots, S_i$  и т. д.

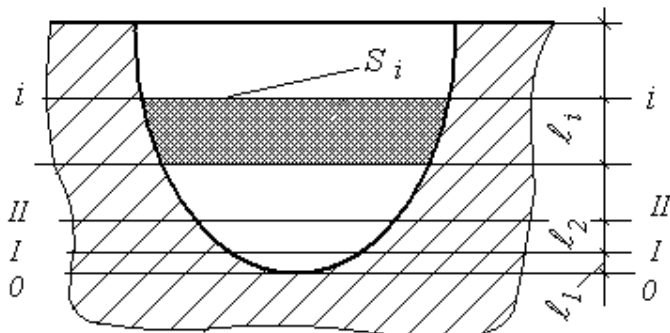


Рис. 2.26. Схема выделения слоёв припуска

Между этими сечениями выделяют слои материала. Далее в расчётах принимается, что каждый из выделенных слоёв заготовки удаляется на постоянном режиме, характеризуемом конкретной оптимальной величиной силы тока  $I_{cp_i}$ . Использование данной методики назначения силы тока позволяет обеспечить примерное постоянство линейной скорости съёма материала  $v_s$  в направлении движения подачи  $D_s$ .

По составленной схеме сечений детали определяют объём каждого слоя и время его удаления по формуле  $\tau_{o_i} = \ell_i / v_{s_i}$ , суммируют результаты, определяя полное время всей черновой обработки.

$$\tau_o = \sum_{i=1}^n \tau_{o_i}, \quad (2.29)$$

где  $n$  — число сечений детали;  $i$  — номер сечения.

Если обработка ведётся на силе тока меньшей, чем допускается величиной площади поперечного сечения обрабатываемой поверхности, величину скорости подачи уменьшают во столько раз, во сколько фактическая величина площади обработки больше оптимальной для принятого значения средней силы тока.

При обработке заготовок в условиях, отличающихся от режимов, принятых при экспериментальном определении зависимостей  $P_v - I_{cp} - S$ ,  $I_{cp} - f$ ,  $v_s - S$  (см. рис. 2.21; 2.22; 2.26), определённое по предыдущим методикам значение  $I_{cp}$  корректируют с учётом



поправочных коэффициентов. Дальнейшие расчёты ведут на основе определённого таким образом значения  $I_{cp}$ .

Время получистовой обработки на промежуточных переходах технологического процесса приближенно оценивают по полной площади поверхности, требующей обработки. Для этого используют экспериментально полученные данные таблицы 2.3 по трудоёмкости обработки  $1 \text{ см}^2$  поверхности при обработке стали 45 с частотой импульсов  $f_u = 400$  имп/сек.

Таблица 2.3

Время получистовой обработки [7]

Средний ток $I_{cp}$ , А	Высота неровностей $Ra$ , мкм	Основное время обработки $\tau_0$ площади $1 \text{ см}^2$ , мин/ $\text{см}^2$
50	0,28	0,02
30	0,22	0,02
20	0,18	0,03
10	0,15	0,05
5	0,12	0,12

При чистовой обработке основным критерием оптимальности процесса чаще всего принимают заданную шероховатость поверхности при условии обеспечения максимально возможной производительности. В связи с этим средняя сила тока должна быть снижена до минимально возможных пределов. Поэтому время на чистовую обработку определяется обрабатываемой площадью поверхности и увеличивается пропорционально её росту.

В реальных производственных условиях основное время обработки  $\tau_0$  определяют экспериментально при изготовлении пробной детали на выбранных для заданных условий обработки и оборудования режиме. При использовании современных электроэрозионных станков с ЧПУ, при обработке заготовок на которых режим обработки устанавливается автоматически и остается неизвестным технологу, определение основного времени, возможно, только экспериментальным методом.

## 2.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

### 2.6.1. Классификация и общая характеристика электроэрозионного оборудования

Станки для электроэрозионной обработки классифицируют по тем же признакам, что и металлообрабатывающие станки. Основными признаками классификации являются: степень универсальности станка, степень автоматизации станка, реализуемый на станке технологический метод обработки.

*По степени универсальности* электроэрозионные станки подразделяют на универсальные, специализированные и специальные.

*Универсальные электроэрозионные станки* предназначены для выполнения разнообразных технологических операций в широком диапазоне режимов обработки на заготовках широкой номенклатуры. Например, один и тот же универсальный станок может быть использован для электроэрозионного прошивания сложнопрофильных отверстий и щелей в фильерах и матрицах вырубных штампов, при изготовлении фасонных прессформ, ковочных штампов и для обработки других деталей сложной конфигурации. В станках этой группы предусматривается ступенчатое или ступенчато-непрерывное регулирование электрических режимов обработки, обеспечивающее набор режимов для всех предусмотренных конструкцией условий и параметров обработки.

Среди станков этой группы наибольшее распространение получили универсальные копировально-прошивочные станки, прошивочные и вырезные станки.

В отличие от универсальных металлорежущих станков, используемых оптимально только в условиях единичного и мелкосерийного типов производства, универсальные электроэрозионные станки с успехом используются в условиях серийного и крупносерийного производств.

*Специализированные станки* применяют при изготовлении деталей одного класса, отличающихся размерами, или же при выполнении на заготовках деталей разных классов однотипных операций. Примерами станков этой группы могут служить электроэрозионные прошивочные станки типа «электроэрозионная супердрель», станки для формирования профиля пера турбинных лопаток, изготовления ручьёв на прокатных валках, а также станки для фотокопирования и копирования по шаблону.

*Специальные электроэрозионные станки* используют при изготовлении лишь одного типа деталей или для выполнения одного вида работ. Например, сюда можно отнести электроэрозионные станки для выжигания из отверстий остатков сломанного режущего инструмента.

***Классификация электроэрозионных станков по степени автоматизации.*** Под автоматизацией технологического оборудования понимается такое направление его совершенствования, при котором человек передает машине выполнение не только тяжёлых физических функций, но и функции управления технологическим процессом, реализуемым на данном оборудовании.

Электроэрозионный станок как объект автоматизации может иметь следующие тесно связанные между собой системы автоматического регулирования параметров процесса обработки:

- систему автоматического поддержания величины межэлектродного зазора при ручном, неавтоматическом задании скорости подачи электрода-инструмента оператором, ориентирующимся по показаниям приборов и внешним признакам течения процесса;
- систему автоматического определения и поддержания оптимальной скорости подачи электрода-инструмента без участия оператора (адаптивная система управления);
- систему автоматического регулирования электрических режимов обработки в соответствии с диаграммой  $I_{cp} - S - P_v$  в функции изменяющейся площади обработки. При этом регулирование может быть реализовано:

- по жёсткой программе, предварительно рассчитанной технологом и исключающей участие оператора во время процесса (системы числового программного управления),

- автоматической регулировкой параметров режима обработки, исключающей участие технолога на предварительном этапе и оператора в ходе реализации процесса (система адаптивного управления);

— систему автоматического регулирования частоты  $f_u$  и силы тока  $I_{cp}$  для получения заданной шероховатости поверхности в минимально возможное время (система адаптивного управления).

Все указанные системы, реализованные в современном электроэрозионном оборудовании, представляют по существу единую систему автоматического управления электроэрозионным станком, превращающую его, в конечном счете, в полуавтомат, а при оснащении станка роботом, обеспечивающим автоматизацию установки на станок заготовки и снятие готового изделия, — в станок-автомат.

К этим сугубо специфическим системам управления работой электроэрозионного станка можно дополнить общие для всех автоматизированных станков системы:

— автоматизации вспомогательных перемещений рабочих узлов станка;

— управления вспомогательными механизмами путевого контроля, блокировки, защиты, измерений, очистки и подачи рабочей жидкости и другие.

По степени автоматизации электроэрозионные станки подразделяют на станки с ручным управлением, станки с ЧПУ и станки с адаптивным управлением.

*Электроэрозионные станки с ручным управлением.* К этой группе относят станки, управление обработкой на которых осуществляют в ручном режиме. Вручную оператор производит установку и снятие заготовки и электрода-инструмента, наладку режима обработки и его изменение, установку глубины прошивания отверстия (полости), наладку и регулирование системы прокачки рабочей жидкости.

Наибольшее распространение в промышленности из станков с ручным управлением получили копировально-прошивочные и прошивочные станки, конструкция и устройство которых будут рассмотрены далее на примере электроэрозионного универсального копировально-прошивочного станка модели Sure First ED-203.

В то же время все станки ручного управления в той или иной степени оснащены автоматическими системами управления процессом обработки. В частности, все электроискровые станки имеют автоматическую систему поддержания межэлектродного зазора.

*Регулятор межэлектродного зазора.* В процессе обработки межэлектродный зазор изменяется в результате удаления материала с обрабатываемой поверхности, насыщения зоны обработки продуктами эрозии, износа электрода-инструмента и ряда других процессов. Его изменение приводит к нарушению стабильности процесса, снижению производительности обработки или ухудшению каких-либо других выходных параметров, например, параметра шероховатости  $Ra$ .

Для сохранения устойчивой работы электроэрозионного станка и получения максимальной для принятого режима скорости съёма материала величина межэлектродного зазора на электроэрозионных станках должна поддерживаться в определённых пределах. Однако как параметр регулирования она не может быть использована, поскольку измерение зазора в процессе обработки затруднительно. Это обстоятельство делает необходимым введение косвенной системы авторегулирования величины зазора.

Параметрами, косвенно отражающими состояние и величину межэлектродного зазора, являются напряжение на электродах и ток, проходящий через МЭП. Устойчивому протеканию процесса соответствуют некоторые средние значения этих параметров при любом сочетании напряжения, тока, частоты и скважности импульсов. Их значения, как правило, и используются в качестве параметров косвенного управления величиной межэлектродного зазора. Возможно использование и других параметров для регулирования зазора, например,

мощности импульсов, средней скорости внедрения электрода в обрабатываемое изделие.

Блок-схема автоматического регулятора межэлектродного зазора электроэрозионного станка показана на рисунке 2.27.

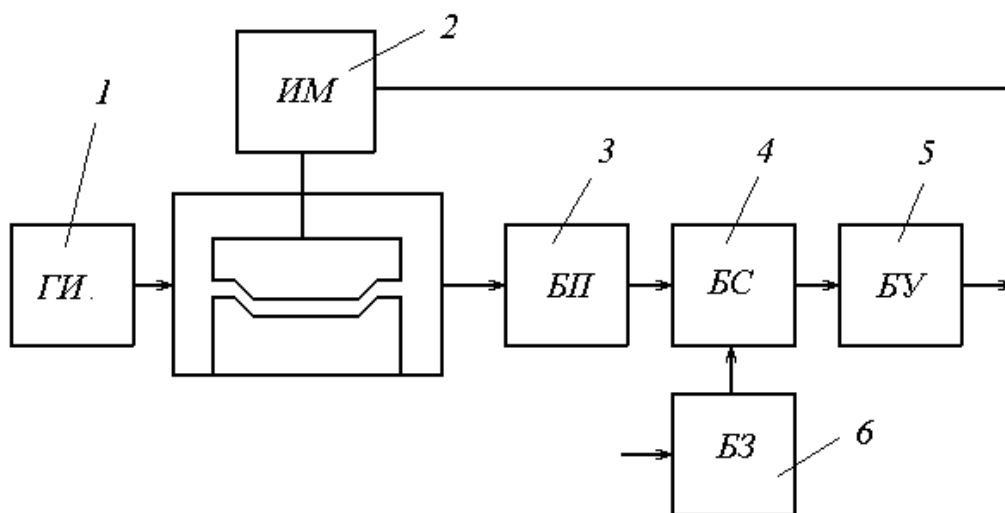


Рис. 2.27. Блок-схема автоматического регулятора межэлектродного зазора: 1 — генератор импульсов; 2 — исполнительный механизм; 3 — блок преобразования; 4 — блок сравнения; 5 — блок усиления сигналов; 6 — блок задания

Регулятор межэлектродного зазора работает следующим образом: сигналы, снимаемые с МЭП и несущие информацию о процессе, преобразуются в блоке преобразования *БП* в форму, удобную для дальнейшего их использования. Сигнал на выходе с блока *БП* сравнивается в блоке сравнения *БС* с эталонной величиной сигнала, сформированного в блоке задания *БЗ*. Величина рассогласования этих сигналов после усиления в блоке усиления сигнала *БУ* подаётся на двигатель исполнительного механизма *ИМ*, который обеспечивает движение подачи электрода-инструмента.

По данной схеме регулирования величину эталонного сигнала блока *БЗ* устанавливает оператор при наладке режима обработки. При работе станка оператор может изменить величину эталонного сигнала, добиваясь величины рассогласования на выходе блока сравнения *БС* такой, чтобы *ИМ* поддерживал требуемый зазор по мере съёма материала. Так как при этом электрод-инструмент должен непрерывно

перемещаться, то величина рассогласования всегда будет отличаться от нуля. Соответствующая этому скорость подачи электрода-инструмента определится величиной съёма материала и площадью обработки. При холостом ходе так же, как и при нормальной работе, величина рассогласования положительная, но её значение больше, а, следовательно, больше и подача электрода-инструмента, что способствует быстрому вступлению станка в работу. При коротком замыкании величина рассогласования отрицательная, вследствие этого электрод-инструмент отводится от заготовки и короткое замыкание ликвидируется.

При всей простоте данной системы регулирования следует учесть, что величина оптимального значения межэлектродного зазора зависит от глубины внедрения электрода-инструмента в заготовку, степени чистоты рабочей жидкости, площади обработки, от возможности эвакуации продуктов эрозии, от давления и вязкости прокачиваемой жидкости, температуры в зоне обработки и других условий обработки. Поскольку функциональные связи между этими взаимодействиями и реакцией на них процесса эрозионной обработки весьма сложны и существенно нелинейны, расчётное определение оптимальной величины межэлектродного зазора в процессе обработки не представляется возможным.

В связи с этим при данной схеме регулирования с увеличением глубины обработки производительность съёма материала с заготовки падает. Поэтому такая система, являющаяся открытой системой управления, не является оптимальной и используется только на станках с ручным управлением.

*Электроэрозионные станки с числовым программным управлением (ЧПУ).* Современные электроэрозионные станки оснащают числовым программным управлением. Управление этими станками осуществляется от программоносителя или с пульта управления, на котором в закодированном виде записывают управляющую программу. Управляющая программа представляет собой последовательность

команд, обеспечивающих выполнение заданного алгоритма функционирования оборудования в целом и отдельных его элементов.

Работа станка с ЧПУ тесно связана с системами координат. Оси координат располагают параллельно направляющим станка. В качестве единой системы координат для всех станков с ЧПУ в соответствии с ГОСТ 23579-79 принята стандартная (правая) система, при которой оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рис. 2.28) указывают положительные перемещения инструментов относительно подвижных частей станка. Положительные направления движения заготовки относительно неподвижных частей станка указывают оси  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ , направленные противоположно осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

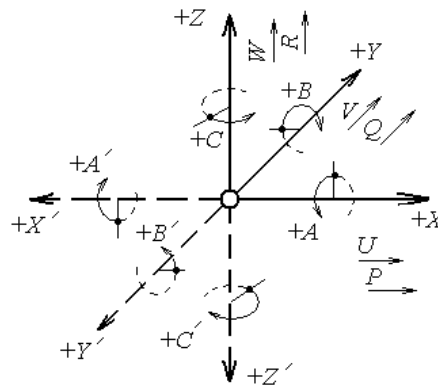


Рис. 2.28. Стандартная система координат станков с ЧПУ

Круговые перемещения инструмента (например, угловое смещение оси шпинделя фрезерного станка) обозначают буквами  $A$  (вокруг оси  $X$ ),  $B$  (вокруг оси  $Y$ ),  $C$  (вокруг оси  $Z$ ), а круговые перемещения заготовки – соответственно буквами  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ . Для обозначения вторичных угловых движений вокруг специальных осей используют буквы  $D$  и  $E$ .

Для обозначения направления перемещения двух рабочих органов вдоль одной прямой используют так называемые вторичные оси:  $U$  (параллельно  $X$ ),  $V$  (параллельно  $Y$ ),  $W$  (параллельно  $Z$ ). При трёх перемещениях в одном направлении применяют ещё и оси  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  (см. рис. 2.28).

У станков различных типов и моделей системы координат размещают по-разному, определяя при этом положения положительных осей и положения начала координат. На рисунке 2.28 расположение осей соответствует расположению узлов электроэрозионного копировально-прошивочного станка с вертикальной компоновкой (см. рис. 2.31).



По уровню технических возможностей в электроэрозионном оборудовании используются устройства ЧПУ (УЧПУ) классов *NC*, *SNC*, *CNC*, *DNC*, *HNC*.

Станки, оснащённые УЧПУ классов *NC* и *SNC*, в настоящее время еще достаточно распространены на предприятиях, Это наиболее простые системы управления с ограниченным числом информационных каналов. В составе этих систем отсутствует оперативная ЭВМ, а внешним признаком УЧПУ классов *NC* и *SNC* является способ считывания и отработки управляющей программы.

В системах классов *NC* принято покадровое чтение управляющей программы с внешнего программносителя на протяжении цикла обработки каждой заготовки. Основным недостатком режима работы станков с этим классом УЧПУ является то, что для обработки каждой последующей заготовки из партии системе ЧПУ приходится вновь читать все кадры управляющей программы. В процессе такого чтения нередко возникают сбои из-за недостаточно надёжной работы считывающих устройств. Отдельные команды в системах класса *NC* могут быть введены с пульта управления УЧПУ или с панели управления станком.

Системы УЧПУ класса *SNC* сохраняют все свойства систем класса *NC*, но отличаются от них увеличенным объёмом памяти. Эта особенность позволяет прочитать системе все кадры управляющей программы и разместить полученную информацию в запоминающем устройстве. Таким образом, программа с внешнего носителя читается только один раз перед изготовлением всей партии одинаковых деталей и поэтому внешний программноситель мало изнашивается.

Развитие вычислительной техники, уменьшение габаритов её элементов, расширение функциональных возможностей позволило создать УЧПУ на базе ЭВМ, встроив мощную вычислительную технику прямо в конструкцию станка и даже в систему функционирования технологических процессов производственных цехов. Новые системы УЧПУ *CNC*, *DNC*, *HNC* совместили функции управления

станком и решение почти всех задач подготовки управляющей программы.

*УЧПУ класса CNC* совмещают функции управления станком и решение отдельных задач подготовки управляющих программ на основе встроенных микроЭВМ, запрограммированных на выполнение функций числового программного управления. Особенность систем класса *CNC* заключается в возможности изменять и корректировать в период эксплуатации (а не только в период проектирования и изготовления системы) как управляющей программы изготовления детали, так и программы функционирования самой системы в целях максимального учёта особенностей используемого станка.

В запоминающее устройство системы *CNC* программа обработки может быть введена полностью отдельными кадрами — вручную с пульта УЧПУ. Эти системы позволяют достаточно просто выполнять в режиме диалога доработку, отладку программ и их редактирование, используя ручной ввод информации и вывод её на дисплей, а также получать отредактированную программу на магнитном диске, плёнке и других носителях.

*Системами класса DNC* можно управлять непосредственно по приводам от центральной ЭВМ, минуя считывающее устройство станка. Однако наличие ЭВМ не означает, что необходимость в УЧПУ у станков полностью отпадает. В одном из наиболее распространенных вариантов систем *DNC* каждый вид оборудования на участке сохраняет свои УЧПУ классов *NC*, *SNC*, *CNC*. Нормальным для такого участка является режим работы с управлением от ЭВМ, но в условиях временного выхода из строя ЭВМ такой участок сохраняет работоспособность, поскольку каждый вид оборудования может работать с помощью дискеты, подготовленной заранее на случай аварийной ситуации.

*Оперативные УЧПУ класса HNC* позволяют осуществлять ручной ввод программ в электронную память ЭВМ непосредственно прямо с её пульта. Программа, состоящая из достаточно большого числа кадров, легко набирается и исправляется с помощью клавиш

или переключателей на пульте УЧПУ. После отладки она фиксируется до окончания обработки партии одинаковых заготовок.

Современные УЧПУ класса *HNC* построены на базе лучших УЧПУ класса *CNC*, лишь формально отличаясь от последних отсутствием устройств для ввода управляющих программ с перфолент. Но УЧПУ класса *HNC* имеют входное устройство для подключения внешних устройств. Новейшие модели УЧПУ класса *HNC* имеют повышенный объём памяти встроенной микроЭВМ. Подобные устройства позволяют вести программирование с пульта УЧПУ в режиме диалога и при использовании большого архива стандартных подпрограмм, хранящихся в памяти встроенной микроЭВМ. Эти подпрограммы по команде с пульта вызываются на экран дисплея. На экране высвечиваются как схема обработки, так и текст с перечнем необходимых данных для ввода в УЧПУ по выбранной подпрограмме.

УЧПУ классов *CNC*, *DNC*, *HNC* обеспечивают также автоматический выбор инструмента из имеющихся в магазине станка инструментов, определяют режимы обработки выбранным инструментом для деталей из различных материалов, находят оптимальную последовательность операций. В общем случае такие системы позволяют вести подготовку управляющей программы непосредственно у станка по чертежу детали без каких-либо особых предварительных работ технологического характера. Ряд УЧПУ рассматриваемого класса позволяют вести программирование параллельно с работой станка по ранее отработанной и хранящейся в памяти УЧПУ программе, что исключает простои станков.

*По принципу управления движением, который реализуется системой ЧПУ в электроэрозионных станках, системы управления подразделяются на позиционные (индекс Ф2), контурные ЧПУ (индекс Ф3) и комбинированные, контурно-позиционные системы ЧПУ (индекс Ф4).*

Позиционные системы ЧПУ (индекс Ф2) обеспечивают поочерёдное перемещение рабочих органов станка по направляющим из одной позиции в другую согласно заданным в программе координатам позиций.

Контурные системы ЧПУ (индекс Ф3) предназначены для одновременного согласованного управления скоростями и направлениями движений по направляющим двух или нескольких рабочих органов станка. Благодаря такому управлению инструмент можно перемещать по криволинейной траектории относительно заготовки, что необходимо при обработке сложных фасонных поверхностей. При этом выдерживается постоянная по контуру скорость движения рабочего органа станка. Контурная скорость есть геометрическая сумма продольной и поперечной подач в каждой точке контура.

Комбинированные, контурно-позиционные системы ЧПУ (индекс Ф4) по своим технологическим возможностям аналогичны контурным системам. Используют эти системы с целью расширения технологических возможностей последних. Комбинированные системы позволяют оптимизировать работу всех систем станка: назначать оптимальную величину скорости подачи, скорость подвода и торможения электрода-инструмента, параметры импульсов, регулировать расход рабочей жидкости.

УЧПУ классов *CNC*, *DNC*, *HNC* относятся к устройствам с переменной структурой. Основные алгоритмы работы этих устройств задаются программно и могут изменяться для различных условий, что позволяет уменьшить число модификаций УЧПУ, ускорить их освоение, в том числе УЧПУ с адаптивными алгоритмами. УЧПУ этих классов имеют структуру ЭВМ и обладают характерными признаками вычислительной машины. Для работы УЧПУ должно быть соответствующим образом запрограммировано. Для этого подобные системы имеют специальное программно-математическое обеспечение, представляющее собой комплекс алгоритмов переработки информации, поступающей в виде управляющей программы. Математическое обеспечение может вводиться в систему через устройство ввода, как и основная управляющая программа. Тогда система ЧПУ относится к классу свободно программируемых. В иных случаях математическое обеспечение закладывается в постоянную память системы на стадии её изготовления. Однако во всех случаях существуют возможности для изменения, дополнения, обогащения этого математического

обеспечения, поэтому подобные УЧПУ обладают большой гибкостью и способностью к функциональному наращиванию.

Недостатки, свойственные управлению электроэрозионным процессом на основе открытой системы регулирования (см. рис. 2.27), устраняются в станках с ЧПУ использованием систем с адаптивным управлением режимом обработки.

*Адаптивное управление электроэрозионным станком.* Под адаптивной системой понимается такая система управления, которая, приспосабливаясь к изменившимся условиям обработки, поддерживает постоянными величины заданных выходных параметров (например, производительности электроэрозионного процесса). Адаптивные системы управления получили широкое применение в современных электроэрозионных станках. Они способствуют значительному повышению производительности обработки, улучшению качества обработанных поверхностей, снижению расхода электрода-инструмента. Схема адаптивного управления процессом электроэрозионной обработки, приведена на рисунке 2.29.

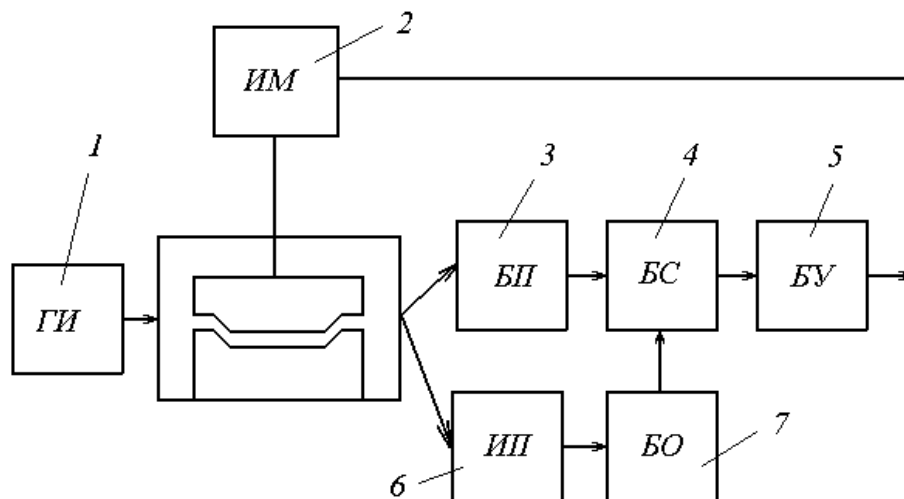


Рис. 2.29. Блок-схема адаптивного регулятора межэлектродного зазора: 1 — генератор импульсов; 2 — исполнительный механизм; 3 — блок преобразования; 4 — блок сравнения; 5 — блок усиления сигналов; 6 — измерительный преобразователь; 7 — блок оптимизации

В этой схеме сигнал от датчиков состояния межэлектродного промежутка подаётся не только на исполнительный механизм *ИМ*

через аналогичные для рассмотренной ранее схемы блок преобразования *БП*, блок сравнения *БС* и усилитель *БУ*, но и через измерительный преобразователь *ИП* на блок оптимизации *БО*, в котором учитывается реальное состояние МЭП и производится корректировка управляющего сигнала с учётом получения наилучшего выбранного критерия оптимизации процесса.

Далее сигнал идет на блок сравнения *БС* для изменения опорного сигнала. Корректировка опорного сигнала может осуществляться и в связи с изменением площади обработки. Тогда в блок сравнения вводятся данные на основе диаграммы  $P_v - I_{cp} - S$ .

Датчики состояния МЭП дают системе косвенные сигналы:

- по соотношению числа рабочих, холостых, короткозамкнутых и фиктивных импульсов;
- о температуре рабочей поверхности электродов;
- по величине напряжения пробоя, сопротивлению среды в паузе между импульсами;
- о средней силе тока в цепи электродов.

Рассмотрим один из примеров адаптации. Допустим, что в процессе работы ухудшились заданные условия работы МЭП из-за частых коротких замыканий. Адаптивная система стремится не допустить короткого замыкания и изменяет параметры обработки (например, средний рабочий ток), стимулирующие дугообразование за счёт уменьшения амплитуды тока или увеличения паузы между импульсами в сложившихся условиях. При установившемся режиме, когда диэлектрическая прочность МЭП высока, время паузы между импульсами уменьшается, а средний рабочий ток повышается, обеспечивая стабильность производительности электроэрозионного процесса.

Адаптивной системой управления оснащён, например, отечественный электроэрозионный копировально-прошивочный координатный станок 4Д722АФ3 особо высокой точности, имеющий также контурную систему числового программного управления ФЗ.

**По виду выполняемых работ** электроэрозионные станки подразделяют на копировально-прошивочные, прошивочные, электро-

эрозионные высокоскоростные прошивочные станки — супердрели, вырезные станки, станки для обработки турбинных лопаток, станки для выжигания сломанного инструмента. Отдельную группу представляют станки для электроконтактно-дуговой обработки, установки для упрочнения поверхностей и некоторые другие типы станков, предназначенных для выполнения специальных работ.

Типовая структура электроэрозионного станка представлена на

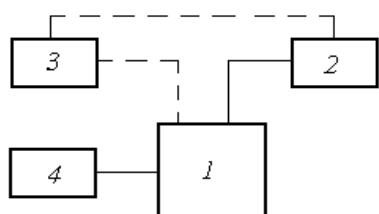


Рис. 2.30. Структура устройства электроэрозионного станка

рисунке 2.30. Станок включает: 1 — механическую часть, 2 — генератор импульсов; 3 — электрооборудование в виде электрошкафа или стойки; 4 — ёмкость для рабочей жидкости, которая комплектуется с насосом и устройством для очистки рабочей жидкости от продуктов обработки. В состав механической части электроэрозионного станка входят

рабочий стол, ванна для рабочей жидкости, устройство для закрепления и перемещения электрода-инструмента и заготовки, система управления работой станка.

Конструктивно станки для электроэрозионной обработки имеют характерные особенности, отличающие их от металлорежущих станков. Эти особенности определяются специфическими для данного метода обработки физическими основами удаления припуска. В частности:

а) при электроэрозионной обработке инструмент и узлы станка не испытывают силовых нагрузок, аналогичных усилиям резания в металлорежущих станках. Поэтому здесь в отличие от используемых в металлорежущем оборудовании электромеханических приводов большой мощности, для перемещения рабочих узлов станков используются приводы малой мощности. Электромеханические приводы на станках этой группы имеют также вспомогательные механизмы (привод насоса для подачи жидкости под давлением в МЭП; привод насоса для поддержания на заданной высоте уровня жидкости в ванне;

приводы подъёма и опускания ванны (инструментальной головки), вентиляции; установочных перемещений рабочих органов);

б) вследствие необходимости постоянно поддерживать определённый зазор между обрабатываемой поверхностью и электродом-инструментом все электроэрозионные станки имеют следящие системы регулирования и управления процессом, в частности, систему регулирования величины межэлектродного зазора;

в) для обеспечения работы электроэрозионных станков и создания импульсных воздействий на заготовку в структуре оборудования должен быть генератор импульсов. Генератор импульсов может быть как встроенным, так и выполненным в виде автономного блока;

г) процесс обработки осуществляется в жидкой среде, что требует применения соответствующих устройств (ванн, ёмкостей для жидкости, системы прокачки и устройств регенерации рабочей жидкости);

д) во время электроэрозионной обработки выделяются пары и газы, которые подлежат удалению при помощи обязательной для данной группы станков вытяжной вентиляции.

*Электроэрозионные копировально-прошивочные станки* обеспечивают получение требуемых формы и размеров отверстия (полости) в заготовке за счёт отображения в ней заранее изготовленного фасонного электрода-инструмента. При этом движение рабочей подачи на копировально-прошивочных станках осуществляется по одной координатной оси, которой является вертикальная ось станка  $Z$  (см. рис. 2.28). Все серийные станки обычно имеют вертикальную компоновку, что позволяет эффективно организовать удаление продуктов эрозии.

Кинематические цепи копировально-прошивочных станков предусматривают также возможность осуществления ряда вспомогательных перемещений. К их числу относят: перемещение электрода-инструмента или стола станка в горизонтальной плоскости в продольном и поперечном направлениях (оси  $X$  и  $Y$ ); установочное перемещение электрода-инструмента вдоль вертикальной оси  $Z$  в начальную



точку; вертикальное перемещение рабочей ванны станка; установочный поворот электрода-инструмента; осциллирующее движение электрода-инструмента с целью создания условий возникновения и прекращения рабочих электрических разрядов; движение быстрого отвода электрода-инструмента для установки и снятия заготовки.

Прошивочные станки с ручным управлением могут оснащаться контроллером — линейным датчиком на вертикальной оси Z. На станке предусмотрена индикация перемещения электрода-инструмента по этой оси, характеризующей глубину обработки. Она задается координатами и отслеживается контроллером. Контроллер позволяет программировать простейшие алгоритмы движения электрода по вертикали.

В качестве примера рассмотрим устройство и назначение типичного станка этой группы — электроэрозионного станка с ручным управлением модели Sure First ED-203. Внешний вид электроэрозионного станка Sure First ED-203 с указанием его основных узлов представлен на рисунке 2.30.

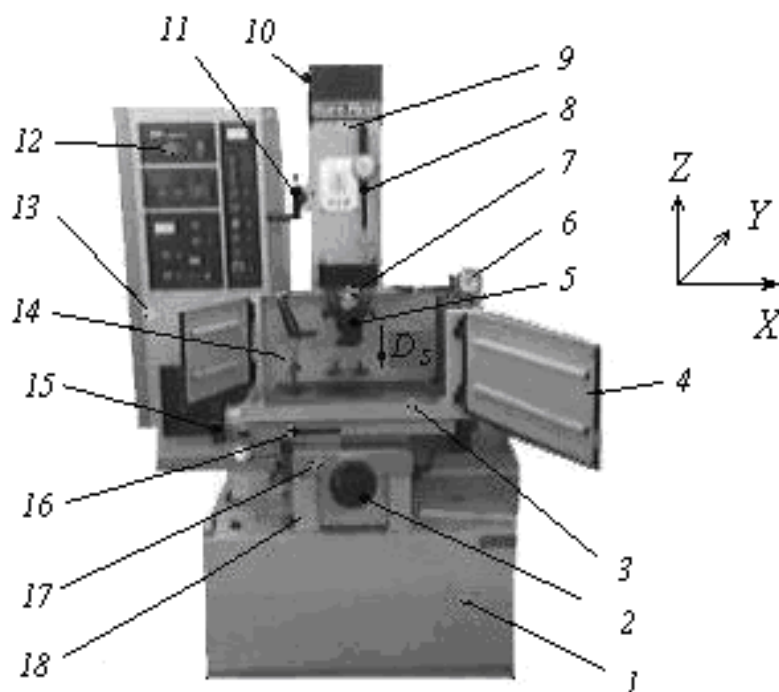


Рис. 2.31. Электроэрозионный станок модели Sure First ED-203

Электроэрозионный станок модели Sure First ED-203 предназначен для получения полостей и отверстий в заготовках массой до 300 кг с максимальными габаритными размерами 500 × 250 × 220 мм (длина, ширина, высота) из материалов, проводящих электрический ток. На данном станке имеется возможность широко варьировать режимы обработки и изменять полярности электродов, что позволяет осуществлять черновую обработку с производительностью съёма материала до 500 мм<sup>3</sup>/мин, и чистовую обработку, обеспечивающую 6–7-ой квалитеты точности и шероховатость поверхности *Ra* не ниже 1,25 мкм.

На станке можно выполнять такие операции, как:

- прорезание узких пазов шириной от 0,15 мм и более;
- координатное прошивание цилиндрических отверстий в труднообрабатываемых резанием материалах с обеспечением точности межосевого расстояния сопряжённых отверстий до 0,03–0,05 мм;
- получение отверстий относительно большого диаметра методом кольцевой прошивки;
- вырезание профильных заготовок из листового материала, разрезание пластинок из твёрдых сплавов;
- обработку сложных поверхностей штампов;
- нанесение изображений на клейма и другие изделия.

Станок устанавливается на фундамент основанием *1*, внутри которого расположен бак с диэлектрической жидкостью ёмкостью 260 литров. На основании станка смонтирована станина *18* с вертикальной колонной *10* и электрошкаф *13* с панелью управления *12*. На вертикальных направляющих колонны *10* установлена шпиндельная бабка *9*, передвигаемая по направляющим колонны вручную с помощью маховичка *11*. Внутри шпиндельной бабки расположена выдвижная пиноль *7*, имеющая возможность автоматического перемещения вверх и вниз с помощью кнопок пульта управления, расположенного на правой стороне шпиндельной бабки (на рисунке пульт не показан).

На торцовой части пиноли закреплён инструментальный патрон 5, служащий для установки электрода-инструмента. Устройство патрона, характеризующее особенности установки в нём электрода-инструмента, описано в разделе 2.4.2, а его внешний вид представлен на рисунке 2.14. Электрод-инструмент при обработке с помощью серводвигателя постоянного тока, размещённого в шпиндельной бабке, совершает движение вертикальной подачи  $D_s$ .

На верхних направляющих станины 18 расположены продольные 16 и поперечные 17 салазки. Салазки обеспечивают перемещение заготовки, закрепляемой на рабочем столе станка 3, с помощью маховичков 2 и 15 соответственно по взаимно перпендикулярным направлениям  $X$  и  $Y$ . Цена деления лимбов поперечного и продольного перемещения салазок равна 0,01 мм.

Рабочий стол 3, имеющий габаритные размеры 500 × 250 мм (длина, ширина), размещён в рабочей ванне 14 с открывающейся створкой 4. В ванну насосом закачивается диэлектрическая жидкость. Подача жидкости в ванну 14 осуществляется через штуцер, подсоединённый к гидравлической системе станка.

В ванне станка смонтировано устройство для регулирования уровня диэлектрической жидкости, который при обработке должен быть выше обрабатываемой поверхности заготовки на 30...50 мм. Установку уровня диэлектрика осуществляют при наладке станка, исходя из высоты системы «приспособление — заготовка». Давление подаваемой в ванну жидкости можно контролировать по манометру 6 и регулировать при помощи специального клапана. Для контроля температуры диэлектрической жидкости используется устройство, которое автоматически отключает питание станка при температуре 55 °С.

На станке Sure First ED-203 специальной следящей системой проводится сбор информации о состоянии рабочей зоны и на её основе осуществляется адаптивное управление электрическими и гидравлическими режимами работы станка с помощью сервопривода (следящего привода). Сервопривод станка Sure First ED-203 обеспечивает примерное постоянство в работе межэлектродного торцового зазора  $\delta_m$ , называемого управляемым параметром режима обработки. Величина

зазора существенно изменяется только в моменты периодического подъёма электрода-инструмента  $D_{всп}$  (см. рис. 2.2) на расстояния от 0,5 до 15 мм с последующим подводом его в рабочую позицию, что обеспечивает интенсификацию удаления из зоны обработки продуктов эрозии электродов.

Важнейшим элементом сервопривода станка Sure First ED-203 является серводвигатель постоянного тока, обеспечивающий прерывистое поступательное движение электрода-инструмента в направлении движения подачи  $D_s$  в момент, когда межэлектродный зазор  $\delta_m$  выйдет за пределы установленного оптимального диапазона его значений, определяемых режимом обработки.

Современные копировально-прошивочные станки оснащаются системами ЧПУ, магазином электродов, а в устройствах для перемещения рабочих узлов станков используются линейные приводы, позволяющие ускорить быстродействие при перемещении узлов и повысить точность их позиционирования, которая по данным производителей доведена до  $\pm 0,01$  мкм. При обработке на этих станках достигается шероховатость поверхности по параметру Ra до 0,06 мкм.

Станки отдельных фирм-изготовителей комплектуются устройствами автоматической смены инструментов роторного типа, позволяющих устанавливать до 24 электродов-инструментов разных форм и размеров или линейными устройствами магазинного типа, имеющими до 50 позиций установки электродов-инструментов. Для повышения производительности обработки некоторые модели копировально-прошивочных станков с ЧПУ оснащаются загрузочно-разгрузочными устройствами, обеспечивающими возможность автоматической смены приспособления (паллеты) с установленной в нём заготовкой после обработки для установки новой паллеты с заготовкой.

Технологические возможности копировально-прошивных станков значительно расширяются установкой на станки дополнительных устройств, позволяющих обеспечивать поворот заготовки, установленной на штатном столе станка (вокруг оси  $A$ ) и поворот инструмента вокруг оси шпинделя (ось  $Z$ ). Это предоставляет технологам

возможность решать технологические задачи, связанные с непрерывным или дискретным поворотом заготовки вокруг оси, перпендикулярной оси шпинделя. В то же время дополнительный поворот инструмента относительно оси  $Z$  позволяет устанавливать на шпиндель станка орбитальную головку и придавать инструменту-электроду сложное пространственное движение, необходимое для обработки заготовок по схеме, представленной на рисунке 2,4, к. Используя орбитальную головку, можно изготавливать поверхности вращения, поверхности сложного профиля, выполнять различные операции с использованием вращающегося дискового или цилиндрического электродов-инструментов.

Копировально-прошивочные станки с ЧПУ в основном работают по позиционной системе Ф2, что позволяет автоматически по заданной программе устанавливать (позиционировать) заготовку на столе станка относительно электрода-инструмента в необходимое положение с выверкой по осям  $X$  и  $Y$ . Обработку ведут профилированным инструментом. Во время обработки заготовка перемещений не имеет.

Современные электроэрозионные копировально-прошивочные станки оснащаются комбинированными системами ЧПУ (Ф4), обеспечивающими возможность выполнения контурной копировально-прошивочной обработки. Рабочие узлы станка получают возможность управляемых по координатам и режимам обработки перемещений одновременно по трём координатным осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . На рисунке 2.32 представлен внешний вид такого станка компании HEIDENHAIN (Германия) с системой ЧПУ HEIDENHAIN TNC-416, а рисунок 2.33 даёт представление о видах работ, которые можно выполнить на данном станке.

В современных универсальных копировально-прошивочных электроэрозионных станках используются системы программно-адаптивного управления ЧПУ. Эти системы позволяют осуществлять предварительный набор координат и режимов по управляющей программе и обеспечивать программно-адаптивное управление по трём осям.



Рис. 2.32. Электроэрозионный копировально-прошивочный станок с ЧПУ компании HEIDENHAIN

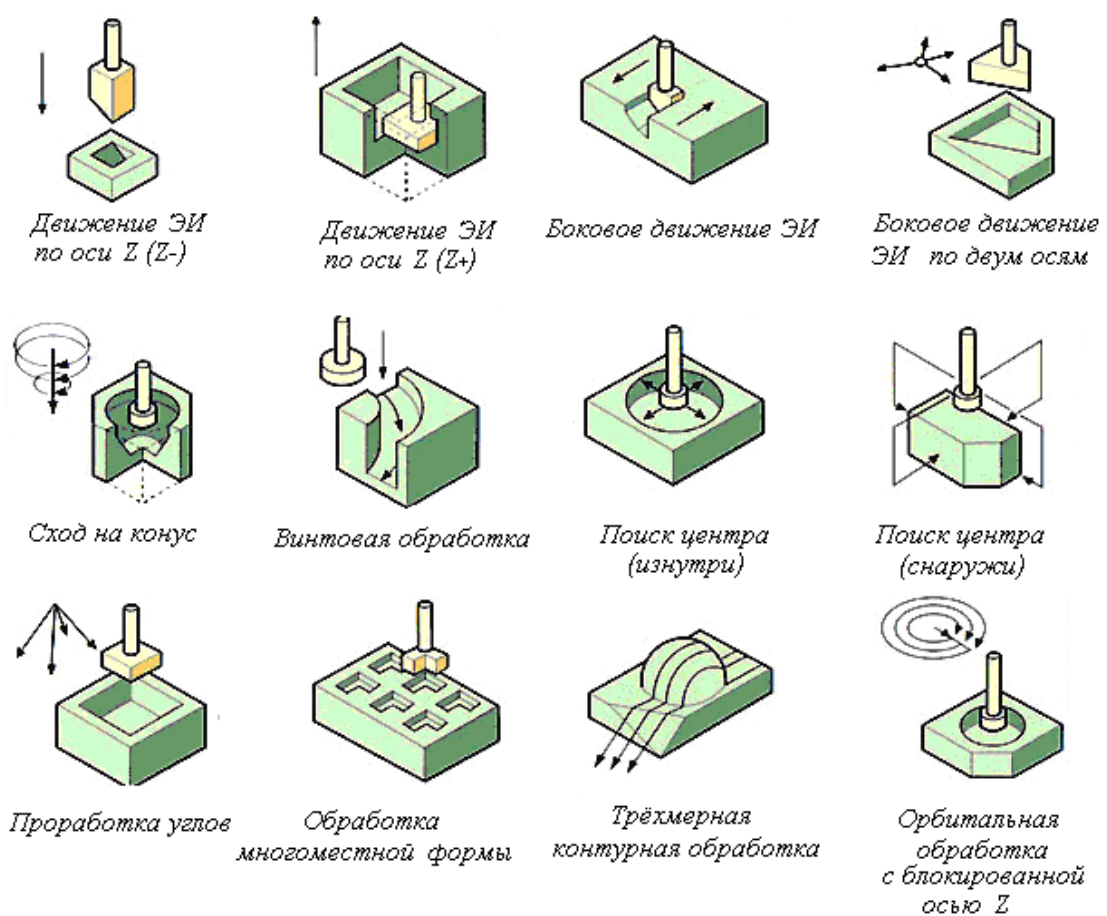


Рис. 2.33. Виды работ, выполняемые на копировально-прошивочном станке HEIDENHAIN TNC-416

*Электроэрозионные вырезные станки* предназначены для вырезания заготовок с заданным контуром из листового материала непрофилированным проволочным электродом-инструментом. Требуемый контур детали обеспечивается траекторией движения электрода относительно заготовки с учётом межэлектродного зазора.

Преимуществами электроэрозионных вырезных станков являются:

- отсутствие потребности изготавливать фасонные электроды-инструменты и специальные копиры для получения таких инструментов;
- отсутствие необходимости учитывать износ электрода-инструмента, так как обработка осуществляется при непрерывной перемотке проволочного электрода-инструмента с постоянным обновлением его участков в рабочем зазоре;
- возможность получения деталей сложной формы и особо малых размеров.

По способу создания диэлектрической среды станки подразделяют на погружные, имеющие ванны с рабочей жидкостью, в которую погружается заготовка, и струйные, обеспечивающие подачу рабочей жидкости в зону обработки струей через сопло, в центре которой располагается проволочный электрод-инструмент.

Основным материалом для изготовления электрода-проволоки являются латуни. Проволока из латуни имеет достаточные для обеспечения надёжности работы электропроводимость и прочность на растяжение (предел прочности 400–500 МПа). Мягкая проволока используется для резания под большими углами, где велик риск разрыва проволоки у направляющих. В практике электроэрозионного вырезания для изготовления проволочных электродов-инструментов находят применение и более прочные материалы. Проволока с пределом прочности на растяжение 900–1000 МПа используется для получения более точных размеров, так как на ней можно обеспечить большую силу натяжения. Для увеличения производительности обработки проволоку могут покрывать цинком и другими цинкосодержащими покрытиями.

Стандартный диаметр проволоки для работ общего назначения находится в диапазоне от 0,1 до 0,3 мм, допуск на диаметр составляет  $\pm 0,001$  мм. Для микрообработки, где применяются малые токи, используется проволока из чистой меди с диаметром 0,02–0,1 мм. Допуск на её диаметр доводят до  $\pm 0,5$  мкм.

Одним из важных параметров проволоки является её прямолинейность в свободном состоянии. При отсутствии прямолинейности и наличии сильной скрученности процесс автоматической заправки проволоки на станке может быть не стабилен. В смотанной на катушке проволоке накапливаются остаточные пластические деформации. С этим связан срок годности проволоки, составляющий примерно один год. Проволока используется в работе только один раз, так как при обработке она обгорает и теряет свою точность.

При установке на станок и при непосредственном процессе вырезания заготовки проволока проходит следующий путь: подающая катушка — ролики натяжения — верхний токоподвод — верхняя направляющая — заготовка — нижняя направляющая — нижний токоподвод — приёмные ролики. Пропустить проволоку через все устройства станка и исходное отверстие в заготовке можно вручную. Однако ручная установка проволоки удлиняет общее время обработки и делает необходимым присутствие оператора рядом со станком, так как в процессе обработки может произойти внезапный обрыв проволоки. На современных станках заправку проволоку осуществляют в автоматическом режиме. Процесс заправки проходит в струе воды, подающейся под высоким давлением вдоль оси тракта прохождения проволоки или в струе сжатого воздуха. Алгоритм работы устройства автоматической заправки предусматривает возможность неудачных попыток автозаправки. В этих случаях станок автоматически сматывает проволоку обратно на подающую катушку и повторяет весь процесс сначала.

Современные электроэрозионные вырезные станки обеспечивают выполнение контурной обработки по нескольким координатам (от двух до семи), оснащаются линейными приводами рабочих узлов и



системами ЧПУ, системой подготовки управляющей программы непосредственно с чертежа, разработанного в системе Autodesk AutoCAD.

В настоящее время на производстве используются электроэрозионные проволочно-вырезные станки с ручным управлением и станки с ЧПУ. Современные электроэрозионные вырезные станки выпускаются только с системами ЧПУ.

В качестве примера рассмотрим устройство электроэрозионного вырезного станка модели 4A731 с копиром и ручным управлением, внешний вид которого представлен на рисунке 2.34.

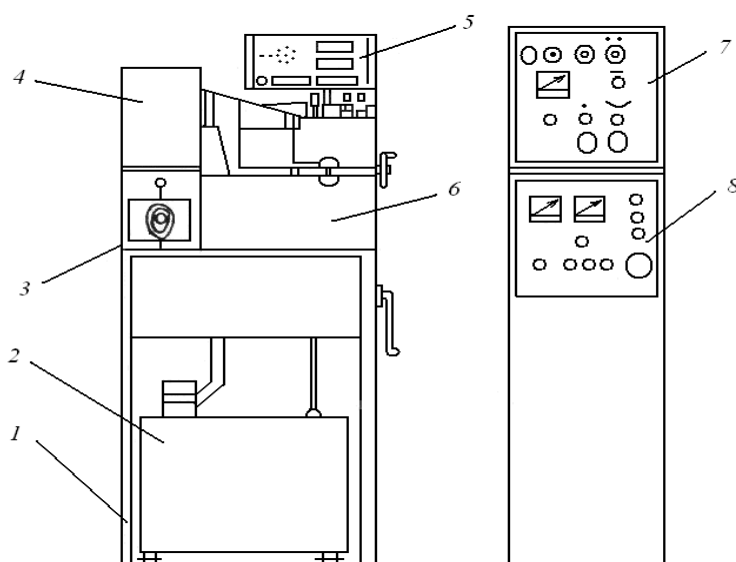


Рис. 2.34. Общий вид электроэрозионного вырезного станка с копиром модели 4A731

Станок состоит из станины 1, резервуара для рабочей жидкости 2, координатного стола 6 с приводами подачи 3 и 6, устройства 4 перемотки, натяжения и направления движения электрода-проволоки, системы управления координатными перемещениями 5 и генератора рабочих импульсов 7, 8.

На рис. 2.35 схематично представлен вид рабочей зоны этого станка. Вырезание заданного профиля на заготовке 9 осуществляется проволочным электродом-инструментом 7, который перематывается по скобе 5 с подающей 3 на приёмную катушку 2, приобретая нужное

направление с помощью направляющих роликов *11*. Обрабатываемая заготовка *9* закреплена на кронштейне *8*. Необходимые перемещения по координатам *X* и *Y*, обеспечивающие получение требуемого профиля детали, электрод-инструмент приобретает с помощью поперечной каретки *4*, перемещающейся по направляющей *1*, и продольной каретки *6*. Кроме того, на станке имеют место вертикальные установочные движения ванны *10* с рабочей диэлектрической жидкостью относительно заготовки *9*.

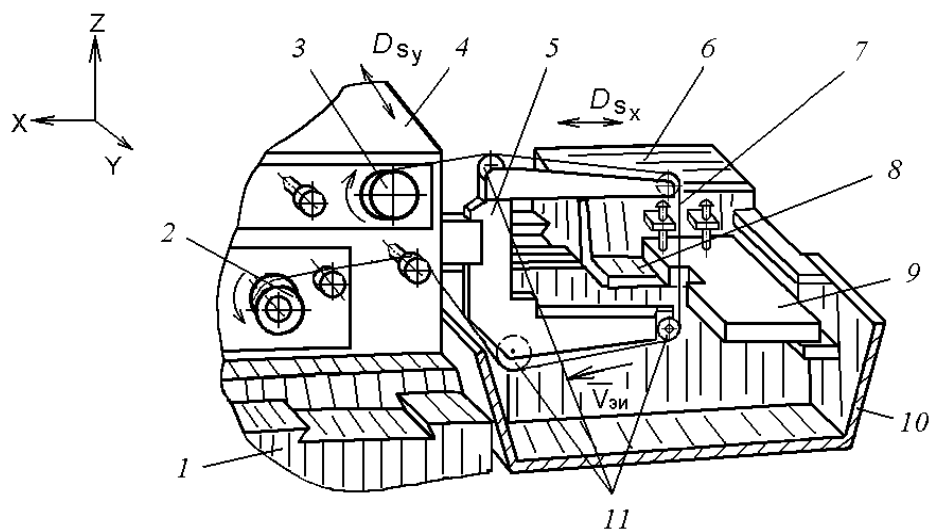


Рис. 2.35. Схема рабочей зоны станка модели 4A731

Станок может работать также по неподвижному копиру. Копирование в этом случае осуществляется с помощью электроконтактной копировальной системы, в которой электрод-проволока является одновременно шупом этой системы. Копир изготавливается из токопроводящего материала и устанавливается на заготовку через изолирующую прокладку. В системе имеется два регулятора — регулятор рабочей подачи и регулятор копировальной подачи. В регуляторе копировальной подачи осуществляется сравнение напряжения между копиром и электродом-инструментом с заданной величиной. Регулятор рабочей подачи изменяет скорость исполнительного двигателя в зависимости от напряжения на рабочем промежутке. При обходе заданного контура соответствующие движения по осям обеспечиваются попеременно регуляторами рабочей и копировальной подачи.

К разновидностям электроэрозионных вырезных станков относят фотокопировальные станки, на которых имеется столик для листа с эскизом выполняемой технологической операции и считывающее устройство с фотодатчиком. Перемещение электрода-инструмента осуществляется по командам фотодатчика, следящего за линией вырезаемого контура на технологическом эскизе. Размеры вырезаемой контурной заготовки по отношению к принятому на эскизе масштабу её изображения можно изменять.

Для универсальных вырезных станков, работающих электродом-проволокой, производительность, определяемая площадью бокового реза в единицу времени, колеблется от 18 мм<sup>2</sup>/мин до 40 мм<sup>2</sup>/мин при обработке стали и от 11 мм<sup>2</sup>/мин до 18 мм<sup>2</sup>/мин при обработке твёрдого сплава. Параметр шероховатости поверхности при этом  $Ra$  достигает 1,25 мкм, погрешность формы контура на сталях составляет 0,01 мм, а на твёрдых сплавах — 0,02 мм. В специальных и специализированных вырезных станках достигаются примерно такие же значения этих показателей.

Современные проволочно-вырезные станки работают по комбинированной системе ЧПУ (Ф4, Ф5). Программное управление станков этого типа обеспечивает не только регулирование движений формообразования, но и регулирование технологического режима — напряжения на МЭП. Системы ЧПУ обеспечивают управление положением электрода-инструмента относительно заготовки и его перемещениями по четырём и более (до восьми) координатным осям.

На рисунке 2.36 представлен электроэрозионный вырезной проволочный станок с ЧПУ с управлением по 7-и координатным осям. На этом же рисунке показаны координатные оси  $X, Y, Z, U, V, A, B$ , по которым могут осуществляться движения узлов станка. Эти движения представлены в виде стрелок и символов  $D$  с индексами, указывающими оси, по которым реализуется движения соответствующих узлов.

Движения  $D_x$  и  $D_y$  совершают колонна 2 и поперечные салазки 3 вместе со столом станка 1 в направлении координатных осей  $X$  и  $Y$ .

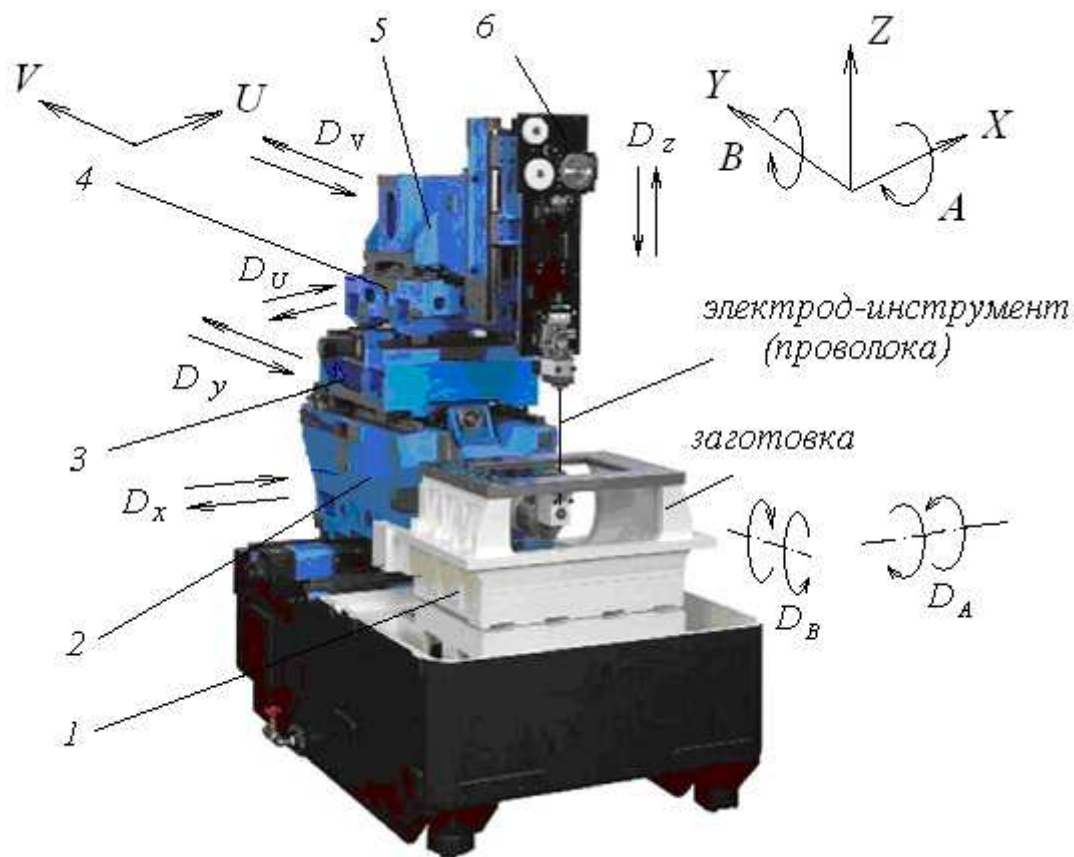


Рис. 2.36. Электроэрозионный проволочный вырезной станок

Движение  $D_z$  реализует пиноль 6 с закреплённой верхней головкой 7, в которую устанавливается электрод-инструмент (проволока).

Вспомогательные перемещения по координатным осям  $U$  и  $V$  (параллельным соответственно осям  $X$  и  $Y$ ) совершают верхние продольные 4 ( $D_u$ ) и верхние поперечные салазки 5 ( $D_v$ ) с закреплённой на них пинолью 6. Движения этих узлов станка в направлениях указанных координатных осей позволяет создать наклон проволоки, закреплённой в верхней и нижней головках 8, так как при их реализации нижняя головка остаётся неподвижной.

На станке предусматривается также установка дополнительных узлов, обеспечивающих столу станка вместе с заготовкой возможность осуществлять повороты вокруг осей  $A$  и  $B$ . Наличие поворота заготовки вокруг этих осей позволяет вырезать заданные уступы, пазы, сложные по профилю контуры на телах вращения или даже создавать тела вращения.

*Электроэрозионные высокоскоростные прошивочные станки типа «супердрель» (Super Drill).* Станки этого типа служат только для прошивки глубоких отверстий малого диаметра в диапазоне 0,05–6,5 мм глубиной до 300 диаметров в таких материалах, как твёрдые сплавы, закалённые и легированные стали, титан, карбидизированный вольфрам, высокопрочные композитные сплавы.

При прошивке отверстия сплошным инструментом-стержнем (проволокой) все его геометрические дефекты, такие как погрешность формы в поперечном и продольном сечениях, отклонение от прямолинейности оси, переносятся на заготовку в виде погрешностей формы и размеров получаемых отверстий. Недостатком данного вида обработки является также неэффективная эвакуация продуктов эрозии из зоны обработки. Поэтому глубина получаемых отверстий при таком методе обработки ограничена, а точность формообразования невысока.

Технология получения отверстия на электроэрозионных прошивочных станках типа «супердрель» заключается в электроэрозионной обработке вращающимся трубчатым электродом, через который прокачивается рабочая жидкость под большим давлением (до 7...10 МПа). В качестве рабочей жидкости на супердрелях используют негорючий диэлектрик на водяной основе, жидкие масла или дистиллированную воду.

Вращательное движение электрода-проволоки устраняет овальность получаемого отверстия, а применение трубчатых инструментов позволяет при использовании маловязких рабочих жидкостей эффективно удалить продукты эрозионного разрушения из глубоких отверстий. Производительность операции электроэрозионной прошивки может быть увеличена также за счёт орбитального движения электрода инструмента относительно оси обрабатываемого отверстия. При этом снижается конусность и появляется возможность регулирования размера отверстия в связи с изменением радиуса орбитального движения.

Использование вращающегося полого электрода-инструмента позволяет прошивать в заготовках наклонные отверстия с углом входа менее  $20^\circ$ . Точность входа электрода в обрабатываемую поверхность при этом обеспечивается направляющей кондукторной втулкой. При прошивании формируются отверстия с конусностью до 1,5 градусов на 100 мм длины и шероховатостью поверхности по параметру  $R_{\max}$  более 15 мкм.

По схеме и расположению узлов станки этого типа соответствуют прошивочным станкам. Внешний вид электроэрозионной супердрели с ручным управлением представлен на рисунке 2.37.

К основным отличительным конструктивным элементам станков типа «электроэрозионная супердрель» относят:

- наличие насоса высокого давления;

- наличие привода вращения шпинделя с закреплённым на нём электродом-инструментом, имеющем частоту вращения до 1000 об/мин;

- установку одного или двух люнетов для направления электрода;

- наличие на современных станках магазинов электродов, имеющих до 16 рабочих мест и обеспечивающих возможность автоматической смены электродов-инструментов по команде управляющей программы при длительной работе оборудования в автоматическом режиме.

Электроэрозионные супердрели оснащаются системами ЧПУ с одной или несколькими программируемыми осями. Такой осью на станках с одной программируемой осью является ось Z (серии станков



Рис.2.37. Электроэрозионная супердрель

типа ZNC). Перемещение заготовки по осям  $X$  и  $Y$  в таких случаях осуществляется вручную (см. рис. 2.37). При наличии программируемых осей  $B$  и  $C$  появляется возможность в автоматическом режиме прошивать отверстия на одной заготовке под разными углами. Электроэрозионные супердрели с одной, тремя и шестью управляемыми от ЧПУ осями выпускает тайваньская компания Max See.

Станки могут иметь встроенную систему автоматизированного программирования. Это позволяет вести работу на пульте управления над новой программой во время изготовления детали по другой программе. Для выбора эффективного режима обработки в этой системе задают материалы заготовки и электрода-инструмента, диаметр и величину износа электрода-инструмента.

### **2.6.2. Генераторы импульсов**

Чтобы осуществить процесс электроэрозионной обработки, необходимо в МЭП прерывисто (импульсно) подводить электрическую энергию. Импульсы электрической энергии заданной мощности должны следовать друг за другом с определённой частотой и интервалами.

Устройства, преобразующие переменный ток промышленной частоты и формирующие импульсы требуемых напряжения, длительности и частоты следования, называют генераторами импульсов.

Генераторы импульсов должны отвечать определённым требованиям: иметь высокий КПД, сохранять в процессе электроэрозионной обработки установленный режим, то есть быть стабильными в работе, и удовлетворять технологическим требованиям предварительной, получистовой и (или) чистовой обработки. Генераторы импульсов условно делят на две группы: генераторы с зависимым генерированием и с независимым генерированием импульсов.

К первой группе — зависимым генераторам, относят так называемые релаксационные генераторы импульсов. Параметры импульсов (амплитуда, частота, полярность, длительность импульсов) в таких генераторах зависят от состояния МЭП и параметров электрической

схемы нагрузочной цепи, так как накопление энергии происходит в реактивных элементах этой цепи, то есть в ёмкости или индуктивности. Все релаксационные генераторы содержат зарядную и разрядную цепи.

Основными достоинствами таких генераторов являются простота устройства и эксплуатации, невысокая стоимость. Недостатки зависимых генераторов состоят в невысоком КПД, малой производительности, ограниченной возможности регулирования режимов обработки и повышения мощности оборудования. Существенным их недостатком является и то, что работа релаксационных генераторов определяется физическим состоянием МЭП. В связи с этими их характеристиками в современном электроэрозионном оборудовании зависимые генераторы применения не находят.

Исторически первым генератором импульсов, созданным отечественными учёными – изобретателями метода электроискровой обработки Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, был релаксационный  $RC$ -генератор. На примере рассмотрения его схемы (рис. 2.38) познакомимся с принципом и особенностями работы генераторов импульсов этой группы.

Релаксационный генератор вырабатывает разрядный импульс в тот момент, когда накопленная конденсатором  $C$  энергия достаточна для того, чтобы пробить диэлектрическую среду межэлектродного промежутка  $МЭП$ . Генератор типа  $RC$  состоит из последовательно соединённых источника постоянного напряжения  $U$ , ключа  $K$ , токоограничивающего зарядного резистора  $R$  и накопительного конденсатора  $C$ , подключённого параллельно  $МЭП$ . Зарядную цепь образуют элементы  $U - R - C$ , а разрядную  $C - МЭП$ . Генератор работает следующим образом.

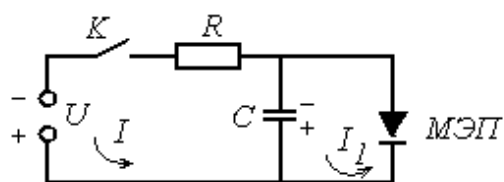


Рис. 2.38. Принципиальная схема релаксационного генератора импульсов типа  $RC$



В начальный момент конденсатор  $C$  не несёт заряда и напряжение на нём равно нулю. При замыкании ключа  $K$  в цепи  $U - R - C$  появляется зарядный ток  $I$ . Напряжение на конденсаторе (и на  $MЭП$  тоже) повышается, а когда оно достигает пробивного значения, то происходит пробой межэлектродного промежутка. В разрядной цепи  $C - MЭП$  потечёт ток  $I_1$ ; при этом энергия, равная  $CU^2/2$ , запасённая на конденсаторе, расходуется на электроэрозионный процесс. Вследствие того, что время заряда конденсатора больше, чем время разряда, напряжение на конденсаторе вскоре падает и разряд прекращается. Начинается новый процесс заряда и разряда. Весь процесс электроискровой обработки повторяется с частотой в пределах 2...5 кГц. Включением в зарядную цепь индуктивного элемента  $L$  удаётся ускорить процесс зарядки конденсатора и увеличить на нём напряжение. За счёт сокращения времени прохождения тока через резистор снижаются потери на его нагрев, поэтому КПД  $RLC$ -генераторов значительно выше.

Для нормального протекания процесса необходимо, чтобы время зарядки было больше периода деионизации  $MЭП$ , иначе возможен переход импульсного заряда в дуговой. Требуемое соотношение этих периодов цикла достигают подбором сопротивления резистора  $R$  и ёмкости конденсатора  $C$ . Именно поэтому считается, что режим работы релаксационного  $RC$ -генератора определяется состоянием межэлектродного промежутка.

В  $RC$ -генераторах значительная часть энергии теряется на нагрев резистора и другие потери. Поэтому КПД таких генераторов не превышает 25 %. Эти генераторы импульсов формируют импульсы малой длительности и небольшой мощности (до 5...7 кВт), то есть могут использоваться и использовались только для чистовой электроэрозионной обработки.

К релаксационным генераторам импульсов, используемым в электроэрозионном оборудовании, относятся *тиристорные генераторы коротких импульсов (ГКИ)*, типичным представителем которых является генератор ГКИ-300-200 А. Генератор применяется для питания

технологическим током электроэрозионных вырезных станков с использованием в качестве рабочей среды не только диэлектрических жидкостей, но также промышленной воды. Рабочие частоты генератора находятся в пределах 8–200 кГц при длительности импульсов от  $10^{-7}$  до  $10^{-6}$  с.

К независимым генераторам импульсов относят генераторы, в которых формирование импульсов не зависит от физического состояния МЭП. Такими качествами обладают машинные и полупроводниковые генераторы импульсов.

Машинные генераторы импульсов могут создавать импульсы значительной длительности, существенно увеличить производительность обработки на единицу мощности и уменьшить износ электродов-инструментов. Как правило, эти генераторы вырабатывают импульсы с частотой  $f_u = 400\text{--}2000$  Гц и длительностью  $\tau_u = 10^{-3}\dots 10^{-2}$  с.

Наиболее известны независимые машинные генераторы типа МГИ, например, МГИ -3, 4. Рабочая частота импульсов, создаваемая этими генераторами, постоянна либо регулируется в небольших пределах. МГИ применялись для станков, реализующих черновую электроискровую обработку. В настоящее время для оснащения электроэрозионных станков они не используются, так как имеют небольшой диапазон технологических возможностей регулирования режима обработки и создают много шума.

Полупроводниковый генератор импульсов (рис. 2.39) включает: транзисторный или тиристорный прибор  $K$ , работающий в открытом или закрытом режимах, накопительный конденсатор  $C$ , токоограничивающий разрядный резистор  $R_1$ , стабилизатор напряжения  $CT$ , диод  $D$ , резистор  $R_2$ , индуктивность  $L$  в цепи разряда и межэлектродный промежуток  $MЭП$ .

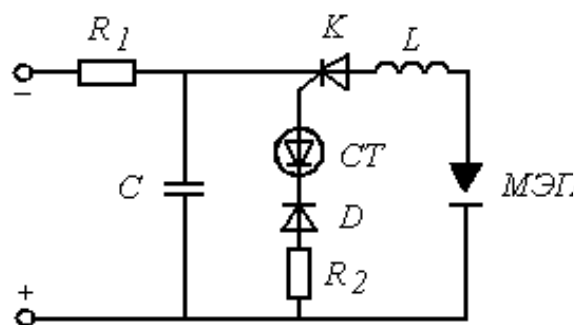


Рис. 2.39. Принципиальная схема полупроводникового генератора импульсов

Работает представленный на рисунке 2.39 генератор импульсов следующим образом. От источника постоянного тока конденсатор  $C$  заряжается через резистор  $R_1$ . Полупроводниковый ключ  $K$  в это время закрыт. Когда напряжение на конденсаторе достигает установленного значения, полупроводниковый ключ открывается (в данном случае — тиристор) и конденсатор разряжается на  $MЭП$ . Открытие ключа происходит в тот момент, когда напряжение на конденсаторе превысит напряжение стабилизации опорного диода  $CT$ . После разряда конденсатора  $C$  ключ  $K$  закрывается и вновь начинается заряд конденсатора при отключённом  $MЭП$ , то есть ток через  $MЭП$  не проходит. Далее процесс заряда и разряда конденсатора, открытия и закрытия тиристора повторяется.

В настоящее время большинство отечественных копировально-прошивочных и вырезных станков оснащены широкодиапазонными генераторами импульсов, относящимися к группе независимых импульсных генераторов. Широкодиапазонные генераторы обладают возможностью регулирования формы, максимального значения частоты и скважности импульсов тока и напряжения. Они вырабатывают импульсы с частотой 1...880 кГц и выходным током 16...180 А, то есть дают возможность работать на любых режимах электроэрозионной обработки. Широкодиапазонные генераторы импульсов (ШГИ) позволяют менять полярность электродов, что очень важно, так как можно переходить от черновой к чистовой обработке поверхности без смены станка и переустановки заготовки.

Генераторы серии ШГИ позволяют формировать силовые импульсы прямоугольной или близкой к ней формы. В отличие от генераторов других типов на их основе возможно получение импульсов гребёночной формы (см. рис. 2.7, в), что даёт возможность реализовать на станке малоизносные режимы обработки. В условиях действия гребёночных импульсов на поверхности электрода-инструмента образуется защитная плёнка, препятствующая разрушению материала электрода. Износ электрода-инструмента становится при этом минимальным.

Тип генератора ШГИ обозначается двумя цифрами: первая определяет верхний предел средней силы тока в импульсе (А), вторая —

максимальную частоту следования импульсов (кГц). Например, генератор ШГИ-40-440 имеет максимальную силу тока 40 А и максимальную частоту 440 кГц.

Электроэрозионное оборудование, изготавливаемое зарубежными производителями, оснащается генераторами импульсов оригинальных конструкций, различающимися электрическими схемами, элементной базой и алгоритмами работы. Генераторы создаются применительно к запланированным областям и видам работы проектируемых фирмами электроэрозионных станков. При изготовлении экспериментальных образцов оборудования фирмой-производителем в лаборатории проводится тестирование установленного образца генератора импульсов для определения основных зависимостей технико-экономических показателей работы от режимов обработки и нахождения оптимальных для заданных условий обработки параметров режима. Полученные экспериментальные данные записываются на управляющую программу и вводятся в долговременную память станка с ЧПУ.

При наладке станка на выполнение конкретной работы оператор в диалоговом режиме на пульте управления выбирает материал электрода-инструмента, согласованный с материалом заготовки, устанавливает значение площади поперечного сечения электрода (при прошивке) или высоту заготовки (при вырезке) и требуемую шероховатость обработанной поверхности. Режим обработки по этим введённым данным устанавливается автоматически. Также автоматически происходит учёт значений межэлектродного зазора для установки траектории движения электрода-инструмента или глубины формируемой полости. Вмешательство оператора в дополнительную наладку режима обработки требуется только в особо сложных случаях при изготовлении ответственных деталей.

Электроконтактно-дуговые станки генераторами импульсов не оснащаются. Для преобразования промышленного переменного тока в ток с параметрами, необходимыми для обработки, обычно используют различные модели выпрямительных и сварочных агрегатов.

### 3. ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В основе химических методов обработки лежит воздействие на обрабатываемую поверхность заготовки химически активных веществ. В результате протекающих химических обменных реакций происходит либо растворение поверхностного слоя в окружающей среде, либо осаждение вещества из среды на поверхность заготовки. Это обусловило возможность использования химических методов, во-первых, для поверхностного и глубинного травления заготовок и, во-вторых, для осаждения на обрабатываемую поверхность покрытий (плёнок).

#### 3.1. ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Химическим травлением называют удаление поверхностных слоёв заготовки в химически активных средах (травителях) в результате химических реакций. В промышленности травление получило широкое распространение при выполнении таких видов работ, как очистка поверхности заготовки от окалины (поверхностное травление), глубинное травление (в литературе встречается под названием «химическое фрезерование»), поверхностное травление рельефов на заготовках, химическое полирование.

##### **Химическое поверхностное травление**

*Химическое поверхностное травление с целью очистки заготовок от окалины.* При остывании отливок, поковок и проката, а также при термической и термомеханической обработке на поверхностях стальных заготовок образуется окалина, которая в дальнейшем должна быть удалена. Потери металла от образования окалины составляют 0,1...6 % массы заготовки и зависят от вида обработки или метода получения заготовки, среды, в которой производится обработка, а также от количества и режимов нагревов и охлаждений заготовки.

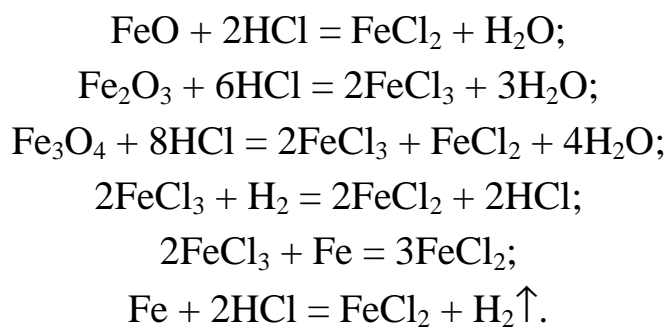
Внешний слой окалины состоит из высшего оксида железа  $Fe_2O_3$  (гематита), толщина его не превышает 10 % общей толщины слоя окалины. Этот слой по всей поверхности контакта плотно связан

со вторым слоем, представляющим собой оксид железа  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (магнетит). Толщина магнетита может достигать 40 % общей толщины окалина. Третий, внутренний слой наиболее значительный. Он состоит из оксидов переменного химического состава, близких к  $\text{FeO}$  (вюстит). В отличие от первых двух слоёв слой вюстита пористый и рыхлый, имеет заметное на глаз мелкокристаллическое строение.

Химическое поверхностное травление окалина может осуществляться в кислых (кислотное травление), в щелочных (щелочное травление) и в щёлочно-кислотных (щёлочнокислотное травление) средах.

*Кислотное травление* окалина производят в водных растворах серной, соляной, азотной кислот с добавлением некоторых солей. При травлении оксидный слой вступает в химические реакции с кислотами, в результате которых происходят его растворение и последующее растравливание поверхностного слоя основного металла.

При взаимодействии окисленного железа с разбавленными кислотами могут протекать различные реакции. Так, при взаимодействии с соляной кислотой идёт следующая группа реакций:



Скорость удаления оксидных плёнок невысока и зависит от физико-химических свойств слоя оксидов, его плотности, пористости, толщины, химического состава, свойств продуктов взаимодействия и характеристик травящего раствора.

Наряду с растворением оксидов при травлении заготовки в кислой среде протекают растравливание основного металла и его наводороживание, для уменьшения чего в раствор кислот вводят ингибиторы — вещества, замедляющие или прекращающие происходящие при растравливании химические реакции (например, для сталей —

азотнокислый натрий  $\text{NaNO}_3$ ). В процессе травления металла кислотность растворов уменьшается. В растворе накапливаются соли Fe, Cr, Ni и других элементов. В результате этого плотность раствора растёт, а его химическая активность снижается.

Травление заготовок осуществляют в специальных помещениях, оснащённых вентиляционными установками, обеспечивающими безопасный уровень концентрации паров кислот в производственных помещениях. Оборудование травильных отделений изготавливают из кислотостойких материалов или окрашивают его поверхности химически стойкими лакокрасочными материалами. Травильные ванны, как правило, делают из стали, в некоторых случаях — из железобетона, футерованного кислотоупорным кирпичом. Внутреннюю поверхность ванны покрывают резиновой или эбонитовой плёнкой с целью защиты ванны от коррозии, а затем её футеруют кислотоупорным кирпичом.

Кислотное травление имеет ряд недостатков, в том числе низкую скорость растворения оксидов, большие потери травимого металла в связи с сопутствующим растворением основного металла, его наводороживание, значительное испарение электролита с образованием в цехе «кислотного тумана», низкое качество очистки высоколегированных сталей и сплавов на основе титана и никеля.

*Щелочное травление.* Недостатки кислотного травления в значительной мере устраняются, если травление осуществлять в расплавах на основе щелочей. В щелочной среде удаление окалина происходит не на основе её растворения, а путём восстановления оксидов железа и легирующих элементов.

В качестве щёлочи наиболее часто применяют NaOH. При травлении стальных изделий оксиды железа реагируют с NaOH с восстановлением окалина до металлического состояния или с образованием легко растворимых в кислотных растворах ферритов и ферратов. Очистка от окалина в расплавах щелочей даёт значительный эффект при обработке высоколегированных и коррозионностойких сталей. В этом случае полностью исключено какое-либо воздействие расплава

на очищенную поверхность металла, что, в свою очередь, предотвращает потери металла при одновременном увеличении производительности процесса и улучшении качества очистки.

При работе с расплавленными щелочами необходимо строго соблюдать правила техники безопасности. При загрузке щёлочи на рабочих должны быть надеты специальная одежда, сапоги и резиновые перчатки; для защиты глаз следует пользоваться специальными очками. Особую опасность представляет попадание в расплав щёлочи воды, так как это приводит к взрыву расплава. Поэтому очищаемый материал нужно предварительно прогревать, а ванна должна быть всегда закрыта.

*Щёлочно-кислотный метод* используют преимущественно для удаления окалины с поверхности коррозионно-стойких, кислотоупорных, жаростойких, жаропрочных сталей, а также сплавов на основе никеля и титана. Сущность метода состоит в травлении заготовок в смеси расплава NaOH с окислителями (например,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) при температуре 400...600 °С. Окалина при этом частично отслаивается от стальной поверхности и оседает на дно ванны в виде шлама, а оставшаяся её часть «срывается» водяным паром, образующимся при следующем после травления погружении горячих заготовок в холодную воду. Остатки оксидного слоя легко удаляются в растворе кислоты.

*Химическое поверхностное травление при изготовлении печатных плат* получило широкое распространение в производстве электротехнических, радиотехнических, электронных устройств, приборов и ЭВМ. Травлением в этом случае получают нужный рисунок электрической схемы на токопроводящем слое поверхности заготовки. Обработке подвергают определённые участки медной фольги, которая в виде покрытия находится на диэлектрическом основании, изготовленном из таких листовых материалов, как гетинакс, текстолит, стеклотекстолит. Участки, не подвергаемые травлению, защищают маской — трафаретной краской или устойчивым к воздействию травителей гальванически нанесённым слоем оловянно-свинцового сплава.



Травление проводят в растворе хлорида меди или в железомедном хлоридном растворе набрызгиванием на плату электролита вращающимися лопастями ротора, а также методом струйного травления с подачей травителя на поверхность заготовки под большим давлением и распылением его через сопло. Время травления фольги толщиной 35 мкм составляет от 2 до 12 мин.

Этот метод травления используется также в приборостроении. С помощью поверхностного травления изготавливают детали из фольги с узкими сложными прорезями и перемычками. При этом обычно используют латунную фольгу (Л62) толщиной 0,05...0,1 мм. Травление проводят по технологии, аналогичной описанной выше и отличающейся от неё лишь тем, что защитную маску накладывают симметрично с обеих сторон фольги. Травление фольги осуществляют поочередно с обеих сторон. Одновременно производят и раскрой листа фольги с изготовлением нескольких малогабаритных деталей.

***Травление рабочих поверхностей быстрорежущего инструмента***, проводимое в целях повышения его стойкости, является ещё одним примером поверхностного химического травления. Используют этот метод в тех случаях, когда при неудачной заточке инструмента из-за перегрева его поверхностных слоёв происходит их вторичная термообработка, сопровождающаяся образованием мягкой структуры. Такой дефектный слой легко удаляется травлением. Для этого предварительно обезжиренный инструмент погружают на 10...15 минут в ванну с разбавленным раствором серной и азотной кислот и небольшим количеством медного купороса. После травления и последующей промывки инструмент нагревают до 50...160 °С для удаления водорода, вызывающего хрупкость инструментального материала.

Широко известна такая область применения поверхностного травления в кислотно-щелочных средах, как ***химическое травление с целью очистки поверхностей длинномерных труб*** из различных металлов и сплавов диаметром 30...100 мм, осуществляемое с полной автоматизацией процесса.

## Химическое глубинное травление

Метод химического глубинного травления заключается в удалении травителем металла с поверхности на большую глубину. Травящими средами при реализации данного технологического метода являются кислоты, щёлочи и растворы некоторых солей. Состав травильных сред зависит от химического состава материала заготовки.

Поверхности заготовки, которые не подлежат травлению, защищают маской-экраном. Экранирующая маска должна равномерно и плотно прилегать к поверхности заготовки, не подвергаться воздействию травителя, а после травления легко удаляться. В качестве защитных средств (масок) применяют накладные шаблоны из химически стойких материалов, окрашивание поверхности лаками и красками, химические и гальванические покрытия, светочувствительные эмульсии. Выбор защитного материала зависит от состава раствора, применяемого при химической глубинной обработке.

Метод химического глубинного травления используют как для удаления слоя металла с поверхности заготовки, так и для сквозного протравливания в целях получения в заготовке прорезей отверстий и полостей различной конфигурации. Для повышения производительности и снижения расхода травителя травлению подвергают не весь объём удаляемого материала, а лишь узкую полоску по контуру получаемой прорези (отверстия, полости). Например, при травлении сквозного цилиндрического отверстия травлению подвергают узкую кольцевую канавку, больший диаметр которой после травления должен соответствовать диаметру получаемого отверстия. Остальные участки заготовки покрывают химически стойким материалом. Для выполнения травления заготовку погружают в ванну с травителем. Растворение металла по кольцевой канавке происходит до тех пор, пока не образуется сплошное отверстие. Металл, находящийся внутри формируемого контура, как бы вырезается и падает в травильный раствор.

Глубинному химическому травлению подвергают многие металлы и сплавы на их основе, в том числе алюминий, магний, медь,

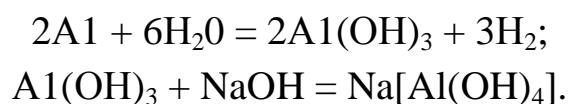
коррозионно-стойкую сталь, титан, молибден, цирконий. Скорость травления металла варьируется в пределах 0,6...1,0 мм/час в зависимости от температуры на границе раздела «металл — травитель», от сложности конфигурации заготовки, неоднородности состава обрабатываемого металла, его свойств и толщины.

При стабилизированном по составу травителе получаемая шероховатость поверхности соответствует параметру  $Ra = 5...10$  мкм, а по некоторым данным может быть снижена и до 0,5 мкм. Точность выполнения размеров зависит прежде всего от температуры на участках травления, так как с повышением температуры увеличивается скорость протекания химических реакций. Основной причиной появления погрешностей является неоднородный отвод теплоты, выделяющейся при травлении, на различных участках заготовки. В местах увеличенной толщины металла отвод тепла в заготовку больше, чем в местах расположения её тонких элементов. Такие места травятся быстрее. Скорость травления на локальных участках может снижаться скоплением пузырьков водорода, препятствующих контакту травителя с металлом. Чтобы уменьшить вероятность образования такого явления, травимую поверхность рекомендуется располагать горизонтально.

Глубинное травление может вызвать некоторое понижение прочности металла при последующей работе изготовленной детали с переменными нагрузками. Это связано с тем, что в результате травления на поверхности заготовки образуются микронеровности, являющиеся концентраторами напряжений, происходит вытравливание металла по границам зёрен, увеличивается шероховатость поверхности, а также обрабатываемая поверхность заготовки насыщается водородом.

Химическое глубинное травление сплавов алюминия имеет некоторые особенности. Травление алюминиевых сплавов ведут преимущественно в щелочных растворах, позволяющих вначале растворять оксидную плёнку на поверхности металла, а затем основной металл в соответствии с реакциями:





### Химическое полирование

Химическое полирование осуществляют чаще всего в растворах кислот  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . Этот метод применяют при обработке заготовок из алюминия, меди и их сплавов, цинка, кадмия, серебра, никеля, стали, редких металлов и их сплавов. Например, химическое полирование деталей из нержавеющей стали марки X18H9T выполняют в растворе следующего состава: 40 см<sup>3</sup> азотной кислоты, 70 см<sup>3</sup> соляной кислоты, 230 см<sup>3</sup> серной кислоты, 10 г/л столярного клея, 6 г/л хлористого натрия, 6 г/л красителя кислотного чёрного. Процесс проводят при следующем режиме работы: рабочая температура 65–70 °С, выдержка 5–30 мин.

Химическое полирование позволяет получить поверхность без признаков травления основного металла с шероховатостью  $Ra \geq 0,025$  мкм. При химическом полировании удаление металла происходит преимущественно с выступов микропрофиля обрабатываемой поверхности. Основным механизмом, обеспечивающим неравномерность съёма металлов на выступах и во впадинах микропрофиля, является образование во впадинах пассивирующей оксидной плёнки и вязкой плёнки из продуктов растворения, препятствующих протеканию химических реакций.

Преимущества химического полирования перед другими методами аналогичного назначения состоят в том, что при достаточно высокой производительности метода и возможности полирования заготовок сложной конфигурации и любых размеров отпадает необходимость в использовании источника постоянного тока и в изготовлении приспособлений, обеспечивающих точное расположение заготовок. К недостаткам этого метода относят: сравнительно небольшой срок службы электролита, трудность его корректировки и регенерации, интенсивное выделение в процессе полирования вредных газов, низкую отражательную способность химически полированных поверхностей по сравнению с поверхностями, полированными электрохимическим

методом, растравливание межзёренных границ в структуре поверхностного слоя металла. Последнее исключает применение этого метода для деталей, работающих со знакопеременными нагрузками.

### 3.2. ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

К химико-механическим методам обработки заготовок относят химико-механическое шлифование, химико-механическое полирование и некоторые другие комбинированные методы обработки, основанные на одновременном воздействии на заготовку химического и механического (метода резания) энергетических воздействий.

Основу этих методов составляют процессы образования на поверхности заготовки оксидной плёнки под влиянием окружающей среды или специальной химически активной среды (газа, жидкости, пасты) и последующее удаление этой плёнки механическим способом. Так, при химико-механическом шлифовании удаление оксидной плёнки с поверхности заготовки осуществляют абразивными кругами.

Наибольшее распространение среди технологических методов обработки этой группы получило *химико-механическое полирование с помощью притирочных паст*. Целью полирования заготовок этим методом является достижение минимально возможной высоты микронеровностей обработанной поверхности, находящейся по параметру  $Ra$  в пределах 0,02...0,04 мкм, при сохранении достигнутой на предыдущих операциях точности размеров и формы заготовки.

В процессе химико-механического полирования заготовка подвергается одновременно химическому и механическому воздействиям. Обработку осуществляют при относительном перемещении заготовки и инструмента — полировальника. В качестве полировальника могут быть использованы эластичные круги (фетровые, войлочные, текстильные), щётки с ворсом из различных материалов, абразивные ленты, кожа в совокупности с абразивной суспензией. На полировальник наносят полировальную пасту, в состав которой входят

поверхностно-активные вещества, абразив в виде микропорошка и связующие материалы.

Поверхностно-активными веществами называют вещества, способствующие снижению поверхностной энергии заготовки. В качестве таковых при электромеханическом полировании используют стеариновую и олеиновую кислоты. Состав пасты определяет вид химических реакций на полируемой поверхности и скорость удаления припуска.

Стеариновая и олеиновые кислоты, входящие в состав пасты, адсорбируясь на поверхности заготовки, покрытой тонкой оксидной плёнкой, образуют на ней моно– или многорядный слой своих электрически заряженных молекул. Молекулы кислот уменьшают поверхностную энергию заготовки и тем самым снижают работу, необходимую для удаления оксидной плёнки с обрабатываемой поверхности.

При относительном перемещении полировальника и заготовки сначала истираются плёнки на выступах неровностей обрабатываемой поверхности. В результате истирания на выступах образуются ювенильные площадки (площадки, не имеющие плёнок и потому химически активные). Поверхности ювенильных площадок вступают в химические реакции с реагентами, входящими в состав пасты, и вновь быстро покрываются плёнками сульфидных, фосфатных соединений либо плёнками поверхностно-активных веществ. Эти плёнки вновь легко удаляются полировальником. Циклы образования плёнок на выступах и их удаления полировальником повторяются. Во впадинах микропрофиля плёнки сохраняются и защищают поверхность впадин от дальнейшего окисления.

Процесс продолжают до тех пор, пока все микронеровности постепенно не будут сглажены. В результате создаётся поверхность с высотой микронеровностей в сотые доли микрометра. Особо малые микронеровности образуются в тех случаях, когда химически активная среда и полировальник не содержат абразивных зёрен, а потому удаление химических плёнок не сопровождается образованием царапин. Полученные таким образом поверхности обладают повышенной

прочностью, высокой химической устойчивостью, лучшим сопротивлением изнашиванию и высокой отражательной способностью.

Для химико-механического полирования разработаны абразивные пасты. В большинстве своём они представляют смесь абразивов с какими-либо связующими материалами, состоящими из органических веществ.

Наибольшее распространение в промышленности получили пасты ГОИ (разработаны в Государственном оптическом институте для полирования оптических линз и металлических зеркал), содержащие в качестве абразивного материала оксид хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , активные и связующие вещества. Они выпускаются в виде доводочных (прессованных в тубиках), притирочных (мазеобразных) и полировочных (литых в брусках) паст. Благодаря введению в их состав поверхностно-активных веществ — серы, стеарина, олеиновой кислоты и силикагеля, а также благодаря особой технологии изготовления, пасты ГОИ обладают уникальными свойствами, отличающими их от всех других полирующих составов. Указанные свойства заключаются в сочетании высокой производительности паст со способностью создавать предельно малые шероховатости поверхности. Достижение шероховатости поверхности с параметром  $Ra = 0,02...0,032$  мкм происходит, как правило, уже после обработки заготовки пастой со значительным размером абразивных зёрен (пастами для черновой обработки). Тонкими сортами паст можно получить поверхность с параметром шероховатости  $Ra = 0,008...0,016$  мкм.

Для приготовления паст помимо оксида хрома применяют и некоторые другие природные и искусственные материалы. К ним относят оксиды олова, железа (крокус), алюминия, цинка, бериллия. На основе этих материалов созданы разнообразные по назначению составы паст.

В технологиях химико-механического полирования, помимо паст, значительную роль играют полировальники. Точность и шероховатость поверхности полировальника определяют точность и шероховатость обработанной им поверхности заготовки. Полировальники

должны быть жёсткими и износостойкими, их материал должен отличаться однородностью состава, структуры и твёрдости. В зависимости от качества полировальника производительность процесса может значительно меняться в ту или в другую сторону.

### **3.3. ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ**

Покрытие — это слой материала, создаваемый на поверхности заготовки и придающий ей определённые, отличные от основного материала свойства. Нанесение покрытий является одной из основных технологий, направленных на защиту детали от коррозии и получения новых функциональных свойств, таких как повышенная поверхностная твёрдость, износостойкость, антифрикционная способность. В зависимости от функциональных свойств покрытия подразделяют на защитные, декоративные и специальные. Поверхность, на которую наносится покрытие, принято называть *основой*. Группа технологических методов нанесения покрытий включает физические, химические и электрохимические методы.

Химические методы получения покрытий реализуются без наложения на среду, в которой ведётся обработка, электрического тока путём осаждения металла из водных растворов или из газовой среды (фазы). Покрытия такого типа известны в литературе как химические покрытия.

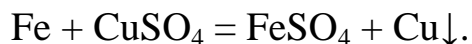
Непосредственному нанесению химического покрытия на поверхность заготовки должна предшествовать подготовка поверхности к выполнению этой операции. Особенности технологии подготовки поверхности к покрытию, последующей дополнительной обработки покрытия и контроля качества его нанесения рассмотрены в разделе 6.3.

#### **3.3.1. Химические методы нанесения покрытий из водных растворов**

Существуют несколько способов химического осаждения металлов из водных растворов: контактный; контактно-химический; метод химического восстановления (химическая металлизация).



*Контактный способ* основан на вытеснении ионов осаждаемого металла из раствора более активным металлом. Примером реализации данного способа может быть реакция меднения железного гвоздя, помещённого в раствор сульфата меди.



*Контактно-химический способ* осаждения металлов заключается в создании гальванической пары между металлом основы и более активным металлом. Так, при осаждении серебра на медную основу создают гальваническую пару с помощью более активного металла алюминия или магния. В этом случае более активный металл отдаёт свои электроны меди, и на отрицательно заряженной медной поверхности ионы  $\text{Ag}^+$  восстанавливаются до металла.

*Метод химического восстановления* (химическая металлизация) заключается в том, что металлические покрытия получают в результате восстановления ионов металла из водных растворов, содержащих восстановитель.

Химические методы нанесения металлических покрытий при своей сравнительной простоте обеспечивают высокую прочность сцепления металлического слоя с основой (до 2 МПа), равномерную толщину слоя и его высокую электропроводность. Эти методы позволяют получать равномерные покрытия на деталях сложной конфигурации, причём не только на внешних, но и на внутренних поверхностях.

***Химическая металлизация*** — нанесение покрытия из металла на поверхность заготовки методом его химического осаждения. Химическую металлизацию можно осуществлять как на металлах, так и на неметаллических материалах, например, пластмассах.

*Химический метод получения металлических покрытий на металлах* основан на восстановлении ионов осаждаемого металла из раствора в результате взаимодействия его с восстанавливающим веществом (восстановителем), находящимся в растворе. Восстановитель, окисляясь, отдаёт свои электроны имеющимся в растворе ионам металла, которые превращаются в атомы и осаждаются на обрабаты-

ваемой поверхности в виде металлической плёнки. Реакция восстановления интенсивно протекает на металлической поверхности покрываемой заготовки, являющейся каталитической для данного процесса.

В настоящее время разработаны способы получения покрытий химическим восстановлением более 20-и различных металлов. Этим же методом получают покрытия бинарными и тройными сплавами, например, сплавами Ni – P, Ni – B, Ni – Mo – B, Ni – Co – P. В промышленности широкое распространение получили химическое никелирование и химическое омеднение поверхностей заготовок.

Основу химического никелирования составляет восстановление ионов никеля из водных растворов и осаждение их в виде атомов на поверхности заготовки. Этим методом можно покрывать наружные поверхности заготовок сложной формы и внутренние поверхности, недоступные для нанесения покрытия другими методами. Никелевое покрытие с успехом применяют для защиты от коррозии энергетического оборудования, работающего при температуре 600–650 °С в газовой среде, для покрытия магниевых и титановых деталей вертолетных роторов, а также алюминиевых зеркал, используемых на спутниках в условиях космоса. Оно применяется также для защиты от коррозии хирургических инструментов и деталей часов.

Химическое меднение. Восстановление ионов  $\text{Cu}^{2+}$  из раствора, содержащего соли меди, формальдегидом (в виде гидрата метиленгликоля  $\text{НСНО} + \text{H}_2\text{O} \text{СН}_2(\text{ОН})_2$ ) с целью получения медных зеркал на стекле известно с конца XIX века. Широкое распространение этот процесс получил для изготовления простых и многослойных печатных схем, при металлизации пластмасс, изготовлении медных зеркал и для других целей.

*Металлические покрытия на пластмассах* как бы облагораживают изделия, упрочняют, делают их более стойкими к тепловым, световым, радиационным, механическим и другим воздействиям. Свойства металлизированных пластмассовых изделий, на которых

основано столь широкое их применение, в значительной степени зависят от способа нанесения металлического покрытия.

Широко известен, например, метод химического омеднения пластмасс при изготовлении печатных плат. Восстановление меди на поверхности пластмассовой печатной платы производят из раствора, содержащего соли меди, никеля, а также формалин, соду и другие химикаты. Длительность осаждения слоя меди толщиной 0,25...0,5 мкм составляет 15...20 мин. Для удаления водорода, выделяющегося в процессе омеднения, и для лучшего смачивания обрабатываемых поверхностей раствором, процесс проводят с плавным покачиванием плат или с наложением на технологическую систему ультразвуковых колебаний.

*Химическое оксидирование.* Оксидированием называют нанесение оксидных покрытий на металлы химическим и электрохимическим методами<sup>2</sup>. Химические оксидные плёнки образуются при обработке металлов в растворах, содержащих окислители, которые способны генерировать на поверхности кислород, вступающий во взаимодействие с металлом.

Широко известны в промышленности технологии оксидирования углеродистых и низколегированных сталей и чугунов, получившие название «воронение». На поверхностях изделий, изготовленных из этих материалов, методом воронения создают пористые плёнки окислов железа ( $Fe_3O_4$  и других) толщиной 1...10 мкм. Воронение применяют преимущественно для декоративной отделки поверхности путём придания ей определённого цвета. Цвет формирующейся плёнки определяется толщиной покрытия и последовательно меняется с увеличением толщины от жёлтого к бурому, вишнёвому, фиолетовому, синему и серому.

Прочные оксидные плёнки получают также на меди и её сплавах. Подвергаются химическому оксидированию и магниевые сплавы. Толщина оксидных плёнок составляет от 2 до 5 мкм, предельная

---

<sup>2</sup> Сведения по электрохимическому оксидированию приведены в разделе 6 данного учебного пособия.

эксплуатационная температура таких плёнок находится в пределах 200...250 °С.

**Фосфатирование.** Фосфатированием называют метод нанесения на аноде (заготовке) покрытия, состоящего из мелкокристаллического слоя смешанных фосфатов железа, цинка или марганца.

Фосфатирование в основном используют для образования на чёрных металлах (низкоуглеродистые и углеродистые стали, чугун) трудно растворимой фосфатной плёнки типа  $Me_3(PO_4)_n$ , где обозначение «Me» соответствует металлу основы, на которую наносится покрытие. Цветные металлы подвергают фосфатированию реже, чем чёрные.

Фосфатирование может быть химическим и электрохимическим. Осуществляется этот процесс в водных растворах препаратов, известных под названием МАЖЕФ (марганец, железо, фосфор), основу которых составляют однозамещённые соли ортофосфорной кислоты ( $H_3PO_4$ ) марганца, железа ( $MnHPO_4$ ,  $Fe(H_2PO_4)_2$ ,  $Mn(H_2PO_4)_2$ ).

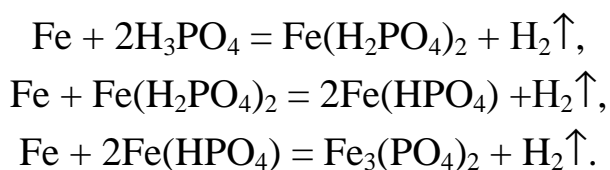
Водный раствор солей подвергается гидролизу



При нагревании до температуры кипения гидролиз идет дальше



Как известно, при взаимодействии железа с фосфорной кислотой образуются одно-, двух- и трёхзамещённые фосфаты и выделяется водород:



Параллельно может идти диссоциация



Однозамещённые фосфаты хорошо растворимы в воде, двухзамещённые трудно растворяются, а трёхзамещённые практически не растворяются. Последние два соединения и являются основой фосфатной пленки, формирующейся на поверхности обрабатываемых изделий.

Толщина фосфатного покрытия обычно составляет 10...12 мкм, но в некоторых случаях создают покрытия толщиной в несколько десятков микрометров. Фосфатная плёнка не боится органических масел, смазочных, горячих материалов, толуола, бензола, всех газов, кроме сероводорода. Она имеет более высокую коррозионную стойкость, чем оксидная плёнка. Поэтому фосфатные покрытия применяют для защиты поверхностей от атмосферной коррозии. Этот вид покрытия используется также для грунтования поверхности перед нанесением лакокрасочных материалов, уменьшения трения при выполнении операций волочения и накатки резьбы, изоляции участков стальных поверхностей перед кужением, свинцеванием, цинкованием; для электроизоляции пластин трансформаторов, роторов и статоров.

**Хроматирование** — метод химического нанесения тонкоплёночного покрытия из хроматов (солей хромовой кислоты  $H_2CrO_4$ ) на поверхностях заготовок из сталей, цинка, кадмия, магния, алюминия и их сплавов. В процессе хроматирования на поверхности данных металлов образуются пассивные плёнки толщиной менее 1 мкм, состоящие из солей трудно растворимых хроматов ( $Fe_2(CrO_4)_3$ ,  $ZnCrO_4$ ,  $CdCrO_4$ ,  $MgCrO_4$ ,  $Al_2(CrO_4)_3$ ) зелёного, жёлтого, чёрного или бледно-голубого цветов, которые заметно улучшают коррозионную стойкость детали. Хроматирование широко применяют для покрытия оцинкованной стали с целью защитить её от образования белой ржавчины во время транспортировки и хранения.

Химическое хроматирование проводят, используя водный раствор хромовой кислоты или хромата, часто содержащий другие добавки, например, фосфорную и соляную кислоты.

### **3.3.2. Химические методы нанесения покрытий из газовой фазы**

Сущность процессов химического осаждения из газовой фазы или, как это принято в зарубежной литературе, *CVD процессов*<sup>3</sup> состоит в получении веществ в твёрдом состоянии за счёт химических

---

<sup>3</sup> Аббревиатура CVD означает Chemical Vapor Deposition (химическое осаждение из паровой фазы).

превращений реагентов, одновременно подаваемых в реакционный объём в газообразном или плазменном состоянии. В результате протекания процесса химического осаждения твёрдое вещество может получаться однофазным или многофазным (композиционные материалы, состоящие из смеси кристаллических или аморфных фаз).

На практике процессы химического осаждения из газовой фазы осуществляют в проточной системе, то есть когда реагенты вместе с газом-носителем и газом-разбавителем непрерывно продуваются через реакционный объём (реактор), куда помещаются подложки (или иные объекты), на которые планируется осаждать покрытие. Схематично CVD процесс может быть проиллюстрирован рисунком 3.1.

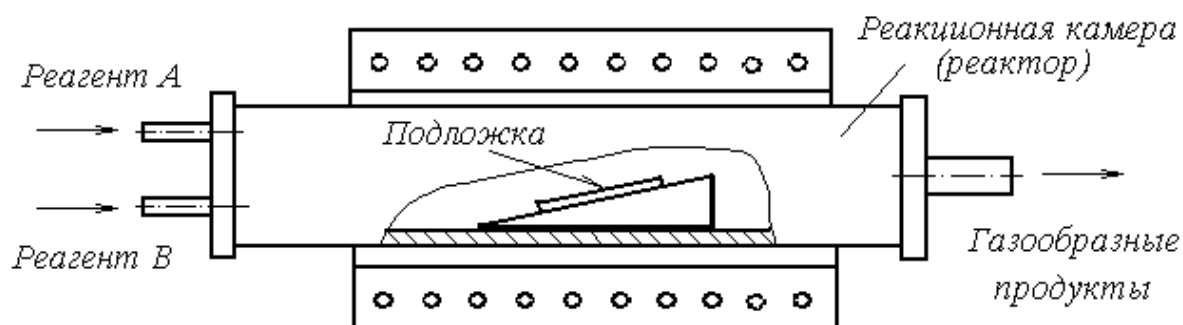


Рис. 3.1. Схематическое изображение CVD процесса [1]

Этим методом выращивают монокристаллы и получают тонкие плёнки металлов, диэлектриков и полупроводников. В настоящее время CVD процессы применяют в машиностроении для формирования износостойких, упрочняющих и антикоррозионных покрытий на деталях, в оптической промышленности для создания отражающих и интерференционных покрытий, в химической промышленности для получения пигментов и катализаторов, в медицине для осаждения покрытий с улучшенной биосовместимостью и во многих других областях современной промышленности.

В зависимости от способа подвода энергии к реактору CVD процессы подразделяют на три основные группы:

- термоактивируемые;
- плазмохимические;

— фотохимические.

В случае термоактивируемых процессов, которые в литературе называют просто CVD процессы, энергия к реакционной системе подводится в виде тепла, то есть тем либо иным способом осуществляется нагрев реакционной зоны реактора или её отдельных элементов. Интервал температур осаждения простирается от практически комнатной до 2500 К.

Плазмохимическое осаждение, широко применяемое для низкотемпературного (450–650 К) осаждения слоёв, основано на использовании энергии низкотемпературной плазмы для образования из реагентов за счёт неупругих соударений их молекул или атомов с электронами и ионами свободных радикалов или возбуждённых молекул и атомов, последующая реакция которых приводит к осаждению слоя.

Фотоактивируемые способы реализации процессов химического осаждения из газовой фазы основаны на использовании электромагнитного излучения в ультрафиолетовой, видимой или инфракрасной областях спектра.

*Нанесение CVD покрытий на режущий инструмент.* В мировой практике металлообработки все большее применение находят инструментальные материалы с покрытиями. Тонкие «плёночные» покрытия, толщиной от 2 до 10 мкм, наносят на поверхность заточенного и доведённого инструмента из быстрорежущей стали, твёрдого сплава и режущей керамики, что позволяет улучшить ряд служебных характеристик инструмента и значительно изменить условия его работы. Снижение сил и температур резания на 20–40 % позволяет повысить стойкость режущего инструмента в два и выше раз или увеличить скорость резания от 20 до 60 % и значительно улучшить шероховатость обработки.

Одним из методов нанесения покрытий на режущий инструмент в последние годы, нашедшим широкое распространение, стал метод осаждения покрытия из газовой фазы (CVD процесс).

Так как реакция осаждения покрытий методом CVD происходит при высоких температурах 700...1100°C, то этим методом покрытие может наноситься только на инструменты из твёрдого сплава и

режущей керамики. Твёрдый сплав с покрытием в настоящее время занимает 80–90 % рынка пластин для режущих инструментов (рис. 3.2).

Широкому применению этого метода при создании твёрдосплавного режущего инструмента с покрытиями способствовало то, что режущие инструменты стали активно оснащаться неперетачиваемыми пластинками твёрдого сплава. Покрытия CVD обладают высокой износостойкостью и превосходной адгезией к твёрдосплавной основе.



Рис. 3.2. Неперетачиваемые твёрдосплавные пластинки и фреза с пластинками из твёрдого сплава с покрытием

Наибольшее распространение в качестве материала покрытий на твёрдых сплавах получили карбиды, нитриды, карбонитриды титана и оксид алюминия. Первый твёрдый сплав с покрытием CVD имел однослойное покрытие из карбида титана ( $TiC$ ). Позже появились покрытия из оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и нитрида титана ( $TiN$ ). Практическая реализация метода CVD нашла широкое применение в технологии газофазового титанирования, где на сменные многогранные пластины из твёрдого сплава наносятся износостойкие покрытия ( $TiC$ ,  $TiCN$ ,  $TiC - TiCN - TiN$  и др.).

Совместное применение CVD технологий и специальных методов спекания позволяет создавать многослойные износостойкие покрытия с хорошей адгезией и наращивать суммарную толщину слоёв до 22–25 мкм.

Примеры областей применения твёрдосплавных пластин с износостойким покрытием приведены в таблице 3.1.



Таблица 3.1

Марки и области применения твёрдосплавных пластин с покрытием

Твёрдый сплав	Покрытие	Область применения	
		по ISO	общие рекомендации
T5K10	TiC – TiCN – - TiN	P20–P30	Черновая и получистовая обработка легированных и углеродистых сталей.
TT7K12	TiC – TiCN – - TiN	P15–P40	Черновая, получистовая и чистовая обработка легированных и углеродистых сталей.
BK6	TiC – TiCN – - TiN	K10–K30	Черновая и чистовая обработка чугуна, цветных металлов и сплавов, неметаллических материалов.
Группа ТТК	TiC – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P01–P25, M05–M20, K01–K30	Черновая и чистовая обработка чугуна, цветных металлов и сплавов; получистовая и чистовая обработка легированных, углеродистых и нержавеющей сталей.

Исходными продуктами для нанесения покрытий служат газообразные галогениды, при взаимодействии которых с другими составляющими смесей (водородом H<sub>2</sub>, аммиаком NH<sub>3</sub>, окисью углерода CO, метаном CH<sub>4</sub> и т. д.) образуется покрытие. В таблице 3.2 представлен состав смесей, используемых для нанесения некоторых покрытий твёрдых сплавов.

Таблица 3.2

Вид покрытия и состав насыщающих газов

Тип покрытия	Состав насыщающих газов
Карбид титана (TiC)	TiCl <sub>4</sub> + CH <sub>4</sub>
Нитрид титана (TiN)	TiCl <sub>4</sub> + N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>
Карбонитрид титана (TiC <sub>x</sub> N <sub>y</sub> )	TiCl <sub>4</sub> + CH <sub>4</sub> + N <sub>2</sub>
Карбид хрома (CrC)	CrCl <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub>

Тип покрытия	Состав насыщающих газов
Карбид ниобия (NbC)	$\text{NbCl}_5 + \text{CH}_4 + \text{H}_2$
Борид титана ( $\text{TiB}_2$ )	$\text{TiCl}_4 + \text{BCl}_3 + \text{H}_2$
Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	$\text{SiCl}_4 + \text{H}_2 + \text{N}_2$ ; $\text{SiCl}_4 + \text{NH}_3$

Инструменты их твёрдых сплавов с покрытием CVD — идеальный выбор для широкого спектра областей обработки заготовок методом резания, где важна износостойкость режущего инструмента. Например, к таким работам относятся токарные виды работ по нержавеющей стали, где толстое CVD покрытие обеспечивает стойкость к лункообразованию. Использование твёрдосплавного инструмента с покрытием обеспечивает повышение производительности обработки резанием на 20...200 %, увеличение срока службы инструмента до 1,5...10 раз при обработке конструкционных сталей, до четырёх раз — при резании коррозионностойких и жаропрочных сталей, в 1,5...2,5 раза — при обработке титановых и никелевых сплавов. Кроме того, достигается снижение расхода сложнопрофильного инструмента вследствие уменьшения количества его переточек.

### 3.3.3. Обозначение покрытий

Покрытия на чертежах обозначают с помощью ряда символов в соответствии с ГОСТ 9306–85 «Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Обозначения». Эти символы отражают структуру и технологию получения покрытия. В них указывают следующие данные:

- способ обработки материала основы;
- способ получения основного покрытия;
- материал основного покрытия и отдельных слоёв для многослойных покрытий;
- минимальную толщину покрытия (толщину покрытия менее 1 мкм без особой необходимости не указывают);
- электролит, из которого получают покрытие;
- функциональные и декоративные свойства покрытия;
- вид дополнительной обработки покрытия.

Перечень характеристик, указываемых в обозначении покрытия, может варьироваться в зависимости от типа и назначения покрытия.

Например, покрытие кадмием толщиной 3 мкм с подслоем никеля толщиной 9 мкм и последующей термообработкой и хроматированием химическим методом нанесения покрытий обозначают следующим образом: *H9. КдЗ. т. хр.*

Покрытие химическое оксидное электропроводящее: *Хим. окс. э.*

Покрытие оксидное с пропиткой маслом: *Хим. окс. прм.*

## 4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ

### 4.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В основе электрохимической обработки (ЭХО) лежат окислительно-восстановительные процессы, протекающие на электродах при пропускании через электролит постоянного электрического тока (рис. 4.1). В совокупности эти процессы называют *электролизом*. Электролиз протекает при наличии источника питания 2, электролита 1 и двух металлических проводников (электродов) 3 и 4, помещённых в электролит.

Окислением называют процесс отдачи веществом электронов. При электролизе окислительные процессы идут на аноде, в результате чего анод передаёт электроны во внешнюю цепь. Восстановлением называется процесс присоединения электронов атомами вещества. При этом степень окисления металла понижается. Восстановительные процессы при электролизе протекают на катоде. Они связаны с присоединением электронов из внешней цепи.

Окислительно-восстановительные процессы на электродах проходят в среде электролита под действием электрического тока без непосредственного контакта между электродами. Электролитом называют вещество, которое проводит электрический ток вследствие диссоциации на положительно и отрицательно заряженные ионы. Образующиеся в электролите ионы под действием разности электрических потенциалов электродов, создаваемой источником напряжения, перемещаются, что соответствует прохождению в электролите электрического тока. Положительные ионы, называемые катионами,

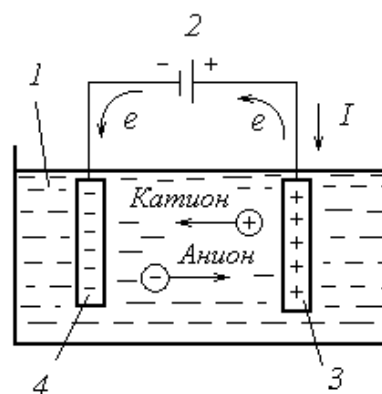


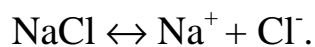
Рис. 4.1. Схема процесса электролиза

движутся от анода к катоду. Отрицательные ионы — анионы идут от катода к аноду.

Любая окислительно-восстановительная реакция, проходящая в системе «электроды — электролит», представляет собой единство процессов окисления и восстановления, идущих одновременно и без отрыва одного от другого. В то же время результаты этих процессов в электролите, на катоде и аноде по их значимости в реализации целевого назначения создаваемой электрохимической обработки существенно различаются между собой. В связи с этим для понимания общей системы процессов электролиза и выработки рекомендаций по направленному выбору условий обработки на каждом из элементов системы целесообразно рассмотреть процессы, идущие при электролизе в электролите, на аноде и на катоде, отдельно, условно независимо друг от друга.

*Процессы в электролите.* Электролитами при ЭХО являются водные растворы солей (NaCl, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KCl и др.), кислот (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> и др.), щелочей (NaOH, KOH, NH<sub>4</sub>OH и др.). Используются при ЭХО и более сложные электролиты, состав и область применения которых будут рассмотрены в разделе 5.3.

Основным процессом, идущим в электролите, является диссоциация растворённого в нём вещества на ионы. Например, в электролите на основе соли NaCl происходит приводящая к её растворению диссоциация соли на катионы натрия Na<sup>+</sup> и анионы хлора Cl<sup>-</sup> по схеме



При отсутствии разности потенциалов на аноде и катоде в растворе устанавливается равновесие между положительно и отрицательно заряженными ионами. Раствор остаётся нейтральным. При создании разности потенциалов на электродах, то есть подключения их к источнику напряжения, катионы Na<sup>+</sup> начинают двигаться к катоду, а анионы Cl<sup>-</sup> — к аноду. Движение ионов при создании разности потенциалов соответствует прохождению через электролит электрического тока.

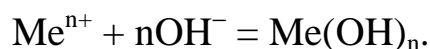
Кроме диссоциации молекул растворённого вещества в водном растворе, хоть и в небольшом количестве, но происходит диссоциация молекул воды на ионы с образованием катионов водорода  $H^+$  и анионов гидроксид-иона  $OH^-$ :



При приложении напряжения к электродам ионы водорода  $H^+$  начинают перемещаться к катоду, а ионы гидроксильной группы  $OH^-$  — к аноду.

В электролите ионы различных видов и потенциалов могут вступать друг с другом во взаимодействие, образуя новые растворимые или нерастворимые вещества. Растворимые вещества вновь диссоциируют на ионы, а нерастворимые — выпадают в осадок.

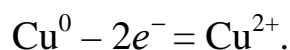
Например, образующиеся при диссоциации соли катионы металла  $Me^{n+}$  могут вступать в реакцию с анионами гидроксильной группы  $OH^-$ , образуя растворимое или нерастворимое основание по реакции



Конкретные процессы, проходящие в электролитах, состоящих из ионов различных видов, определяются составом электролитов и условиями протекания процесса (состава и температуры электролита, материалов электродов, потенциала напряжения на электродах, концентрации и т. д.).

***Процессы, проходящие на аноде.*** На аноде всегда присутствует несколько видов ионов. К ним относятся: ионы вещества анода, ионы воды, анионы растворённого в воде электролита. В связи с этим на аноде могут проходить разные физико-химические процессы [8].

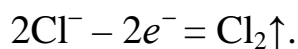
Один из таких процессов связан с окислением анода. Окисление выражается в том, что под действием приложенного к электродам напряжения электроны вещества анода покидают анод и поступают во внешний проводник, замыкая электрическую цепь. Металл анода заряжается положительно. Например, в электролите на основе  $CuSO_4$  и опущенном в него аноде, изготовленном из меди, анод отдаёт во внешнюю электрическую цепь электроны ( $e^-$ ) по реакции



В результате отдачи анодом электронов в системе «анод — электролит» могут создаваться такие энергетические условия, при которых положительно заряженные ионы меди анода  $\text{Cu}^{2+}$  переходят в электролит. Происходит растворение вещества анода, что соответствует изменению его формы и качества поверхностного слоя, то есть обработке анода. Аноды, изготовленные из материалов, способных передавать ионы в раствор, получили название растворимых.

Процессы растворения анода положены в основу методов обработки заготовок, осуществляемых со снятием с поверхности заготовки припуска. К ним относят, например, электрохимическую размерную обработку и электрохимическое полирование (см. рис. 1.3).

Для того чтобы в системе «электролит – электроды» проходил электрический ток, на аноде должен окисляться один из видов анионов, образовавшихся в растворе. У поверхности анода в электролите присутствует несколько видов ионов. В частности, такими ионами являются ионы воды и кислотные остатки растворённого в воде вещества. Так, при использовании в качестве электролита водного раствора соли хлористого натрия  $\text{NaCl}$ , как показано ранее, кислотным остатком являются анионы  $\text{Cl}^-$ . При определённых условиях протекания процесса анионы хлора могут окисляться на аноде, отдавая ему электроны, с образованием молекул хлора  $\text{Cl}_2$  и выделением их в виде газа по реакции



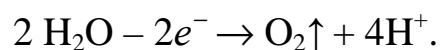
Выделение хлора на аноде является крайне нежелательным процессом при проведении операций электрохимической обработки заготовок. Однако использование процессов такого типа может стать основой получения на аноде электрохимическим методом некоторых газов, в том числе и хлора.

Анионы вещества, находящиеся в электролите, достигая поверхности анода, могут вступать с ним в химическую реакцию и образовывать на аноде солевую плёнку. Как правило, образование плёнки резко увеличивает электрическое сопротивление поверхности анода,

в результате чего процесс электролиза замедляется или вообще прекращается. Появление на поверхности анода оксидных плёнок получило название пассивации анода. Пассивация как технологический метод обработки заготовок используется для получения анодного покрытия поверхностей заготовок в виде оксидных плёнок. Именно таким способом осуществляют нанесение покрытий на заготовки при оксидировании, фосфатировании, анодировании.

Кроме анодов растворимых, которые отдав свои электроны во внешнюю цепь, переходят при определённых условиях в раствор, существуют и нерастворимые аноды. Нерастворимые аноды также передают свои электроны во внешнюю цепь, обеспечивая прохождение в цепи электрического тока. Однако свои ионы в электролит они не выделяют. К нерастворимым анодам относятся аноды, изготовленные из свинца, графита, серебра, платины и ряда других неактивных металлов.

В тех случаях, когда при электролизе используются нерастворимые аноды, а окисления кислотных остатков на аноде по тем или иным причинам не происходит, на аноде может идти окисление воды с выделением молекулярного кислорода



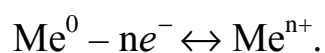
При наличии на аноде несколько ионов различных видов окисляется преимущественно из них один. Идут при этом и попутные реакции, однако, как правило, они относятся к нежелательным, поскольку снижают эффективность основного процесса, необходимого для осуществления электрохимической обработки заготовки. Возможность преимущественного реагирования на аноде ионов того или иного вида определяется значением его электродного потенциала.

*Электродный потенциал вещества.* Электродным потенциалом вещества  $\varphi$  (В) называют разность электрических потенциалов, возникающую между электродом, опущенным в электролит, и находящимся в контакте с ним электролитом. Возникновение электродного потенциала обусловлено переносом заряженных частиц через границу раздела фаз «электрод — электролит» или адсорбцией ионов раствора



электродом. На поверхности раздела фаз «металл — электролит» образуется так называемый двойной электрический слой, характеризующийся тем, что тонкие приграничные слои каждой фазы получают противоположные по знаку заряды. Двойной электрический слой подобен плоскому конденсатору, внутренняя обкладка которого находится в твёрдой фазе, а внешняя — в жидкости параллельно поверхности электрода.

При опускании электрода в электролит может происходить как окисление металла электрода  $Me^0$  и переход его в виде ионов  $Me^{n+}$  в раствор, так и обратный процесс — восстановление ионов металла  $Me^{n+}$  из раствора и осаждение их на электроде в виде чистого металла  $Me^0$ . При равенстве скоростей обоих процессов между ними устанавливается динамическое равновесие



Смещение равновесия в сторону прямой или обратной реакции, то есть окисление металла электрода или восстановление ионов металла из раствора, зависит во многом от степени активности металла электрода.

В случае использования в качестве электрода активного металла (например, Mg, Al, Fe, Zn) преобладает прямая реакция — окисление материала электрода. Часть атомов металла оставляет свои электроны на электроде ( $Me^0 \rightarrow Me^{n+} + ne^-$ ) и переходит в раствор в виде ионов, а поверхность металла приобретает отрицательный заряд. Ионы  $Me^{n+}$ , которые находятся в электролите, притягиваются к поверхности, поэтому приграничный слой раствора заряжается положительно. Таким образом, на границе «металл — раствор» образуется двойной электрический слой и возникает разность потенциалов.

Если электрод изготовлен из малоактивного металла (например, Cu, Ag, Au, Hg), то его ионы (соответственно  $Cu^{2+}$ ,  $Ag^+$ ,  $Au^{3+}$ ,  $Hg^{2+}$ ) проявляют заметную окислительную способность. В таком случае наблюдается обратный процесс, при котором некоторая часть ионов из раствора подходит к металлической пластине, восстанавливается и осаждается на поверхности ( $Me^{n+} + ne^- \rightarrow Me^0$ ). Благодаря осаждению

ионов металла на поверхности, пластина заряжается положительно и притягивает к себе отрицательно заряженные ионы кислотного остатка, находящиеся в растворе. Приэлектродный слой раствора заряжается отрицательно, а на границе раздела фаз «металл — раствор» возникает двойной электрический слой.

На рисунке 4.2, *а* представлена схема образования двойного электрического слоя при опускании электрода из меди в электролит  $\text{CuSO}_4$ . В результате создаются такие энергетические условия, при которых часть ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , находящихся в растворе, осаждаются на электроде и заряжают его положительно. Электрод и приэлектродный слой электролита создают двойной электрический слой, имеющий избыток отрицательно заряженных ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ . Измеренная разность потенциала электрода и двойного электрического слоя и составит электродный потенциал меди.

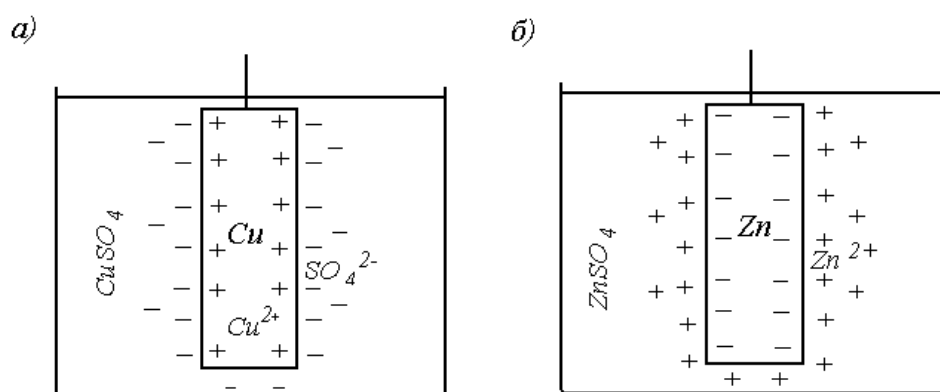


Рис. 4.2. Электродные потенциалы:

*а*) — пассивного металла; *б*) — активного металла

Медь относится к группе пассивных металлов. Если проделать такую же операцию с активным металлом, например, с цинком  $\text{Zn}$ , опустив цинковую пластину в электролит, состоящий из соли этого металла, например,  $\text{ZnSO}_4$ , то металл отдаст свои ионы  $\text{Zn}^{2+}$  в раствор. Электрод в этом случае зарядится отрицательно (рис. 4.2, *б*).

Электродные потенциалы обозначают символом « $\phi$ » с соответствующим индексом «*а*» или «*к*», обозначающим соответственно анод и катод.

Определение электродного потенциала вещества проводят в специальных условиях, сопоставляя его с нормальным электродным потенциалом водородного электрода, на поверхности которого в стандартных условиях протекает реакция  $\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2e^-$ . Для водородного электрода и водных систем электродный потенциал условно принимается равным нулю  $\varphi_{\text{H}_2} = 0$ . Определённый таким образом относительный электродный потенциал электрода из другого вещества называется *равновесным электродным потенциалом*  $\varphi_p$ .

Все металлы по значению равновесного электродного потенциала выстраивают в ряд активности (рис. 4.3). У металлов, стоящих слева от водорода, электродный потенциал отрицательный, а справа, за водородом — положительный.

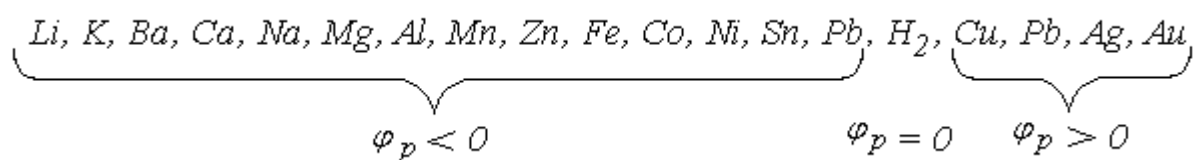
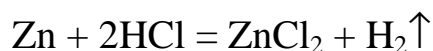


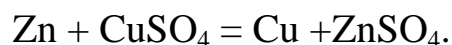
Рис. 4.3. Ряд активности металлов

Чем левее в ряду активности стоит металл, тем он активнее, тем легче он окисляется (отдаёт электроны), и тем труднее металл восстанавливается (присоединяет электроны).

Металлы, стоящие в ряду активности до водорода, вытесняют его из раствора кислот по реакции



и из раствора солей металлов, расположенных в ряду активности правее:



Сопоставление электродных потенциалов ионов, находящихся в электролите на аноде, позволяет сформулировать подход к нахождению тех из них, которые преимущественно будут окисляться в первую очередь. На аноде окисляться будет тот ион, который обладает наименьшим электродным потенциалом. Это позволяет прогнозировать процессы, которые будут происходить на аноде при электро-

химической обработке, и, создавая соответствующие условия, добиваться желаемого результата.

Немного забегаая вперёд, скажем, что данный подход распространяется и на процессы, проходящие на катоде. При наличии на катоде ионов нескольких видов из них будет восстанавливаться тот, электродный потенциал которого наибольший.

*Электродная поляризация.* При прохождении электрического тока через электролит электродные потенциалы веществ изменяются. Происходит смещение их значений относительно электродного потенциала водорода. На аноде электродный потенциал становится более положительным, а на катоде — более отрицательным.

$$\varphi_a = \varphi_{ap} + \Delta\varphi_a, \quad \varphi_k = \varphi_{kp} + \Delta\varphi_k, \quad (4.1)$$

где  $\varphi_{ap}$ ,  $\varphi_{kp}$  — электродные потенциалы в равновесном состоянии анода и катода соответственно;  $\Delta\varphi_a$  и  $\Delta\varphi_k$  — смещение электродных потенциалов анода и катода при прохождении через электролит электрического тока.

Явление отклонения электродного потенциала материала при прохождении через электролит электрического тока от равновесного получило название *электродной поляризации*. Причиной поляризации является изменение условий протекания одного или нескольких физико-химических процессов на электродах и в электролите в процессе электролиза при прохождении через электролит электрического тока. Особенности учёта электродной поляризации при проектировании технологических процессов электрохимической обработки будут рассмотрены в дальнейших разделах при характеристике конкретных групп процессов электрохимической обработки.

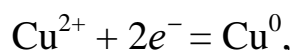
*Процессы, проходящие на катоде.* На катоде так же, как и на аноде, всегда присутствует несколько видов ионов. К ним относятся ионы металла катода, ионы водорода, образующиеся при диссоциации воды, и катионы растворённого в воде электролита. В связи с различием их электродных потенциалов при подаче напряжения на катоде проходит восстановление, то есть присоединение электронов,

поступающих от источника тока, преимущественно одним из этих видов ионов.

Таковыми ионами могут бытьдвигающиеся к катоду положительно заряженные катионы электролита. Катионами являются ионы металлов (для электролитов на основе солей и щелочей) или ионы водорода (для электролитов на основе кислот). При определённых условиях ионы некоторых металлов могут восстанавливаться (осаждаться) на катоде, формируя на нём металлическое покрытие. Например, образование медного покрытия происходит на катоде при электролизе с использованием электролита на основе соли  $\text{CuSO}_4$ . При отсутствии разности потенциалов на аноде и катоде в растворе происходит диссоциация соли по реакции

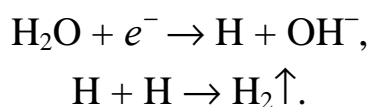


При приложении напряжения к электродам положительно заряженные ионы меди  $\text{Cu}^{2+}$  двигаются к катоду и восстанавливаются на нём в соответствии с реакцией



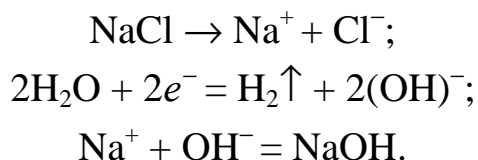
образуя на катоде медное покрытие.

Однако на катоде могут восстанавливаться ионы не всех металлов. По аналогии с принципом преимущественного реагирования тех или иных ионов на аноде в зависимости от их электродного равновесного потенциала, из присутствующих на катоде ионов восстанавливаются те, электродный потенциал которых является наибольшим. В связи с этим металлы, электродный потенциал которых меньше нуля ( $\varphi < 0$ ), осаждаться на катоде не могут, так как их электродный потенциал меньше потенциала присутствующих у катода ионов водорода ( $\varphi_{\text{H}_2} = 0$ ). Восстанавливаться в этом случае должны ионы водорода, образующиеся при разложении молекул воды и присоединения электронов из внешней цепи по реакциям:



Учитывая то, что при прохождении электрического тока происходит поляризация электродов, при которой электродные потенциалы

смещаются, появляется возможность осаждения на катоде и ряда активных металлов, равновесные электродные потенциалы которых менее нуля. Тем не менее, осадить на катоде самые активные металлы, такие как Li, K, Ca, Na, Mg не удаётся. Ионы этих металлов остаются в растворе, вступая в реакцию с присутствующими в электролите ионами гидроксильной группы  $\text{OH}^-$ . Например, в электролите на основе NaCl происходят следующие реакции:



Образование в электролите щёлочи NaOH соответствует изменению состава исходного электролита в направлении его защелачивания.

На основе процесса осаждения ионов металла на катоде созданы электрохимические технологии нанесения покрытий, получившие названия гальваностегии и гальванопластики. *Гальваностегия* — электрохимический процесс нанесения на металлическое изделие защитного или декоративного слоя другого металла. *Гальванопластика* — получение сравнительно толстого слоя металлических осадков на поверхности какого-либо образца электрохимическим методом. При гальванопластике создаются массивные, прочные, легко отделяющиеся от покрываемой поверхности осадки. Это позволяет изготавливать путём отделения покрытия от основы точную металлическую копию формы поверхности образца.

Процессы осаждения металлического покрытия на катоде могут сопровождаться проходящим одновременно с ним восстановлением атомарного, а затем и молекулярного водорода из воды. Это может привести к наводороживанию покрытия, то есть к насыщению поверхностного слоя водородом. Проникновение водорода в металл приводит к изменениям параметров кристаллической решётки, электрохимических и механических свойств. Так, резко уменьшается пластичность и длительная прочность материала, возрастает его хрупкость. Возможно также появление в поверхностном слое газовых

пузырей, которые в процессе эксплуатации изделия могут привести к отслаиванию покрытия.

Процессы осаждения на катоде ионов металла из электролита используют также для очистки металлов от примесей (технологии рафинирования материалов). Детальное рассмотрение этих технологий в задачи изучения технологических методов обработки заготовок не входит.

**Процессы в системе «электроды — электролит».** Рассмотренные относительно отдельно друг от друга процессы, проходящие в электролите и на электродах, при реальном электролизе представляют собой систему физико-химических процессов, определяемую материалом электродов, составом электролита и другими условиями проведения электролиза.

Рассмотрим в качестве примера явления, протекающие при электролизе в водном растворе хлорида меди  $\text{CuCl}_2$  с анодом из меди. Схема прохождения электролиза с пояснениями в виде индексов и надписей показана на рисунке 4.4.

Электроды помещены в ванну с электролитом — водным раствором  $\text{CuCl}_2$ .

В воде молекулы хлорида меди диссоциируют на ионы по реакции



При подключении электродов к источнику постоянного тока под действием разности потенциалов на клеммах источника анионы хлора  $\text{Cl}^-$  в электролите двигаются к аноду,

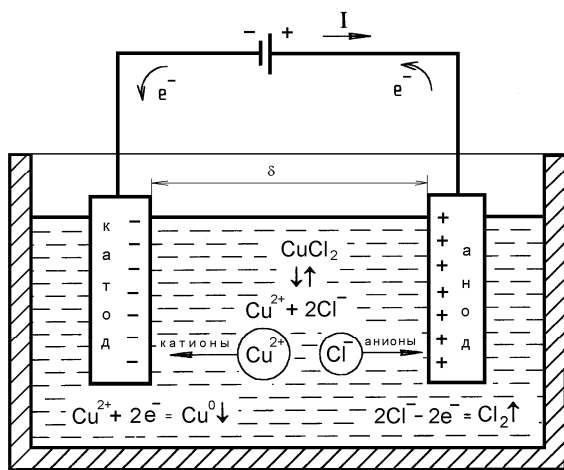
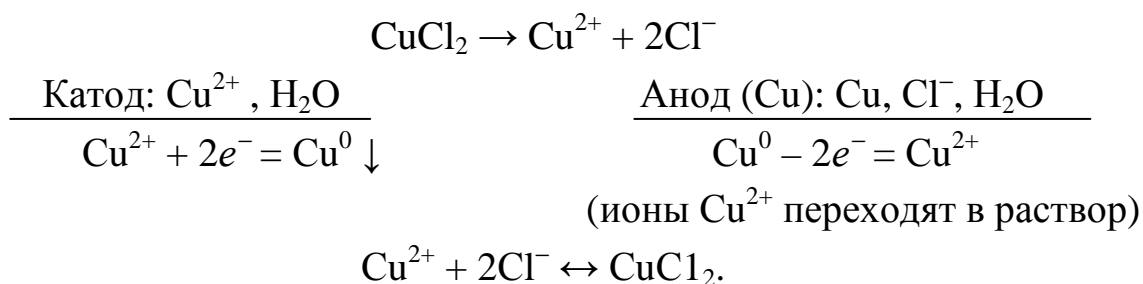


Рис. 4.4. Схема электролиза

а катионы меди  $\text{Cu}^{2+}$  — к катоду. Благодаря этому электрическая цепь (источник питания — электрод-катод — электролит — электрод-анод — источник питания) замыкается.

Под действием электрического напряжения электроны анода двигаются по внешней электрической цепи к положительному полюсу источника. Атомы медного анода, теряя электроны, превращаются в ионы  $\text{Cu}^{2+}$  и в этом виде переходят в электролит. Происходит растворение материала анода. Подошедшие к катоду катионы меди  $\text{Cu}^{2+}$  присоединяют электроны из внешней электрической цепи и осаждаются в атомарном виде на поверхности катода, формируя покрытие. Фактически происходит перенос атомов меди с анода на катод. На катоде осуществляется процесс восстановления меди — присоединения электронов, а на аноде процесс окисления меди — отдача электронов.

В совокупности электролиз водного раствора  $\text{CuCl}_2$  при медном аноде можно представить в виде следующей схемы:



## 4.2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОЛИЗА

Физико-химические процессы, протекающие в технологической системе при электролизе, указывают на то, что этот процесс характеризуется превращением электрической энергии в энергию химических связей и сопровождается переносом вещества, электричества и тепла. Все эти «переносы» необходимо характеризовать количественно, устанавливая взаимосвязи между затратами введённой в систему энергии и полученными результатами.

Основное соотношение, свойственное процессу электролиза, установлено и сформулировано английским учёным М. Фарадеем (*первый закон Фарадея*): масса вещества  $m$  (кг), восстановленного на катоде и окисленного на аноде, прямо пропорциональна количеству прошедшего через электролит электричества. Первый закон Фарадея выражается следующей формулой:



$$m = k_{\text{эx}} q = k_{\text{эx}} I \tau_o, \quad (4.2)$$

где  $k_{\text{эx}}$  — электрохимический эквивалент вещества;  $q$  — количество электричества, Кл;  $I$  — сила тока в электролите, А;  $\tau_o$  — основное время протекания процесса, с.

Коэффициент  $k_{\text{эx}}$  характеризует массу вещества анода в килограммах, растворённого (перемещённого с анода на катод) при токе 1 А за одну секунду. Числовые значения  $k_{\text{эx}}$  для различных химических элементов приводятся в справочных материалах, например, работе [16].

Электрохимический эквивалент сплава  $k_{\text{эxc}}$  можно найти через электрохимические эквиваленты входящих в него компонентов  $k_{\text{эxi}}$  и их массовые доли  $m_i$  в сплаве по формуле

$$k_{\text{эxc}} = \sum_i (m_i k_{\text{эxi}}). \quad (4.3)$$

Каждый компонент сплава имеет свой электрохимический эквивалент, то есть свою скорость анодного растворения. В связи с этим в процессе обработки на поверхности заготовки возникают углубления и выступы, формирующие микропрофиль и шероховатость обработанной поверхности.

В реальном процессе масса прореагировавшего при электролизе вещества меньше массы, вычисленной по закону Фарадея. Полезное использование тока характеризуют коэффициентом выхода по току  $k_{\text{вm}}$ :

$$k_{\text{вm}} = \frac{m_{\phi}}{m}, \quad (4.4)$$

где  $m_{\phi}$  — фактическая масса вещества, прореагировавшего в процессе электролиза.

Значение  $k_{\text{вm}}$  варьируется в широких пределах и зависит от состава электролита, концентрации загрязнений электролита продуктами реакций, температуры электролита, плотности тока и других параметров процесса. Так, для электрохимического золочения (покрытие поверхности золотом)  $k_{\text{вm}}$  достигает 90 %, хромирования

(покрытие хромом) — 8...12 %, никелирования (покрытие никелем) — 90...95 %, кадмирования (покрытие кадмием) — 85...95 %.

*Второй закон Фарадея* устанавливает зависимость электрохимического эквивалента  $k_{\text{эx}}$  от атомной массы вещества  $A$  и его валентности  $z$  и формулируется следующим образом: электрохимический эквивалент вещества пропорционален его атомной массе и обратно пропорционален его валентности.

Отношение атомной массы вещества к его валентности  $z$  называется химическим эквивалентом вещества:

$$k_x = A/z. \quad (4.5)$$

Применение формулы (4.5) к математической формулировке второго закона Фарадея позволяет сформулировать его следующим образом: электрохимические эквиваленты веществ пропорциональны их собственным химическим эквивалентам.

$$\frac{k_{\text{эx}_1}}{k_{\text{эx}_2}} = \frac{k_{x_1}}{k_{x_2}} \quad \text{или} \quad \frac{k_{\text{эx}_1}}{k_{x_1}} = \frac{k_{\text{эx}_2}}{k_{x_2}} = \frac{k_{\text{эx}_3}}{k_{x_3}} = \dots = \frac{k_{\text{эx}_n}}{k_{x_n}}, \quad (4.6)$$

где  $k_{\text{эx}_1}, k_{\text{эx}_2}, k_{\text{эx}_3}, \dots, k_{\text{эx}_n}$  — электрохимические эквиваленты веществ;  $k_{x_1}, k_{x_2}, k_{x_3}, \dots, k_{x_n}$  — химические эквиваленты тех же веществ.

Из равенства (4.5) следует, что отношение величины электрохимического эквивалента вещества к величине его химического эквивалента есть величина постоянная, имеющая для всех веществ одно и то же установленное значение:

$$\frac{k_{\text{эx}}}{k_x} = \text{Const} = 1,036 \cdot 10^{-5}.$$

Величина обратная этому значению, равная 96500 (Кл/моль), получила название *постоянная Фарадея (F)*.

Постоянная Фарадея показывает, что для выделения на электродах одного моля вещества нужно пропустить через электролит количество электричества равное 96500 Кл.

Таким образом, второй закон Фарадея представляется формулой:

$$k_{\text{эx}} = \frac{1}{F} k_x = \frac{1}{F} \times \frac{A}{z}. \quad (4.7)$$

Подстановкой полученного выражения для  $k_{\text{эx}}$  в первый закон Фарадея оба закона записываются следующей формулой:

$$m = k_{\text{эx}} q = \frac{1}{F} k_x I \tau_o. \quad (4.8)$$

Формула (4.8) показывает, что в результате прохождения через два различных электролита токов одинаковой силы в течение одного и того же промежутка времени из обоих электролитов выделяются количества веществ, относящиеся между собой как химические эквиваленты таковых.

Так как  $k_x = A/z$ , то можно представить формулу (4.2) для определения массы прореагировавшего на электродах вещества в следующем виде

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{z} I \tau_o. \quad (4.9)$$

Таким образом, основная количественная технико-экономическая характеристика процесса электрохимической обработки заготовок, характеризующая массу растворённого на аноде или осаждённого на катоде вещества и определяемая в соответствии с законами Фарадея по формуле (4.9), прямо пропорциональна его атомной массе, силе тока, времени электролиза и обратно пропорциональна валентности вещества.

### **4.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ**

В практике электрохимической обработки используют многоуровневые схемы классификации методов этой группы. Такая схема, соответствующая принципам классификации технологических методов обработки, представленных в разделе 1 дана на рисунке 4.5.



Рис. 4.5. Классификация электрохимических методов обработки<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Перечни электрохимических методов обработки групп ЭХРО и ЭХОО дополнены комбинированными методами обработки, при реализации которых основным из нескольких энергетических воздействий на заготовку является электролиз.

В соответствии с представленной на рисунке 4.5 классификацией электрохимические технологические методы разделяют на две группы: методы, сопровождающиеся удалением материала с поверхности заготовки, и методы нанесения материала на поверхность заготовки.

Электрохимические методы удаления материала подразделяют по целевому назначению обработки на электрохимические методы размерной обработки (ЭХРО) и электрохимические методы отделочной обработки. Обработка методами ЭХРО направлена на получение поверхностей определённых форм и размеров с заданной точностью.

Основной целью методов электрохимической отделочной обработки (ЭХОО) является достижение особого качества поверхностей обработанной заготовки: уменьшение шероховатости поверхностей или придание им особых эстетических и санитарно-гигиенических характеристик, повышение точности размеров и формы.

Из общей классификации технологических методов обработки, представленной на рисунках 1.2 и 1.3, следует, что по физико-химическим основам к электрохимическим методам обработки тесно примыкает группа комбинированных химических и электрохимических методов обработки, реализуемых на основе нескольких видов энергетического воздействия, основным из которых, обеспечивающим обработку заготовки, является электрохимическое воздействие. Необходимость дополнительного энергетического воздействия на электрод-заготовку при реализации этих комбинированных методов обусловлена образованием на поверхности анода оксидных соединений (плёнок), пассивирующих обрабатываемую поверхность и снижающих эффективность обработки. На удаление этих плёнок, имеющих более низкие прочностные характеристики, чем основной металл, и направлено дополнительное механическое и (или) электромеханическое воздействие.

Близость основных физико-химических процессов, проходящих при «чистом» электролизе и при комбинировании электролиза с другим энергетическим воздействием, обуславливает целесообразность в

учебных целях рассмотрения ряда комбинированных методов обработки в рамках группы электрохимических методов параллельно с базовыми электрохимическими методами. В связи с этим в приведённой на рисунке 4.5 классификации электрохимических методов обработки в каждой из подгрупп электрохимических методов со снятием материала представлены методы обработки, осуществляемые только электролизом, и комбинированные методы, совмещающие электролиз с дополнительным энергетическим воздействием другого вида.

Группу электрохимических методов нанесения покрытий подразделяют на методы получения оксидных покрытий на заготовках и методы получения металлических покрытий. В методах нанесения оксидных электрохимических покрытий заготовка является анодом, поскольку оксидные покрытия формируются именно на аноде. Получение металлических покрытий осуществляют на основе осаждения металла из электролита на катод, то есть при нанесении металлических покрытий заготовка становится катодом.

## 5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ РАЗМЕРНЫЕ И ОТДЕЛОЧНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В основе электрохимической размерной обработки (ЭХРО) лежит растворение поверхности заготовки, являющейся анодом, в среде электролита при пропускании через электролит электрического тока (рис. 5.1). В процессе ЭХРО за счёт удаления припуска происходит изменение размеров, формы и качества поверхности заготовки. Метод ЭХРО был впервые предложен российскими инженерами В. Н. Гусевым и Л. А. Рожковым в 1938 г.

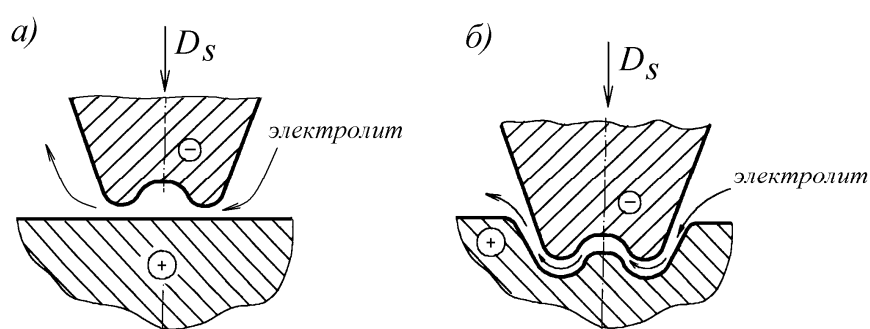


Рис. 5.1. Схемы электрохимической обработки: исходное (а) и конечное (б) положения электрода-инструмента

Сущность процессов, протекающих в системе «электроды — электролит» при ЭХРО, состоит в передаче металлом анода  $Me^0$  электронов во внешнюю электрическую цепь и переходе образовавшихся ионов металла  $Me^{n+}$  в раствор в соответствии с реакцией



### 5.1. МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Целью электрохимической размерной обработки (ЭХРО) является получение на заготовке поверхности заданных формы, размеров и параметров шероховатости. В зависимости от принятой схемы обработки удаление припуска может осуществляться только на основе электрохимического растворения поверхности заготовки, которая в данном случае принимается за анод, или комбинированным методом,

в основе которого лежит воздействие на заготовку нескольких видов энергетического воздействия, основным из которых является анодное растворение поверхностного слоя заготовки (см. рис. 4.5).

### **5.1.1. Методы, реализуемые на основе анодного растворения поверхности заготовки**

В основе большинства методов этой группы ЭХРО лежит формообразование поверхности заготовки способом объёмного копирования — зеркального отображения на заготовке формы и размеров электрода-инструмента, которым является катод [12]. Этот подход, предусматривающий конструирование катода по специальной методике, используют при обработке отверстий, объёмном копировании, калибровании, электрохимическом точении.

Формообразование новых поверхностей при ЭХРО может осуществляться и по аналогии с механическими методами обработки такими, как точение, сверление, фрезерование, протягивание. В этом случае вид электрохимической обработки называют по названию метода резания с добавлением к нему определения «электрохимический», например, электрохимическое точение.

Электрод-инструмент, рабочая поверхность которого адекватна форме и размерам обрабатываемой поверхности заготовки, называют профилируемым. В электрохимической размерной обработке используют и непрофилируемые электроды-инструменты, изготавливаемые в виде проволоки.

*Электрохимическое прошивание отверстий* — наиболее характерный метод ЭХРО (рис. 5.2, а). Этот метод используют при прошивании на заготовке 1 цилиндрических и конических, сквозных и глухих отверстий с любой формой поперечного сечения диаметром более 1,0...1,5 мм. Электрод-инструмент для такой обработки представляет собой полуу деталь 2, через отверстие в которой прокачивают электролит. Изготавливают его обычно из медной или латунной (реже — стальной) трубки.



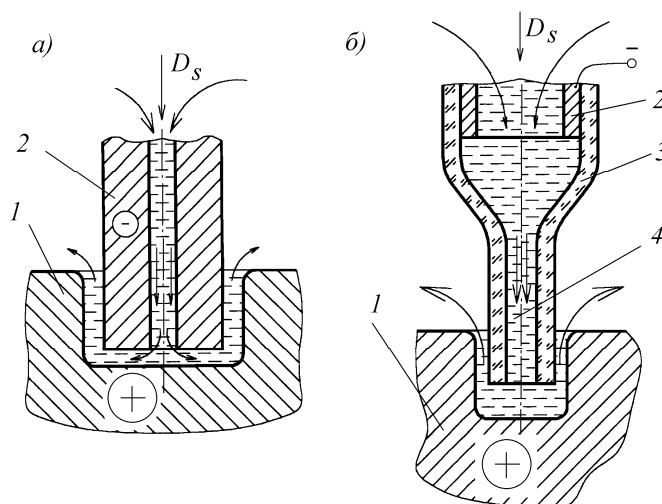


Рис. 5.2. Схемы электрохимического прошивания отверстий:  
*а* — обычное; *б* — струйное

Получение в заготовке отверстий меньших размеров электрохимическим прошиванием затруднено в связи со сложностью изготовления электрода-инструмента, в качестве которого в таких случаях используют медицинские иглы. Однако этот способ изготовления отверстий малого диаметра сравнительно дорог и оправдывается только при одновременной прошивке большого числа отверстий в труднообрабатываемых материалах.

Для изготовления отверстий диаметром менее 1,5 мм применяется метод струйного электрохимического прошивания (рис. 5.2, б). Этот метод характеризуется тем, что явно выраженного электрода-инструмента в данной схеме обработки нет. Его роль выполняет струя электролита 4. Методом струйного электрохимического прошивания получают глубокие отверстия диаметром до 0,2...1,0 мм на глубину до 50 диаметров отверстия. В качестве электролита здесь используют разбавленную серную кислоту ( $H_2SO_4$ ). Формирование струи электролита заданного диаметра при реализации метода струйного прошивания осуществляют в стеклянной трубке 3 с токопроводящей вставкой 2.

**Электрохимическое объёмное копирование.** Целью электрохимического объёмного копирования является получение на заготовке поверхностей сложной геометрической формы. Обработка

производится неподвижным электродом-инструментом или с движением электрода-инструмента вдоль одной координаты (рис. 5.3).

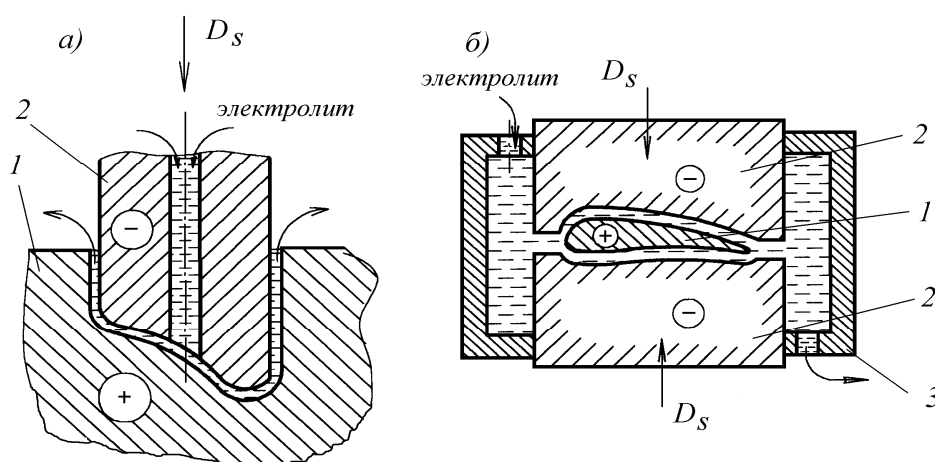


Рис. 5.3. Схемы электрохимического объёмного копирования:  
1 — заготовка, 2 — электрод-инструмент, 3 — рабочая камера

Заданную форму фасонной поверхности заготовки 1 получают отображением на заготовке рабочей поверхности электрода-инструмента 2. Необходимые размеры в направлении движения электрода-инструмента устанавливают продолжительностью процесса ЭХРО и положением электрода-инструмента относительно заготовки в конце обработки.

Этим методом можно получать как внутренние фасонные рабочие поверхности штампов и пресс-форм (рис. 5.3, а), так и наружные пространственно сложные поверхности типа профильной части лопаток турбин и компрессоров (рис. 5.3, б). Обработку лопаток производят, как правило, с двух сторон в рабочей камере 3 с прокачкой электролита через межэлектродные промежутки.

**Электрохимическое разрезание и вырезание заготовок.** Электрохимическое разрезание заготовки 1 осуществляют дисковым электродом-инструментом 2, вращающимся с большой частотой  $n_{эи}$  (рис. 5.4, а). При этом электролит в зону обработки подаётся поливом через специальное сопло 3.

Электрохимическое вырезание заготовок сложного контура, а также чистовые операции вырезания выполняют непрофилированным

подвижным электродом — проволокой 2, перемещающейся в зоне обработки со скоростью  $v_{эи}$  (рис. 5.4, б). Верхний конец проволоки закрепляют в насадке сопла, которая формирует струю электролита. Электрод-проволоку силой  $P$  протягивают в вертикальном направлении для обеспечения равномерности её износа. Устройство с проволокой перемещается ( $D_s$ ) вдоль заданной траектории реза. Направление реза определяется геометрической суммой векторов продольной  $D_{s_{np}}$  и поперечной  $D_{s_{non}}$  подач.

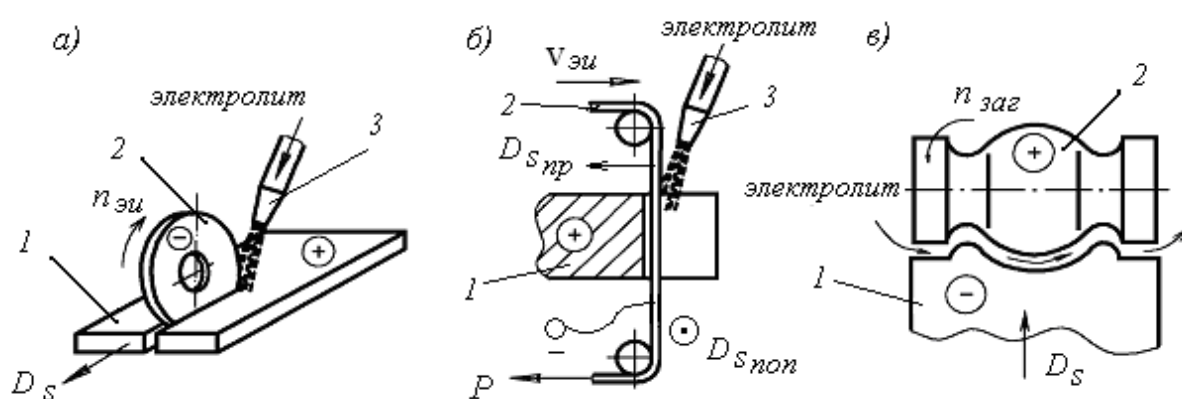


Рис. 5.4. Схемы электрохимического разрезания (а), профильного вырезания (б) и электрохимического точения (в): 1 — заготовка, 2 — электрод-инструмент, 3 — сопло для подачи электролита

Для выполнения фасонного реза используют станки с ЧПУ, где векторы подач могут изменяться на каждом следующем участке реза с помощью управляющей программы станка. Этим способом вырезают из листа заготовки фасонной формы, производят раскрой и разрезание листового материала толщиной не более 20 мм.

По этой же схеме изготавливают пазы, щели, подрезают нежёсткие заготовки, например, пружины. Заготовки в процессе электрохимического разрезания проволочным электродом-инструментом не деформируются, а кромки на их обработанных поверхностях округляются и не имеют заусенцев.

**Электрохимическое точение.** Метод электрохимического точения используют для образования цилиндрических, торцовых и

фасонных поверхностей тел вращения на заготовках из труднообрабатываемых резанием металлов и сплавов (рис. 5.4, в). По кинематике схема электрохимического точения подобна схеме точения заготовки фасонным токарным резцом. Однако электрод-инструмент 2 в отличие от токарного резца не имеет механического контакта с заготовкой 1, а находится от неё на расстоянии межэлектродного зазора.

Электрод-инструмент может двигаться как с поперечным, так и с продольным движениями подачи. Электролит подают в МЭП принудительно.

В связи с отсутствием при электрохимическом точении силового воздействия на заготовку этим методом можно обрабатывать заготовки с диаметром до нескольких метров при толщине стенки, измеряемой долями миллиметра. Минимальная погрешность размеров при этом не превышает 0,01...0,03 мм.

**Электрохимическое протягивание.** Этим способом обрабатывают наружные и внутренние поверхности на заготовках, имеющих предварительно обработанные поверхности, по которым можно базировать электрод-инструмент (рис. 5.5, а). Его устанавливают относительно заготовки 1 с помощью диэлектрических направляющих 3. Электрохимическое протягивание осуществляют при продольном (иногда с вращением) перемещении электрода-инструмента 2 с движением подачи  $D_s$ . По такой схеме выполняют чистовую обработку цилиндрических отверстий, нарезание резьб, изготовление шлицов, винтовых канавок.

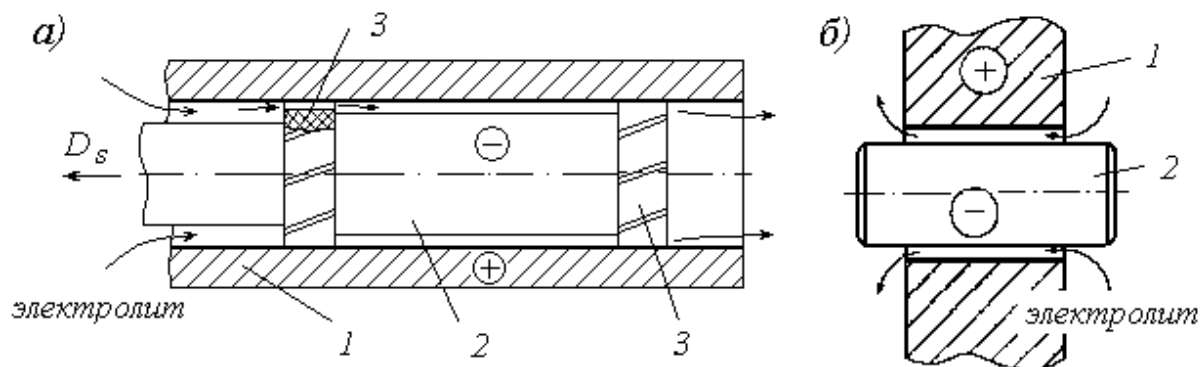


Рис. 5.5. Схемы электрохимического прошивания (а) и калибрования (б)

**Электрохимическое калибрование** применяют для повышения точности формы и геометрических размеров предварительно выполненных наружных или внутренних поверхностей заготовок удалением с обрабатываемой поверхности незначительных припусков (0,3...0,5 мм). Чаще всего электрохимическое калибрование осуществляют при неподвижных электродах (рис. 5.5, б). Исходная шероховатость поверхности перед калиброванием должна быть достаточно высока и соответствовать значениям  $Ra = 12,5...25$  мкм. Режим и длительность электрохимического калибрования подбирают такими, чтобы обеспечивалось достижение заданной по чертежу точности размеров и шероховатости поверхности в пределах  $Ra = 0,16...2,5$  мкм.

**Электрохимическим травлением** называют удаление оксидов и окалины с поверхностей заготовок из углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов в электролитах. Используется травление и для выявления структуры материала. Растворы, используемые при травлении, называют травителями. В зависимости от полюса источника тока, к которому подключена заготовка, выделяют анодные и катодные методы травления.

В процессах, основанных на анодном травлении, катод изготавливают из свинца, а в качестве электролитов применяют растворы серной (HCl) или соляной (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) кислот с добавлением азотной (HNO<sub>3</sub>) или плавиковой кислоты (HF). Кислота проникает через поры окалины до поверхности заготовки и вступает во взаимодействие с основным металлом. Она действует на основной металл как растворитель и вызывает бурное выделение водорода в виде пузырьков. Пузырьки водорода разрыхляют и механически сбивают окалину.

Анодное травление протекает очень интенсивно. Поэтому важно, чтобы процесс был прекращён непосредственно после удаления оксидов с поверхности заготовки, так как продолжение травления приведёт к растравливанию и неоправданным потерям основного материала. В результате травления получают слегка шероховатую поверхность. Такая поверхность пригодна для нанесения на неё покрытия и обеспечивает хорошее сцепление покрытия с основным металлом.

Чрезмерно растравленная заготовка имеет чёрную глубоко изъеденную поверхность.

При катодном травлении заготовку подключают к отрицательному полюсу источника тока, а анодом становится свинцовая пластина. Катодное травление происходит за счёт химического восстановления металла из окиси железа и механического отрыва окислов выделяющимся водородом. Этот метод травления позволяет полностью защитить металл от растравливания. Однако при катодном травлении возможно насыщение обрабатываемой поверхности водородом и появление так называемой водородной хрупкости заготовки.

Травление цветных металлов производят как для окончательной отделки поверхности заготовки с последующим её пассивированием или лакированием, так и для подготовки поверхности к нанесению гальванического покрытия.

### **5.1.2. Комбинированные методы электрохимической размерной обработки**

В группе комбинированных методов ЭХРО наибольшее распространение получили методы анодно-механической обработки и электрохимического шлифования.

*Анодно-механическая обработка* — метод обработки металлов комбинированным электрохимическим и электроэрозионным воздействием электрического тока на заготовку в среде электролита в сочетании с механическим удалением продуктов электроэрозии и анодного растворения с обрабатываемой поверхности. При анодно-механической обработке заготовка принимается за анод, а инструмент — за катод.

При протекании постоянного электрического тока через электролит происходит анодное растворение поверхности заготовки с образованием на обрабатываемой поверхности вязкой плёнки продуктов растворения. Одновременно с этим идёт электрическая эрозия обрабатываемой поверхности. Продукты электроэрозии и анодного растворения удаляются из зоны обработки механически движущимся

металлическим электродом-инструментом и выносятся из рабочей зоны потоком электролита. Анодно-механическим способом обрабатывают заготовки из токопроводящих высокопрочных и труднообрабатываемых металлов и сплавов, вязких материалов.

В зависимости от назначения обработки и формы обрабатываемой поверхности в качестве инструмента используют металлические диски, цилиндры, ленту, проволоку. Обработку ведут в среде электролита, которым чаще всего служит водный раствор жидкого натриевого стекла ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Заготовке и инструменту задают такие же движения, как при аналогичной по цели механической обработке резанием. Электролит подают в зону обработки через сопло.

На основе метода анодно-механической обработки разработаны схемы выполнения различных видов работ (рис. 5.6). Этим методом заготовки нарезают на части, прорезают в них пазы и щели (рис. 5.6, а), обтачивают фасонные (рис. 5.6, б) цилиндрические (рис. 5.6, в) поверхности тел вращения.

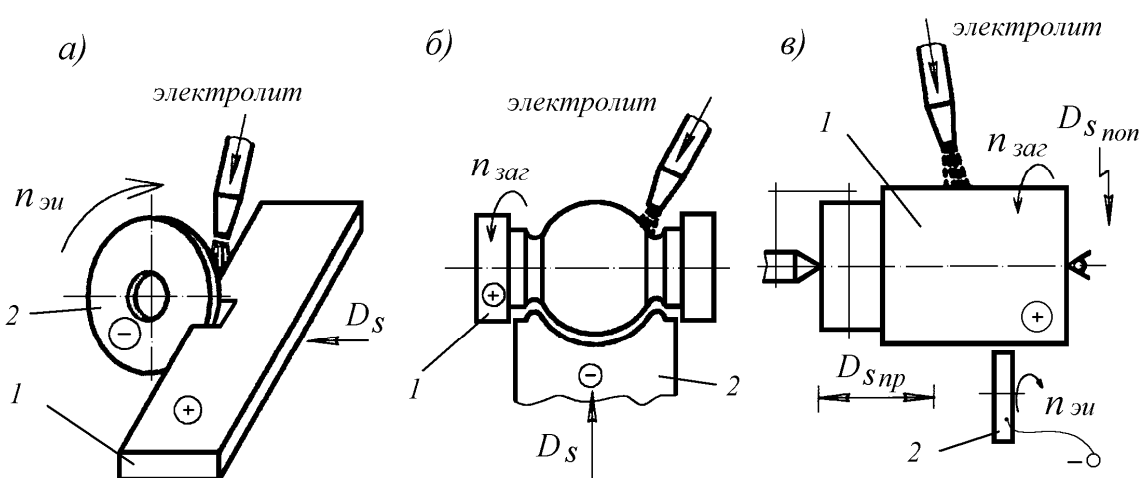


Рис. 5.6. Схемы анодно-механической резки (а), анодно-механического фасонного точения (б) и анодно-механического точения цилиндрической поверхности (в): 1 — заготовка; 2 — электрод-инструмент

**Электрохимическое шлифование и заточка режущего инструмента.** На рис. 5.7, а приведена схема электрохимического шлифования плоской поверхности заготовки 1. Особенностью реализации обработки данным методом является то, что припуск с заготовки удаляется путём электрохимического растворения её материала и

последующего удаления образовавшихся продуктов с поверхности заготовки абразивными зёрнами шлифовального круга 2.

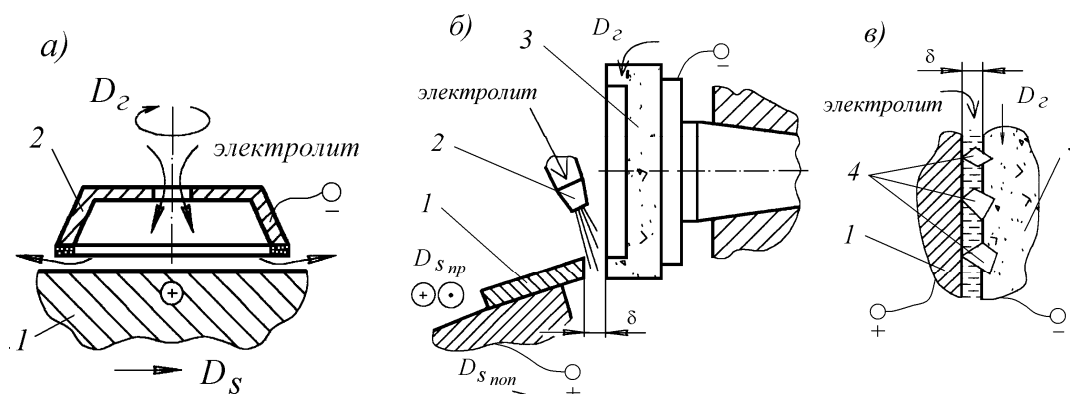


Рис. 5.7. Схемы электрохимического шлифования (а), электрохимической заточки резца (б) и зоны обработки (в)

Шлифовальный круг выступает при этом способе электрохимической обработки и как электрод-инструмент, и как абразивный инструмент. В связи с этим его изготавливают из абразивного материала с токопроводящей связкой. Материалами абразивных зёрен инструментов чаще всего принимают электрокорунд, синтетический алмаз или кубический нитрид бора. Токопроводящим наполнителем абразивного круга является смесь медного и железного порошков. Для кругов на бакелитовой связке в качестве наполнителя используют графит.

Электрохимическое шлифование осуществляется при межэлектродных зазорах  $\delta$ , исчисляемых сотыми, а иногда и тысячными долями миллиметра. При таких малых  $\delta$  технически сложно осуществить смену электролита прокачкой его через МЭП. Поэтому обновление электролита в зоне обработки осуществляется главным образом за счёт захватывания его быстро перемещающейся поверхностью абразивного круга.

При электрохимическом шлифовании достигается шероховатость поверхности с параметром  $Ra = 1,6 \dots 2,5$  мкм, а при использовании алмазных инструментов можно снизить значения  $Ra$  до  $0,08 \dots 1,25$  мкм.



Производительность электрохимической абразивной обработки можно повысить введением в зону обработки ультразвуковых колебаний. Такой способ обработки называют ультразвуковым электрохимическим шлифованием.

Электрохимическое шлифование применяют при отделочной обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов, а также нежестких заготовок, так как силы резания здесь значительно меньше, чем при использовании традиционных методов шлифования. Одним из достоинств электрохимического шлифования является также отсутствие прижогов на обработанной поверхности.

*Метод электрохимического шлифования широко применяют при заточке режущего инструмента.* На рисунке 5.7, б представлена схема заточки задней грани лезвия токарного резца 1 (рис. 5.7, б). Заточка осуществляется вращающимся ( $D_2$ ) шлифовальным кругом 3. Резец совершает возвратно-поступательное движение продольной подачи  $D_{сп}$  и постепенно перемещается в направлении шлифовального круга с движением подачи  $D_{сон}$ . В межэлектродный промежуток  $\delta$  между резцом 1 и шлифовальным кругом 3, образованный выступающими зёрнами 4 (рис. 5.7, в), через сопло 2 подают электролит. В результате анодного растворения материала на рабочей поверхности лезвия резца образуются оксидные плёнки, которые легко удаляются абразивными зёрнами.

Особенностью электрохимической обработки является появление на окончательно обработанной поверхности заготовки остатков оксидных плёнок и концентраторов напряжений в виде микротрещин по границам растравленных зёрен. В связи с этим при выполнении отделочных операций электрохимическим шлифованием на окончательной стадии обработки отключают электрический ток и завершают удаление припуска только абразивным путём, удаляя тем самым дефектный слой с растравленными межкристаллитными границами и возникшими микротрещинами.

## 5.2. МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Электрохимические методы отделочной обработки относят к группе методов ЭХО, осуществляемых со съёмом материала заготовки и используемых на завершающих этапах технологического процесса изготовления изделия. Цели применения методов данной группы состоят в улучшении качества обрабатываемых поверхностей заготовки и придания им особого вида, обеспечивающего выполнение эстетических и санитарно-гигиенических требований. Типовыми электрохимическими методами отделочной обработки являются: электрохимическое хонингование, электрохимическое суперфиниширование, электрохимическое удаление заусенцев на пересечении наружных и внутренних поверхностей, электрохимическое полирование и электрохимическое абразивное полирование. Каждый из указанных технологических методов решает определённый круг технологических задач в рамках общей цели улучшения качества обработанной поверхности.

### 5.2.1. Отделочные методы, реализуемые на основе анодного растворения поверхности заготовки

*Электрохимическое полирование* выполняют в ванне 3, наполненной непроточным электролитом (рис. 5.8). В зависимости от материала заготовки электролитами выбирают водные растворы кислот или щелочей.

Обрабатываемую заготовку 1 подсоединяют к положительному полюсу источника тока, катод-инструмент 2 располагают в ванне на расстоянии межэлектродного зазора  $\delta$  от обрабатываемой поверхности заготовки. Изготавливают катод из свинца,

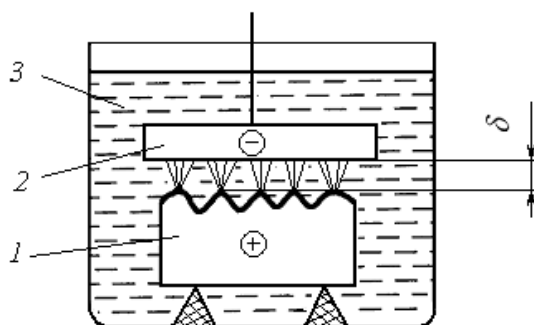


Рис. 5.8. Схема электрохимического полирования

меди или нержавеющей стали. Для большей интенсивности процесса электролит подогревают до температуры 40–80 °С.

При подаче напряжения на электроды начинается растворение материала заготовки – анода. Растворение происходит главным образом на выступах микронеровностей поверхности. Полирование осуществляют в режиме пассивации поверхности анода. При режиме пассивации на аноде образуется труднорастворимая плёнка солей, которая резко снижает скорость электрохимического растворения основного металла. В связи с тем, что толщина пассивирующей плёнки на микровыступах шероховатости поверхности меньше, чем во впадинах, скорость растворения выступов больше. Ускорению процесса растворения микровыступов способствует и то, что они являются концентраторами электрического заряда, а потому химические реакции на микровыступах активизированы. В результате преимущественного растворения микровыступов обрабатываемой поверхности происходит сглаживание микронеровностей до шероховатости с параметром  $Ra = 0,025$  мкм при исходном значении  $Ra \leq 3,2$  мкм. Обработанная поверхность приобретает металлический блеск.

Электрохимическое полирование сохраняет в поверхностном слое механические характеристики основного материала заготовки. Поверхностный слой обрабатываемой заготовки не подвергается деформированию, исключаются упрочнение и термические изменения структуры, снижается коэффициент трения на обработанной поверхности. В связи с малой интенсивностью процесса (малые плотности тока) и наличием во впадинах поверхностного слоя пассивирующей плёнки при полировании не происходит появления в поверхностном слое микротрещин, свойственных интенсивным процессам электрохимической обработки. Коррозионная стойкость деталей повышается.

Этим методом подготавливают поверхности заготовок перед нанесением гальванических покрытий, доводят рабочие поверхности режущего инструмента, очищают и декоративно отделывают детали.

**Электрохимическое удаление заусенцев.** Электрохимическое удаление заусенцев осуществляют без относительных движений

электрода-инструмента и заготовки (рис. 5.9). Локализация процесса растворения в требуемых местах достигается выбором формы электрода-инструмента, обеспечивающей наименьшие МЭП в тех местах, где необходим максимальный съём материала. Электрод-инструмент 2 подводят непосредственно к той кромке заготовки 1, на которой находится заусенец 3. При включении тока и пропускании через МЭП электролита происходит концентрация электрического заряда на остриях заусенца. За счёт этого, а также из-за значительной разницы между межэлектродным зазором в зоне заусенца и на других участках заготовки преимущественно растворяется заусенец.

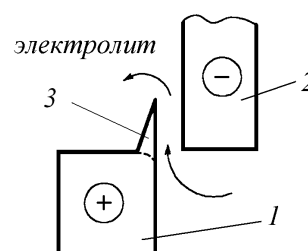


Рис. 5.9. Схема электрохимического удаления заусенца

Удаление заусенцев может регулироваться длительностью обработки вплоть до округления острой кромки. Локализацию электрохимического воздействия при удалении заусенцев обеспечивают созданием оснастки и катодных устройств, защищающих необрабатываемые поверхности заготовки от попадания на них электролита.

### 5.2.2. Комбинированные методы электрохимической отделочной обработки

В группу этих методов включают главным образом электрохимическое хонингование и электрохимическое суперфиниширование.

**Электрохимическое хонингование** — хонингование с использованием электрохимического растворения материала (рис. 5.10).

Используемый при электрохимическом хонинговании (рис. 5.10, а) электрод-инструмент (хон) мало отличается по конструкции от хона, используемого при хонинговании, реализуемого методом резания. Катодом при электрохимическом хонинговании служит корпус хонинговальной головки 3, имеющий меньший диаметр, чем диаметр обрабатываемого отверстия, на удвоенную величину межэлектродного

зазора. В корпус головки врезаны непроводящие ток бруски 2, изготавливаемые чаще всего из дерева или пластмассы.

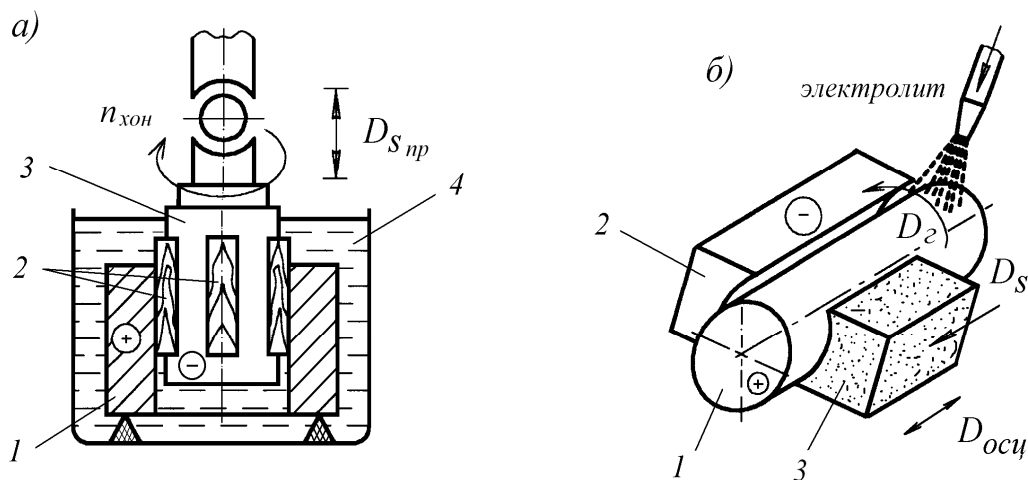


Рис. 5.10. Схемы электрохимического хонингования (а) и электрохимического суперфиниширования (б)

Электрод-инструмент (хон) вращается с частотой  $n_{хон}$  и совершает относительно заготовки возвратно-поступательное движение  $D_{спр}$ . Заготовка устанавливается в ванне с электролитом 4 либо электролит прокачивают через МЭП между хонем и заготовкой. Съем металла с обрабатываемой поверхности происходит за счет электрохимического растворения материала и удаления образующихся продуктов абразивным воздействием брусков хона. Чтобы это удаление было более эффективным, в электролит добавляют абразивный порошок.

Электрохимическое хонингование используют для обработки точных цилиндрических отверстий. Диапазон размеров хонингуемых отверстий очень широк: по диаметру — от 5 до 800 мм, по длине — до 20 м. Используется этот метод также для подготовки поверхности под нанесение на неё гальванического покрытия.

Электрохимическим хонингованием обеспечивают примерно одинаковые параметры точности обработки и шероховатости поверхности, что и при обычном хонинговании: качества точности размеров — 6...8, а шероховатость поверхности —  $Ra = 0,1...1,6$  мкм. В то же время по сравнению с обычным хонингованием этот метод обладает рядом преимуществ. Производительность по съему металла при реализации метода электрохимического хонингования в 4–8 раз выше

и не зависит от твёрдости и прочности обрабатываемого материала, а обеспечиваемая точность достигается быстрее. Так как процесс ведётся при небольших давлениях брусков, электрохимическим хонингованием можно обрабатывать заготовки пониженной жёсткости. Экономический эффект электрохимического хонингования тем больше, чем выше припуски на обработку и чем хуже обрабатываемость материала методом резания.

После электрохимического хонингования наблюдается «растравливание» поверхностного слоя металла по границам зёрен на глубину до 3...4 мкм. Поэтому обязательным этапом процесса является обработка выхаживанием с выключенным током при завершении процесса в течение нескольких секунд, что позволяет удалить растравленный слой абразивным способом.

**Электрохимическое суперфиниширование** — суперфиниширование с использованием в качестве дополнительного воздействия на заготовку электрохимического растворения материала. Схема электрохимического суперфиниширования представлена на рис. 5.10, б. Абразивное воздействие на заготовку 1 при реализации данного метода обработки оказывает абразивный брусок 3. Брусок, изготовленный из алмазного порошка зернистостью М7...М10, прижимают к поверхности заготовки с силой 1,5...3,5 МПа и придают ему колебания (движение  $D_{ocu}$ ) с частотой 500...800 ходов в минуту. Одновременно с колебаниями брусок перемещается вдоль оси заготовки (движение  $D_s$ ). Для осуществления электрохимического растворения поверхностного слоя заготовки с противоположной стороны от абразивного бруска установлен катод 2, а заготовка подключена к положительному полюсу источника питания. Между заготовкой и электродом-катодом устанавливается межэлектродный зазор, через который прокачивается электролит. Катод в процессе обработки остается неподвижным.

В результате электролиза во впадинах и на вершинах микронеровностей обрабатываемой поверхности образуется пассивная плёнка. Эта плёнка удаляется абразивным бруском преимущественно на

микровыступами поверхности заготовки. В результате совместного воздействия на заготовку электрохимического растворения и абразивного инструмента удаление припуска ускоряется по отношению к традиционному суперфинишированию, осуществляемому только абразивными брусками, при сохранении примерно таких же показателей точности размеров, шероховатости и качества поверхности.

Одновременно со снижением шероховатости поверхности происходит незначительное уточнение формы в продольном и поперечном сечениях заготовки. Использование электрохимического суперфиниширования позволяет при большей производительности, чем при суперфинишировании резанием, расширить перечень материалов, которые можно обрабатывать этим методом. Наибольшее повышение производительности обработки достигается при электрохимическом суперфинишировании вязких материалов.

*Электрохимическое абразивное полирование* является комбинированным методом отделочной электрохимической обработки. Заготовку подвергают одновременно электрохимическому и механическому воздействиям. Физико-химическую основу данного метода составляют образование оксидных плёнок на микровыступами поверхности заготовки в процессе электрохимического растворения материала и последующее их удаление полировальником, перемещающимся в электролите относительно заготовки. Для интенсификации процесса удаления оксидных плёнок в электролит вводят абразивные микропорошки. Материал порошка определяется маркой материала заготовки. Чаще всего с этой целью используют оксид хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Электрохимическое абразивное полирование применяют для полирования заготовок, изготовленных из труднообрабатываемых сталей и сплавов. Такие материалы образуют на поверхности при электрохимическом полировании труднорастворимые оксидные плёнки, что значительно снижает производительность обработки заготовок электрохимическим полированием без дополнительного абразивного воздействия или просто приводит к прекращению процесса анодного растворения. Механизм образования и удаления плёнок на

поверхности заготовки электрохимическим абразивным полированием аналогичен процессам, проходящим при химическом полировании поверхности заготовки. Различие между ними состоит в том, что плёнки формируются не в процессе химических реакций, а путём электрохимического растворения материала.

В конце операции полирования источник питания отключают и выполняют несколько рабочих ходов полировальником без тока для предотвращения растравливания поверхностного слоя. При этом с обрабатываемой поверхности удаляется характерная для ЭХО тонкая плёнка, а сама поверхность приобретает металлический блеск.

Шероховатость поверхности, получаемая электрохимическим абразивным полированием, так же как и после электрохимического полирования, соответствует  $Ra = 0,025 \dots 0,04$  мкм.

### 5.3. ЭЛЕКТРОЛИТЫ

При электрохимической обработке в качестве электролитов применяют водные растворы солей, кислот и щелочей. Электролиты обеспечивают прохождение электрического тока в системе и требуемых химических реакций на поверхностях электродов. Протекая через МЭП, электролит уносит продукты растворения, поддерживая тем самым постоянство концентрации взаимодействующих частиц на всех участках межэлектродного промежутка.

**Требования к электролитам.** Для получения высоких технико-экономических показателей ЭХО необходимо подобрать электролит, отвечающий следующим требованиям к его составу:

— компоненты электролита, растворяемые в воде, должны хорошо диссоциировать на анионы и катионы при всех возможных вариациях технологических параметров обработки, что должно обеспечить высокую электропроводность электролита;

— электродный потенциал материала электрода-инструмента, являющегося анодом, должен быть более положителен, чем электродный потенциал катионов электролита. Это предотвращает осаждение катионов металла на электрод-инструмент и не приводит к



изменению его формы, то есть не снижает точности воспроизведения на заготовке формы электрода-инструмента;

— должны быть полностью или частично исключены побочные реакции на электродах, снижающие выход по току;

— на всех участках обрабатываемой поверхности заготовки должна быть обеспечена равная расчётная плотность электрического тока;

— анодное растворение металла заготовки должно проходить только в зоне обработки, для чего электролит должен обладать высокими локализирующими свойствами;

— в электролите должны присутствовать активирующие анионы, способные под воздействием тока разрушать поверхностные оксидные плёнки и тем самым обеспечивать преимущественное протекание на аноде реакции растворения;

— электролит должен иметь невысокую вязкость, облегчающую его прокачку через МЭП и ускоряющую тепло- и массоперенос;

— электролит должен быть безвредным для обслуживающего персонала, взрыво- и пожаробезопасным, а также должен обладать невысокой коррозионной активностью.

Электролитов универсального назначения, обеспечивающих выполнение всех перечисленных и ряда дополнительных специальных требований, создать практически невозможно. Состав и концентрацию электролита в связи с этим подбирают в зависимости от физико-химических свойств материала обрабатываемой заготовки с учётом технических требований, предъявляемых к выполняемой операции. Так, если необходимо увеличить скорость растворения, берут электролиты с большей удельной электропроводностью, а для повышения точности обработки используют электролит с пониженной электропроводностью.

**Составы электролитов.** Электролиты могут состоять из одного или нескольких компонентов (однокомпонентные и многокомпонентные электролиты).

Наиболее распространёнными электролитами являются нейтральные растворы неорганических солей: хлориды, нитраты и сульфаты натрия и калия:  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KCl}$ . Электролиты на основе этих солей хорошо диссоциируют на ионы, имеют малую вязкость, безопасны в работе.

В целях повышения эффективности обработки в электролит вводят разнообразные по функциям добавки: токопроводящие, буферные, поверхностно-активные вещества; вещества, снижающие гидравлические потери и устраняющие кавитационные явления, депассивирующие вещества и коагуляторы.

Токопроводящие добавки не участвуют в реакциях, но являются дополнительным переносчиком электричества. Буферные добавки служат для регулирования концентрации в электролите гидроксид-ионов  $\text{OH}^-$ . Депассивирующие добавки предохраняют анод от образования на нём оксидных плёнок. Коагуляторы способствуют скорейшей очистке электролита за счёт ускорения осаждения шлама. В качестве коагулятора используют добавку в электролит 1...5 г/л полиакриламида (общая формула  $(-\text{CH}_2\text{CHCONH}_2-)_n$ ).

Для обработки стальных заготовок в качестве электролитов преимущественно используют водные растворы хлорида натрия с концентрацией 8...18 % или нитрата натрия с концентрацией от 15 до 20 %. В качестве антикоррозионного вещества при обработке низколегированных сталей в электролит добавляют 0,02...0,03 % нитрита натрия.

Титановые сплавы обрабатывают в растворах хлорида натрия (концентрация — 5...15 %) с добавкой 3...10 % бромиды калия при нормальной или повышенной (310...330 К) температуре. В случае обработки алюминиевых сплавов используют растворы нитрата натрия (концентрация — 10...25 %) с добавкой 1...3 % лимонной кислоты.

**Характеристики электролита.** К важнейшим характеристикам электролита кроме его состава относят концентрацию электролита, электропроводность, водородный показатель и температуру.

*Концентрация электролита* — количественный показатель, характеризующий количественное или процентное содержание его компонентов в воде. Процентный показатель концентрации равен отношению массы компонентов, введённых в раствор, ко всей массе раствора; объёмный — количество растворённых компонентов в единице объёма электролита.

Электролиты, созданные на основе солей, при определённой концентрации становятся насыщенными. Дополнительное (сверх предела насыщения) введение в электролиты компонентов вызывает возникновение в них солей, находящихся в кристаллическом состоянии. Наличие твёрдых частиц в электролитах приводит к нестабильности процессов ЭХО и к преждевременному износу оборудования.

*Электропроводность электролита* ( $G_{эл}$ ) — важнейшая характеристика, отражающая способность электролита проводить электрический ток. Электропроводность  $G_{эл}$  (См) является величиной, обратной его электрическому сопротивлению  $G_{эл} = 1/R_{эл}$ , где  $R_{эл}$  — электрическое сопротивление электролита, Ом.

При расчётах режимов ЭХО удобно пользоваться значением удельной электропроводности электролита  $\gamma_{эл}$  (См/м), определяемой по формуле

$$\gamma_{эл} = 1/\rho_{у.эл} = \frac{\ell_{эл}}{R_{эл} S_{эл}}, \quad (5.2)$$

где  $\rho_{у.эл}$  — удельное электрическое сопротивление электролита, Ом · м;  $S_{эл}$  — площадь поперечного столба электролита, м<sup>2</sup>;  $\ell_{эл}$  — ширина столба электролита (межэлектродный зазор), м.

Электропроводность электролита зависит от концентрации растворённых в нём компонентов и его температуры  $\theta_{эл}$ . С повышением концентрации электролитов их электропроводность возрастает. Однако при достижении предельной концентрации значение электропроводности электролитов несколько снижается.

Удельная электропроводность водных растворов солей (См/м) растёт и с ростом температуры  $\theta_{эл}$ . При повышении температуры электролита на 1 °С  $\gamma_{эл}$  водных растворов солей возрастает на 2...2,5 %,

водных растворов кислот — на 1...1,65 %, а водных растворов щелочей — на 2...3 %.

*Водородный показатель* ( $pH$ ) электролитов — число, характеризующее концентрацию ионов водорода в данном электролите. Водородный показатель ( $pH$ ) определяют по формуле

$$pH = -\lg[H^+], \quad (5.3)$$

где  $[H^+]$  — концентрация ионов водорода в электролите, моль/л.

В нейтральной среде концентрации ионов водорода  $H^+$  и гидроксил-ионов  $OH^-$ , образующихся при диссоциации молекул воды, одинаковы и составляют:  $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$  моль/литр воды. Поэтому для нейтральных сред  $pH = 7$ . Для кислой среды, в которой концентрация ионов водорода  $H^+$  больше чем гидроксил-ионов,  $pH < 7$ , а для щелочной —  $pH > 7$ . Чем больше  $pH$  отличается от 7, тем больше при прочих равных условиях электропроводность раствора.

Отклонение  $pH$  относительно оптимального значения при выполнении определённой операции ЭХО, как правило, приводит к снижению точности обработки и качества обработанных поверхностей заготовки. Эти отклонения являются следствием электрохимических и химических реакций, происходящих в межэлектродном промежутке.

Значения  $pH$  для различных электролитов колеблются в следующих пределах: для растворов кислот — 1...7, растворов солей — 6...9, растворов щелочей — 7...10.

При ЭХО нержавеющей и инструментальной сталей  $pH$  электролита поддерживают в пределах 7...8, а при ЭХО жаропрочных сплавов — в пределах 7...9. Повышение значения  $pH$  больше определённого критического его значения  $(pH)_{кр}$  приводит к пассивации электрода-катода и резкому падению плотности тока в растворе. Электрохимическая обработка становится невозможной.

В процессе обработки электролит насыщается отходами процесса — шламом, изменяет состав, в результате чего производительность обработки падает. Для восстановления его свойств необходимо постоянно очищать электролит от шлама. С этой целью разработаны и

широко используются следующие методы: *центрифугирование* — отделение шлама от раствора под воздействием центробежных сил; *фильтрование* — отделение твёрдых частиц с помощью пористых материалов; *отстаивание* загрязнённого электролита в специальных резервуарах; *флотацию* — очистку всплывших вместе с пузырьками водорода, выделяющегося при ЭХО, твёрдых частиц шлама. Для удержания частиц шлама на поверхности электролита в последний добавляют пенообразующее натриевое мыло (0,4 г на 1 литр электролита).

**Способы подачи электролита в межэлектродный промежуток.** Электрохимическую размерную обработку выполняют в стационарном или проточном электролите. В стационарном электролите производят, в частности, электрохимическое маркирование и полирование, при проведении которых образуется небольшой объём технологических отходов – продуктов эрозии. Проточный электролит применяют при необходимости удаления из зоны обработки продуктов электролиза. Этим способом осуществляют анодно-механическую обработку, электрохимическое разрезание, электрохимическое объёмное копирование (образование трёхмерных поверхностей копированием формы электрода-инструмента) и все виды электрохимической абразивной обработки. При проектировании схемы обработки и электрода-инструмента необходимо предусмотреть, чтобы электролит через МЭП протекал плавно без резких поворотов, поскольку это приводит к срывам потока и появлению необработанных участков.

На практике реализуют различные схемы прокачки электролита через МЭП. Наиболее распространёнными среди них являются схемы прямой прокачки электролита через электрод-инструмент (рис. 5.11, *а*), прямой прокачки с противодавлением (рис. 5.11, *б*), обратной прокачки (рис. 5.11, *в*) и тангенциальной (боковой) подачи электролита (рис. 5.11, *г*). Если формируемая на заготовке полость имеет значительную глубину и сложный аэродинамический профиль, то электролит обычно подают через отверстие в электроде-инструменте *1* (см. рис. 5.11, *а*, *б*, *в*). Недостатком этого способа является сложность

изготовления электродов-инструментов и необходимость последующей обработки участка поверхности детали напротив щели — там остаются выступы высотой до 1 мм.

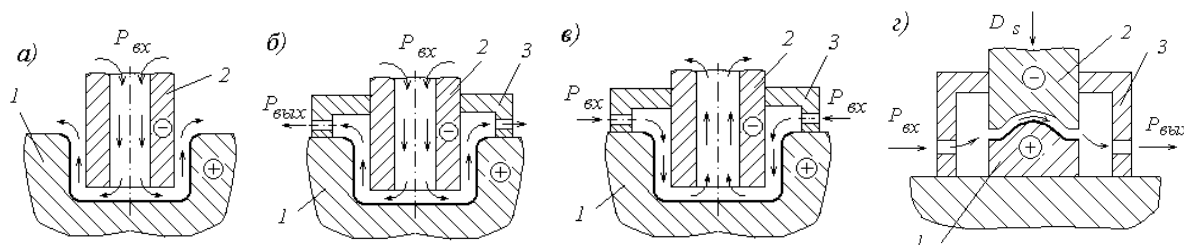


Рис. 5.11. Схемы прокачки электролита через межэлектродный промежуток

Схему боковой подачи электролита в МЭП применяют при обработке неглубоких (до 10...15 мм) полостей в случае небольшого (до 100...150 мм) пути протекания электролита и плавного аэродинамического профиля обрабатываемой поверхности (рис. 5.11, г). К деталям, при обработке которых реализуется эта схема, относят лопадки газотурбинных двигателей, ковочные штампы с неглубоким профилем.

Правильный выбор схемы прокачивания электролита во многом предопределяет технико-экономические показатели ЭХРО. Экспериментальные данные по выходным характеристикам процесса с использованием указанных на рисунке 5.11 схем приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Характеристики электрохимической размерной обработки с использованием различных схем прокачки электролита

Схема прокачки электролита	Точность воспроизведения формы	Качество обработанной поверхности	Устойчивость процесса
Прямая	средняя	средняя	средняя
Прямая с противо-давлением	очень хорошая	очень хорошая	небольшая
Обратная	средняя	хорошее	-
Тангенциальная (боковая)	хорошая	хорошее	-

## 5.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### 5.4.1. Напряжение на электродах

Напряжение, подаваемое на электроды  $U$ , (В), определяется как сумма эффективного напряжения, непосредственно затрачиваемого на анодное растворение  $U_{эл}$ , потери напряжения в двойных электрических слоях катода и анода  $\Delta U$  и потери напряжения при прохождении электрического тока через заготовку  $\Delta U_3$ :

$$U = U_{эл} + \Delta U + \Delta U_3, \quad (5.4)$$

Потери напряжения в заготовке  $\Delta U_3$  принимают во внимание только тогда, когда заготовка имеет большие размеры, а её конструкция не позволяет разместить токопроводы вдоль всей длины. В этом случае  $\Delta U_3$  находится в диапазоне 4...5 В, и его следует учитывать в расчётах.

Потери напряжения в двойном электрическом слое  $\Delta U$  определяют как разность электродных потенциалов анода  $\varphi_a$  и катода  $\varphi_k$  с учётом значений их поляризации при прохождении электрического тока.

$$\Delta U = \varphi_a - \varphi_k = (\varphi_{ap} + \Delta \varphi_a) - (\varphi_{kp} + \Delta \varphi_k). \quad (5.6)$$

При отсутствии точных данных по значениям  $\varphi_a$  и  $\varphi_k$  с достаточной для практических расчётов точностью принимают  $\varphi_a = 2,5...4$  В и  $\varphi_k = -1,5$  В.

Процесс электрохимического растворения начинается, как правило, при значениях  $U$ , превышающих суммарный потенциал поляризации электродов  $\Delta U$ . На практике это соответствует примерно значению  $U_{эл}$  более 3...5 В. Большинство операций ЭХРО осуществляется при  $U = 9...12$  В; при обработке титановых сплавов — 18...30 В. Превышение значения более 30 В приводит к возникновению электрического пробоя межэлектродного промежутка.

Напряжение, необходимое для прохождения тока в электролите, а соответственно для осуществления анодного растворения, определяется формулой

$$U_{эл} = I \times R_{эл},$$

где  $I$  — сила тока в электролите, А.

При этом сопротивление электролита рассчитывается по формуле

$$R_{эл} = \frac{\delta}{\gamma_{эл} S}, \quad (5.7)$$

где  $\gamma_{эл}$  — удельная электропроводность электролита, См/м;  $\delta$  — межэлектродный зазор, м;  $R_{эл}$  — сопротивление электролита в МЭП, Ом;  $S$  — площадь обработки, м<sup>2</sup>.

Исходя из этого эффективное напряжение, затрачиваемое непосредственно на анодное растворение  $U_{эл}$  (В), можно определить по формуле

$$U_{эл} = \frac{I \delta}{\gamma_{эл} S}. \quad (5.8)$$

Возможность использования представленных формул для расчёта значения напряжения  $U$ , которое нужно подать на электроды для реализации процесса ЭХРО, затруднено в связи со сложным характером процессов поляризации электродов при прохождении тока и нелинейным характером изменения в связи с этим значения составляющей  $\Delta U$ . Учёт этих изменений проводят на основе изучения поляризационных катодной и анодной кривых, устанавливающих связь между напряжением  $U$ , подаваемым на электроды, и силой тока  $I$  в электролите.

#### **5.4.2. Сила тока в электролите и анодная поляризационная кривая**

Зависимость силы тока  $I$  в электролите от напряжения  $U$  на электродах при электролизе имеет сложный характер. Связано это с тем, что процесс электролиза, как это показано в разделе 4.1, не является одномоментным актом, а состоит из последовательно проходящих физико-химических процессов, называемых стадиями. Каждая стадия характеризуется определённой скоростью, зависящей от напряжения на электродах. От этого напряжения существенно зависят и соотношения между скоростями процессов на отдельных стадиях.



В связи с этим скорость анодного растворения материала  $v_p$  устанавливается равной скорости прохождения процесса на той её стадии, скорость которой наименьшая. Поскольку скорости прохождения стадий электролиза существенно меняются и по величине, и по соотношению в зависимости от прикладываемого к электродам напряжения, вид зависимости  $I - U$  может существенно изменяться при изменении значения  $U$ .

Для описания зависимости силы тока  $I$  в электролите от напряжения на электродах  $U$  используют поляризационные катодные и анодные кривые. Вид поляризационной кривой зависит от материала электрода и условий проведения электролиза. На рис. 5.12 приведена

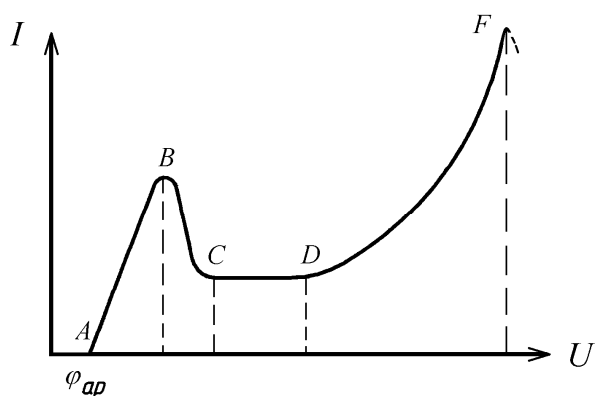


Рис. 5.12. Обобщённая анодная поляризационная кривая

обобщённая *анодная поляризационная кривая*, учитывающая все возможные виды и стадии протекания процессов электрохимического растворения анода при электрохимической обработке, свойственные анодам, изготовленным из разных металлов.

Участок  $AB$  на обобщённой поляризационной кривой называют активной областью ЭХРО. Точка  $A$  этой кривой соответствует равновесному электрическому потенциалу на аноде  $\varphi_{ар}$ , при достижении которого начинается электролиз. При значениях напряжения на электродах, соответствующих участку  $AB$ , происходит растворение материала анода. Однако сила тока здесь незначительна, а потому высокой скорости анодного растворения  $v_p$  в этой зоне достичь не удаётся. Из-за низкой производительности область напряжений на участке  $AB$  используется редко.

При напряжениях на электродах, соответствующих точке  $B$ , на поверхности анода начинают образовываться устойчивые оксидные плёнки. Толщина этих плёнок на участке напряжений  $BC$

растёт с ростом напряжения  $U$  на электродах. Появление анодных плёнок вызвано тем, что скорость образования продуктов анодного растворения при данном режиме обработки превышает скорость их удаления с поверхности заготовки и перехода в электролит. Плохо растворимые соединения вблизи анода и на его поверхности накапливаются и препятствуют взаимодействию электрода с электролитом. Сопротивление прохождению тока в связи с этим по мере роста напряжения возрастает, а сила тока  $I$  в электролите падает. Эти процессы вызывают уменьшение скорости растворения анода. Явление образования оксидных плёнок на аноде получило название «пассивация анода».

Участок  $CD$  поляризационной кривой характеризуется равновесием между скоростями роста и растворения оксидной плёнки. При напряжениях  $\varphi_a$ , соответствующих этому участку, сила тока в электролите мала, процесс электрохимического растворения анода протекает медленно.

Дальнейшее увеличение потенциала анода (участок  $DF$ ) характеризуется разрушением оксидной плёнки, ростом силы тока и повышением скорости растворения анода. На этом участке можно получить большую силу тока  $I$  и соответственно высокую производительность обработки. Именно этот участок поляризационной кривой используют для ЭХРО. После прохождения точки  $F$  при обработке некоторых материалов может снова начаться уменьшение силы тока и наступить электрический пробой МЭП (короткое замыкание). Растворение анода при этом прекращается.

В ЭХРО используют разность потенциалов между электродами в диапазоне  $U = 6...30$  В, но при обработке струей электролита (струйная обработка, см. рис. 5.2, б) значения  $U$  повышают до  $100...800$  В. Для разных металлов и сплавов пассивация (точка  $B$  на рис. 5.12) наступает при различных напряжениях  $U$ , значения которых кроме того зависят от химического состава электролита, его температуры и условий течения жидкости в межэлектродном промежутке.

При обработке коррозионностойких сталей и некоторых сплавов пассивация поверхности заготовки вообще не наступает, а ток растёт с ростом  $U$  до электрического пробоя промежутка. Такие стали и сплавы называют слабо пассивирующимися. В противоположность им титан, вольфрам и ряд сплавов этих металлов характеризуются значительной пассивацией, что приводит к повышению энергоёмкости процесса ЭХРО, снижению производительности обработки и необходимости создания условий ЭХРО, затрудняющих образование пассивирующей плёнки.

В расчётах технологических параметров ЭХРО наряду с силой тока  $I$  часто используют характеристику «плотность тока»  $\rho_i$ , которая характеризует интенсивность энергетического воздействия на заготовку и не зависит от площади обрабатываемой поверхности:

$$\rho_i = I/S.$$

Обычно применяемые плотности тока находятся в диапазоне от 5 до 100 А/см<sup>2</sup>. При  $\rho_i < 5$  А/см<sup>2</sup> поверхность заготовки, как правило, покрывается прочной пассивной плёнкой и процесс прекращается. В области  $\rho_i > 100 \dots 200$  А/см<sup>2</sup> трудно стабилизировать состав и температуру электролита в зазоре (электролит быстро насыщается продуктами реакции). При  $\rho_i = 400 \dots 600$  А/см<sup>2</sup> наступают диффузионные ограничения: даже при наибольших возможных давлении и скорости прокачки электролита ионы растворившегося металла и газа не успевают отводиться от электродов и сила тока падает.

### 5.4.3. Скорость анодного растворения

Скоростью анодного растворения называют линейную скорость растворения вещества при электролизе  $v_p$  (м/с) в направлении движения подачи. Зависимость  $v_p$  от параметров процесса электролиза находят, используя первый закон Фарадея, следующим образом.

При прошивании отверстия диаметром  $D$  с непрерывным поступательным движением подачи электрода-инструмента  $D_s$  за время  $\tau$  электрод проходит в направлении движения подачи расстояние  $\ell$

(рис. 5.13). Скорость подачи электрода-инструмента  $v_s$  принимается постоянной.

При исходной площади прошиваемого отверстия  $S$  за время  $\tau$  будет растворён материал массой  $m_\phi$  равной

$$m_\phi = k_{\text{эx}} k_{\text{эм}} I \tau = \rho_m \ell S.$$

Отсюда, подставив в уравнение вместо  $I$  его величину из закона Ома  $U_{\text{эл}}/R_{\text{эл}}$ , можно получить среднюю скорость электрохимического растворения материала  $v_p$ :

$$v_p = \ell/\tau = k_{\text{эx}} k_{\text{эм}} U_{\text{эл}}/(R_{\text{эл}} \rho_m S).$$

В связи со сложным характером зависимости силы тока в электролите от напряжения на электродах  $U$  при расчёте скорости анодного растворения материала используют не значение напряжения на электродах, а падение напряжения в электролите  $U_{\text{эл}}$ .

После подстановки в полученную зависимость значения  $R_{\text{эл}}$  из формулы (5.7) будем иметь

$$v_p = k_{\text{эм}} k_{\text{эx}} \gamma_{\text{эл}} U_{\text{эл}}/(\rho_m \delta). \quad (5.9)$$

Из формулы (5.9) вытекает, что скорости анодного растворения материала при прочих равных условиях обработки на участках заготовки, характеризующихся разными межэлектродными зазорами, обратно пропорциональны величинам этих зазоров, то есть

$$v_{p1}/v_{p2} = \delta_2/\delta_1. \quad (5.10)$$

Отсюда же следует, что электрохимическое растворение анода происходит при любой величине зазора.

В зависимости от припуска и начального межэлектродного зазора средняя скорость растворения  $v_p$  в методах ЭХРО находится в пределах 0,001...0,01 мм/с.

Проведённые выкладки показывают, что для достижения максимальной скорости растворения и производительности ЭХРО следует

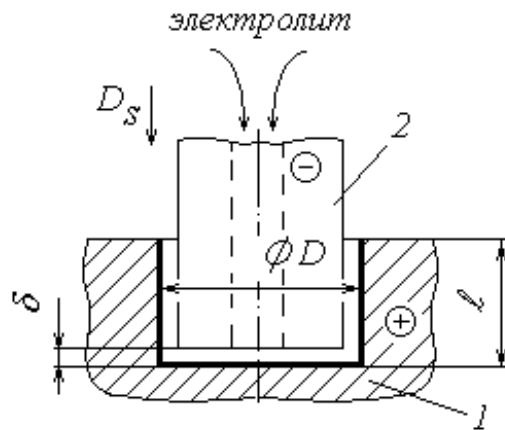


Рис. 5.13. Схема прошивания отверстия

работать с минимально возможным межэлектродным зазором. Однако при чрезмерно малом зазоре резко возрастает газонаполнение МЭП, затрудняется прокачка через него электролита и удаление из продуктов электролиза. В таких условиях производительность обработки падает.

Существует оптимальное значение межэлектродного зазора, которое в большинстве схем ЭХРО находится в диапазоне 0,1...0,5 мм. Значение этого зазора поддерживается при обработке движением подачи  $D_s$ , характеристикой которой является скорость подачи электрода-инструмента  $v_s$ . Скорость подачи электрода-инструмента  $v_s$  представляет собой элемент режима обработки и устанавливается на электрохимическом оборудовании исходя из того, что она не может превышать при принятых условиях обработки значения максимально возможной физической скорости растворения:  $v_s \leq v_p$ .

Использованием специальных схем реализации электрохимической обработки удалось уменьшить значения межэлектродного зазора до 1...10 мкм и тем самым создать возможность электроэрозионной обработки с высокими скоростями анодного растворения материала, обеспечивая при этом повышенные точностные показатели процесса. Такая технология получила название *технологии импульсной электрохимической обработки*, известной на производстве как *ЕТ-технология* [5]. Схема, особенности режима обработки и технологическое оснащение, применённые при создании ЕТ-технологий, раскрыты далее в разделах 5.4.4, 5.7.2 и 5.7.4.

#### **5.4.4. Способы регулирования межэлектродного зазора**

Электрохимическая размерная обработка может проводиться:

- 1) неподвижными электродом-инструментом и заготовкой,  $v_s = 0$  (рис. 5.14);
- 2) перемещающимся с постоянной скоростью движения подачи  $v_s$  электродом-инструментом (см. рис. 5.13);
- 3) с периодическим движением подачи электрода-инструмента или заготовки;

4) импульсно-циклическим способом управления процессом электролиза.

Реализация первого способа обработки характеризуется тем, что по мере анодного растворения заготовки и при сохранении исходного положения электрода-инструмента межэлектродный зазор увеличивается. Текущее его значение через промежуток времени работы  $\tau$  можно определить по формуле [2]:

$$\delta_{\tau} = \sqrt{\delta_0^2 + 2k_{эл}k_{вт}\gamma_{эл}U_{эл}\tau / \rho_m}, \quad (5.11)$$

где  $\tau$  — время обработки, мин;  $\delta_0$  — межэлектродный зазор в начале обработки, мм;  $\delta_{\tau}$  — межэлектродный зазор через промежуток времени  $\tau$ , мм.

С ростом межэлектродного зазора при неизменном положении электрода-инструмента скорость анодного растворения  $v_p$  будет падать. В соответствии с формулами (5.9) и (5.11) текущее её значение  $v_{p\tau}$  можно определить по формуле

$$v_{p\tau} = \frac{k_{эл}k_{вт}\gamma_{эл}U_{эл}}{\rho_m \sqrt{\delta_0^2 + 2k_{эл}k_{вт}\gamma_{эл}U_{эл}\tau / \rho_m}}. \quad (5.12)$$

В целом, способ обработки с неподвижным электродом прост в реализации, а поэтому используется в реальных электрохимических установках, несмотря на то, что он характеризуется меньшей скоростью растворения поверхности заготовки, чем скорость растворения материала, достигаемая при подвижном электроде-инструменте.

При реализации второго способа регулирования межэлектродного зазора устанавливают постоянную скорость подачи электрода-инструмента или заготовки  $v_s$ .

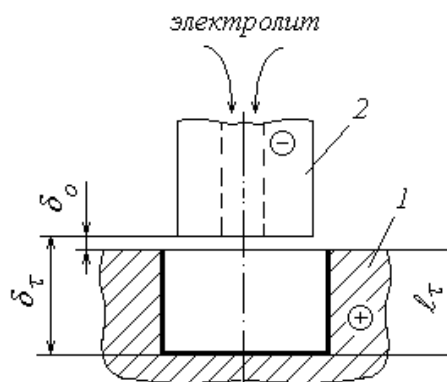


Рис. 5.14. Схема прошивания отверстия неподвижным электродом-инструментом

Если выбранная скорость подачи  $v_s$  меньше, чем скорость анодного растворения заготовки  $v_p$ , то исходный межэлектродный зазор постепенно увеличивается. Это приводит к снижению скорости удаления материала. В связи с этим через некоторое время скорость подачи электрода-инструмента и скорость растворения материала заготовки выровняются при увеличенном по отношению к исходному межэлектродному зазору, и режим станет стационарным.

При установке исходной скорости подачи инструмента  $v_s$  большей, чем скорость растворения материала  $v_p$ , также, как и для предыдущего способа организации обработки, происходит саморегулирование зазора. Однако межэлектродный зазор при данной схеме обработки в начале работы начинает уменьшаться, что приводит к возрастанию скорости растворения материала. При некотором значении уменьшившегося межэлектродного зазора процесс обработки может стать близким к стационарному, при котором скорости движения подачи и растворения выровняются:  $v_p = v_s$ , а межэлектродный зазор  $\delta_y$  примет значение, равное

$$\delta_y = \frac{k_{\text{вт}} k_{\text{эл}} \gamma_{\text{эл}} U_{\text{эл}}}{v_s \rho_m}. \quad (5.13)$$

Однако возможности такого саморегулирования процесса ограничены минимально допустимыми значениями межэлектродного зазора. Как ранее показано, в области чрезмерно малых значений зазора  $\delta$  ухудшаются условия протекания электролита через МЭП: нарастает сопротивление прокачке электролита, увеличивается наполнение газом межэлектродного зазора  $\delta$  и может произойти его электрический пробой. При этом скорость анодного растворения при дальнейшем сокращении величины зазора начинает падать. В этом случае процесс должен быть остановлен, а скорость движения подачи электрода-инструмента уменьшена.

Таким образом, максимально допустимые значения скорости подачи  $v_s$  электрода-инструмента при его непрерывном движении подачи ограничены минимально допустимыми значениями межэлектродного зазора  $\delta$ .

*Третий способ регулирования межэлектродного зазора* путём периодической коррекции его положения относительно заготовки реализуют следующим образом. Электрод-инструмент при выключенном токе подводят к заготовке до контакта, затем отводят его на расчётное значение (межэлектродный зазор  $\delta$ ) и подают напряжение на электроды от источника питания. Процесс электрохимического растворения осуществляют, оставляя электрод-инструмент неподвижным относительно заготовки. При обработке межэлектродный зазор постепенно увеличивается, а скорость растворения материала и производительность обработки уменьшаются.

Через небольшой промежуток времени процесс останавливают, повторяют корректировку зазора и вновь начинают обработку. Эту последовательность действий *в автоматическом режиме* периодически повторяют до окончания технологической операции. Изменение положения электрода-инструмента осуществляется через заданные небольшие промежутки времени (3...5 с) по команде управляющей программы.

*Импульсно-циклический способ регулирования межэлектродного зазора.* Современные системы управления электрохимическими станками широко используют для очищения МЭП от продуктов эрозии циклический способ ведения процесса, при котором один из электродов колеблется относительно неизменного положения, а другой совершает управляемое движение подачи. Частота колебаний изменяется на различных станках от нескольких герц до десятков килогерц. Под влиянием возвратно-поступательного движения электрода ускоряется вынос продуктов эрозии и подвод чистого электролита в зону анодного растворения.

Сочетание ведения процесса колеблющимся электродом-инструментом с импульсной подачей напряжения на электроды в период наиболее оптимальных значений межэлектродного зазора за период одного колебания электрода с контролем положения электрода, совершающего движение подачи, по моменту его касания с



колеблющимся электродом, получило название *импульсно-циклической обработки*.

Схема реализации одного из способов импульсно-циклической электрохимической обработки, применённого на станке СНЭ-20МК, приведена на рисунке 5.15. В основу функционирования работы электрохимического станка положена схема поперечной прокатки электролита через рабочую камеру.

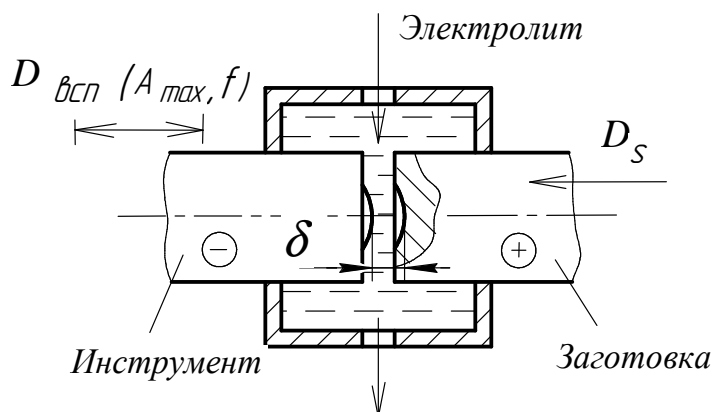


Рис. 5.15. Схема электрохимического формообразования поверхности импульсно-циклическим методом

Как следует из данной схемы, заготовка, являясь в электрической цепи анодом, совершает рабочее движение подачи  $D_s$  в направлении инструмента-катода. Катоду при обработке придают колебательные движения вдоль оси «инструмент — заготовка»  $D_{всп}$  относительно определённого фиксированного положения с частотой  $f$  и амплитудой  $A_{max}$ . В связи с колебаниями катода-инструмента межэлектродный зазор  $\delta$  за период колебания  $T$  изменяется по синусоидальному закону (рис. 5.16, а).

Это колебательное движение инструмента-катода синхронизировано во времени с временными параметрами цикла электрического режима обработки, описываемого графиком изменения напряжения на электродах  $U$ , представленного на рис. 5.16, б. Напряжение на электроды подаётся импульсами 2 с частотой, равной частоте колебаний электрода-инструмента.

Из графиков (см. рис. 5.16, а и б) следует, что импульсы электрического тока проходят на этапе сближения электродов и завершаются в момент их контакта. Именно за период прохождения импульса

происходит обработка заготовки и удаляется припуск  $z_i$  (рис. 5.16, в). Для контроля по приборам момента контакта электродов и длительности контакта на электроды подаётся маломощный импульс 3 обратной полярности от дополнительного источника тока.

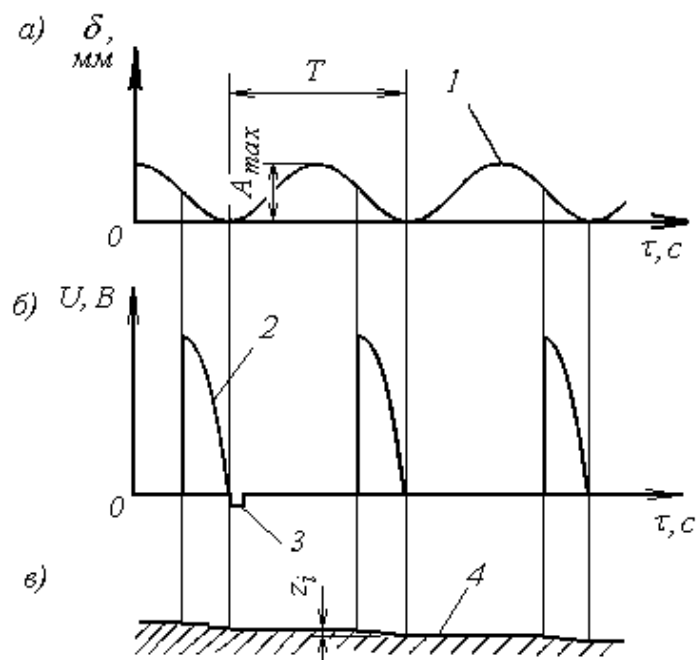


Рис. 5.16. Графики изменения зазора  $\delta$  (а), напряжения на электродах  $U$  (б) и схема удаления припуска  $z_i$  (в) при импульсно-циклическом способе ведения процесса

При удалении электрода-инструмента от заготовки технологический ток в систему не подаётся. В этот период продукты электролиза выносятся из МЭП электролитом, непрерывно прокачиваемым под давлением через рабочую камеру. Тем самым осуществляется замена отработанного электролита на свежий.

## 5.5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

### 5.5.1. Качество поверхности после электрохимической обработки

Качество обработанной поверхности определяется параметрами её шероховатости, а также структурными и физико-химическими

изменениями, которые возникли в поверхностном слое заготовки как следствие процесса обработки.

**Шероховатость поверхности.** Скорость анодного растворения материала определяется его физико-химическими характеристиками. В связи с тем, что эти характеристики в каждой локальной зоне обрабатываемой поверхности разные, различаются в таких зонах и скорости растворения материала. Различия в свойствах поверхности на разных её участках могут быть незначительными, но именно они приводят к появлению микронеровностей поверхности, определяющих параметры шероховатости, и к специфическим особенностям формы микронеровностей.

При электрохимической обработке исходные микронеровности, полученные на предыдущем этапе обработки поверхности, удаляются, а образующиеся микронеровности приобретают округлённую форму. Их высота определяется главным образом структурой обрабатываемого материала. Электрохимическая обработка позволяет создать микрорельеф с намного более плавным контуром неровностей,

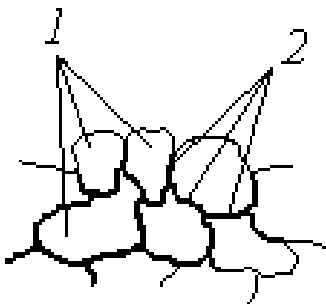


Рис. 5.17. Структура поверхностного слоя

чем такие способы резания, как точение, фрезерование или шлифование (рис. 5.17). Структурные составляющие материала, имеющие разные свойства, растворяются с разной скоростью, образуя микронеровности в форме наружных поверхностей зёрен 1. Параметры шероховатости поверхности после ЭХО не зависят от принятого направления измерения высоты микронеровностей.

По этой характеристике обрабатываемой поверхности ЭХО выгодно отличается от методов обработки резанием, при которых определённая направленность рисок от лезвия инструмента является одной из основополагающих особенностей.

Ещё большее влияние, чем структурные различия в поверхностном слое, на специфику поверхности после ЭХО оказывает ускоренное травление металла по границам зёрен. В этих зонах проис-

ходит межкристаллитное растравливание, приводящее к образованию микротрещин 2. Чем более дисперсная структура металла, тем меньшие микронеровности на поверхности могут быть достигнуты и тем меньше глубина межкристаллического растравливания в поверхностном слое.

На практике для предотвращения микрорастравливания на окончательно обработанной поверхности заготовки используют снижение интенсивности энергетического воздействия на заготовку или применение особых приёмов, основанных на сочетании электрохимической и механической видов обработки. Так проводят, например, электрохимическую абразивную заточку режущего инструмента (см. рис. 5.7, б). Удаление материала с поверхности режущего лезвия инструмента здесь осуществляется комбинированным воздействием электрохимического растворения поверхностного слоя и абразивного удаления образующихся на поверхности оксидных плёнок абразивными зёрнами. Для предотвращения появления после обработки на поверхности лезвия растравленного слоя на последнем этапе обработки осуществляют выхаживание.

Для большинства сплавов с увеличением плотности тока шероховатость поверхности снижается. Также снижается она и при уменьшении температуры электролита.

От химического состава электролита особенно сильно зависят параметры формирующейся шероховатости на многокомпонентных сплавах. Ионы электролита часто обладают различной химической активностью по отношению к разным компонентам. Поэтому при неправильном подборе электролита обработка сплава может сопровождаться преимущественным растворением одного из его компонентов и в связи с этим образованием значительных микронеровностей.

При выполнении операций ЭХРО, при которых съём материала заготовки осуществляется только за счёт электролиза, в общепринятых схемах реализации высота шероховатости обрабатываемых поверхностей достигает значений  $Ra = 0,63 \dots 2,5$  мкм. При обработке в электролитах на основе хлорида натрия шероховатость поверхности

конструкционных сталей  $Ra = 0,10...0,32$  мкм, нержавеющей сталей и сплавов —  $Ra = 0,32...1,25$  мкм, титановых сплавов —  $Ra = 1,25...2,5$  мкм, алюминиевых сплавов —  $Ra = 0,63...2,5$  мкм.

Использование импульсно-циклических технологий электрохимической обработки (см. рис. 1.15), реализуемых на сверхнизких значениях межэлектродного зазора (ЕТ-технологии), составляющих  $\delta = 1...10$  мкм, позволяет значительно снизить параметры достигаемой при традиционных технологиях высоты микронеровностей. Приложение к электродам группы микросекундных импульсов тока высокой плотности и регулирование электрических параметров МЭП в период прохождения импульсов тока при сверхмалых значениях межэлектродного зазора способствует получению высоты микронеровностей поверхности по параметру  $Ra$ , соответствующей предельным значениям отделочных методов обработки и исчисляемой тысячными долями микрометра [5].

На операциях, при которых съём материала происходит одновременно электролизом и механическим воздействием на заготовку, параметры образующейся шероховатости определяются возможностями используемого механического метода обработки заготовок.

**Физические свойства поверхности.** Изменения в поверхностном слое при ЭХО определяются главным образом двумя механизмами: химическими реакциями на поверхности анода и напряжениями, оставшимися после удаления припуска.

Кроме рассмотренного в предыдущем разделе эффекта межкристаллитного растравливания и образования в поверхностном слое микротрещин на поверхности заготовки могут возникнуть оксидная плёнка и наводороженный слой, глубина которого при неблагоприятных условиях процесса достигает 60 мкм. Эффект наводороживания особенно сказывается при обработке титановых сплавов, но стали, никелевые и алюминиевые сплавы ему не подвержены совсем. Наводороженный слой и зёрна с расставленными гранями после ЭХО ответственных деталей (лопатки газотурбинных двигателей) снимают полированием поверхности.

После ЭХО в поверхностном слое отсутствует наклёп, который фактически неизбежен при механической обработке заготовок. Эта особенность ЭХО подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа и измерения микротвёрдости поверхности. Не создаются в поверхностном слое и остаточные напряжения.

Исследования отмечают также понижение рассеяния на усталостную прочность деталей, обработанных методами ЭХО, что считают одним из преимуществ данного метода обработки. Причины снижения рассеяния усталостной прочности связаны с получаемой при ЭХО однородностью шероховатости обработанной поверхности в разных направлениях, а также с отсутствием остаточных напряжений в поверхностном слое.

### **5.5.2. Точность электрохимической размерной обработки**

Точностные характеристики электрохимической размерной обработки принято рассматривать применительно к реализуемой схеме выполняемой работы с учётом условий обработки и расположения участков обрабатываемой поверхности относительно движения подачи электрода-инструмента. В целом точностные параметры ЭХО, к которым относят точность размеров, точность формы и взаимного расположения поверхностей, определяются двумя группами факторов.

Первая группа факторов не зависит от особенностей процесса анодного растворения и вызывает появление погрешностей обработки, свойственных традиционным технологическим системам механической обработки. К таким погрешностям относятся, например, погрешности, вызываемые неточностью изготовления размеров и формы применяемых электродов-инструментов. Для уменьшения влияния именно этого фактора требования к точности изготовления электродов-инструментов весьма высоки. Так, принято, что погрешности изготовления формообразующих поверхностей электрода-инструмента не должны превышать 20–30 % от допуска на изготавливаемую деталь. Существенные погрешности обработки вызываются также

действием на заготовку электромагнитных, гидростатических и гидродинамических сил.

Погрешности первой группы вычисляются и минимизируются общеизвестными методами [17], которые в данном пособии не рассматриваются.

Ко второй группе погрешностей относят погрешности, определяемые спецификой электрохимической обработки и, в первую очередь, особенностями анодного растворения материала по отношению к процессам формообразования поверхностей другими технологическими методами. К факторам, характерным для размерной электрохимической обработки, влияющим на появление и величину специфических погрешностей этой группы, относят, прежде всего:

— значения выбранных параметров режима ЭХРО, в частности, величину исходного межэлектродного зазора  $\delta_0$  и напряжения на электродах  $U_{эл}$ ;

— стабильность выбранных значений параметров режима обработки, в первую очередь, постоянство межэлектродного зазора  $\delta$  и удельной электропроводности электролита  $\gamma_{эл}$  в процессе обработки;

— неравномерность припуска  $z$  на обрабатываемой поверхности заготовки и, как следствие, непостоянство межэлектродного зазора  $\delta$ ;

— газонаполнение электролита в зоне межэлектродного промежутка;

— время обработки  $\tau$ .

Наиболее сложные взаимосвязи с параметрами точности обработки из перечисленных факторов имеет величина межэлектродного зазора и особенности его образования и изменения в процессе обработки.

***Межэлектродный зазор и точность обработки.*** В основе большинства методов ЭХРО лежит формообразование поверхности копированием на заготовке профиля электрода-инструмента. При этом копируются с определёнными погрешностями размеры, формы поверхностей электрода-инструмента и их взаимное расположение

друг относительно друга. Различие в припусках на обработку разных поверхностей заготовки, их разное расположение относительно направления движения подачи электрода-инструмента, погрешности изготовления заготовки на предыдущих операциях, а также принятая схема движения электрода-инструмента определяют появление отклонений в размерах межэлектродных зазоров по разным поверхностям обрабатываемой заготовки. Это, как показано в разделе 5.4.3, приводит к разным скоростям растворения материала на разных поверхностях, а соответственно и к появлению погрешностей обработки.

Рассмотрим особенности взаимосвязи точности обработки и значения межэлектродного зазора на примере получения на плоской заготовке 2 профильным электродом-инструментом 1 полости сложной формы, представленной на рисунке 5.18, а пунктирными линиями.

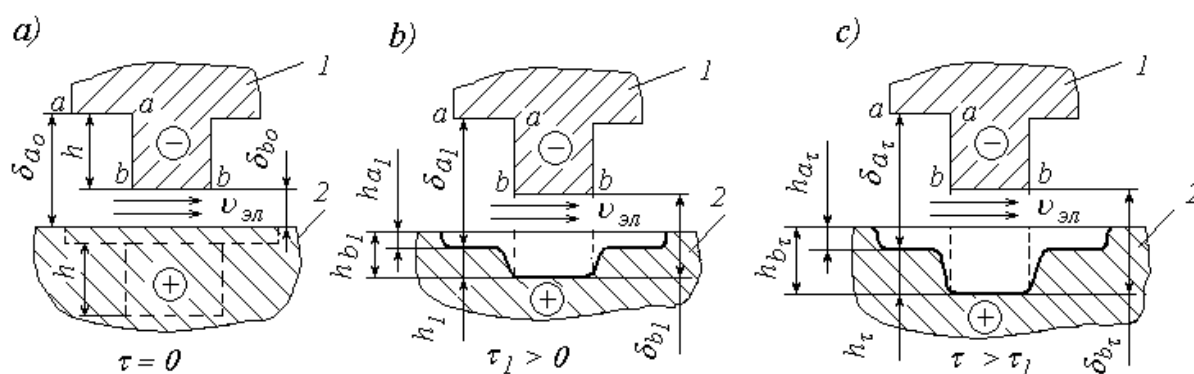


Рис. 5.18. Схемы ЭХО заготовки профильным неподвижным электродом-инструментом

Остановим далее внимание на точности выполнения размера  $h$  при реализации способа ведения ЭХРО неподвижным электродом-инструментом. Обработку будем проводить с прокачкой электролита через МЭП со скоростью  $v_{эл}$ .

На представленных эскизах рисунка изображены три этапа электрохимической обработки поверхности профильным электродом-инструментом, имеющим поверхности  $a - a$  и  $b - b$ , отстоящие в исходном положении при  $\tau = 0$  (рис. 5.18, а) на расстояниях от обрабатываемой заготовки  $\delta_{a_0}$  и  $\delta_{b_0}$ . Соответственно этому межэлектродные зазоры на участках  $a - a$  и  $b - b$  разные:  $\delta_{a_0} = \delta_{b_0} + h$ .



При подаче напряжения на электроды начинается анодное растворение заготовки по всей площади, противоположащей рабочим участкам электрода. В связи с различием межэлектродных зазоров на участках  $a - a$  и  $b - b$  скорости растворения заготовки на этих участках будут разные. Из равенства (5.10) следует, что скорость анодного растворения поверхности будет наибольшей напротив участка  $b - b$ . Следовательно, на заготовке начнёт появляться и расти во времени полость с двумя ступенями, расположенными напротив соответствующих ступеней электрода-инструмента (рис. 5.18, *b*). Однако разность глубины травления  $h_l$  на участках  $a - a$  и  $b - b$  будет меньше заданного размера и высоты ступени электрода-инструмента  $h$ . По мере продолжения анодного растворения (рис. 5.18, *c*) профиль полости на заготовке будет приближаться не только по форме, но и по размеру  $h_\tau$  к параметру  $h$  электрода-инструмента. При этом разность между заданным размером  $h$  и высотой съёма материала между участками  $a - a$  и  $b - b$  будет во времени  $\tau$  уменьшаться, представляя собой погрешность  $\Delta h_{\delta_\tau}$  выполнения на заготовке размера  $h$  (рис. 5.19).

$$h_l = h_{b_l} - h_{a_l}; h_\tau = h_{b_\tau} - h_{a_\tau}; h_l < h_\tau < h, \\ \Delta h_{\delta_\tau} = h - h_\tau. \quad (5.14)$$

Используя формулу зависимости значения текущего зазора от параметров процесса ЭХРО (5.11), можно рассчитать погрешность выполнения размера  $h$  в конечный момент времени  $\tau$ :

$$\Delta h_{\delta_\tau} = h - \left( \sqrt{\delta_{b_o}^2 + 2k_{эл}k_{эм}\gamma_{эл}U_{эл}\tau/\rho_m} - \sqrt{\delta_{a_o}^2 + 2k_{эл}k_{эм}\gamma_{эл}U_{эл}\tau/\rho_m} \right) \dots (5.15)$$

Анализ формулы (5.15) позволяет сделать ряд выводов:

— с ростом длительности обработки погрешность выполнения размера уменьшается. В связи с этим процесс ЭХРО следует прекращать тогда, когда суммарная погрешность обработки с учётом рассматриваемой  $\Delta h_\delta$  не будет превышать допуск на размер  $h$ , а сам размер будет находиться в пределах верхнего и нижнего допустимых размеров;

— повышение требования к точности выполняемого размера вызывает необходимость увеличения времени ЭХРО;

— чем меньше величина исходного межэлектродного зазора, тем меньше требуется времени обработки для достижения заданной точности выполнения размеров;

— чем меньше разность межэлектродных зазоров на различных участках изготавливаемых поверхностей, тем меньше времени потребуется для достижения заданной точности выполнения размера, определяющего их взаимное расположение.

Сделанные выводы указывают, что для достижения высокой точности обработки и сокращения времени на изготовление сложной поверхности с использованием электрохимического объёмного копирования необходимо выделять черновой и чистовой переходы. На этапе черновой обработки методами производительной обработки (например, методами резания) удаляется основной припуск (напуск). Форма образуемой при этом поверхности должна быть приближена к форме изготавливаемой поверхности таким образом, чтобы на чистовой обработке по всем поверхностям полости создавался равный припуск на обработку, в результате чего межэлектродные зазоры по обрабатываемым поверхностям также будут равны. Пример реализации такой технологии для получения полости ступенчатой формы, представленной пунктирными линиями на рисунке 5.18, *а*, приведён в виде двух эскизов на рисунке 5.20.

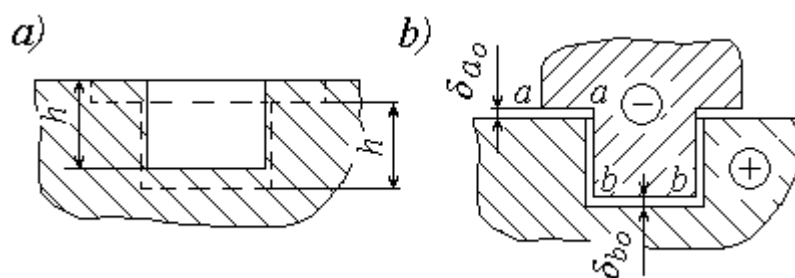


Рис. 5.20. Форма заготовки после черновой обработки — (*а*) и исходное положение электрода-инструмента при чистовой обработке полости методом ЭХРО — (*б*)

Эскиз рисунка 5.20, *а* представляет форму полости, которую целесообразно получить на этапе черновой обработки. На эскизе 5.20, *б* изображено исходное положение электрода-инструмента на

чистовом переходе с обеспечением равенства межэлектродных зазоров  $\delta_{a_0}$  и  $\delta_{b_0}$  на участках  $a - a$  и  $b - b$ .

Ещё раз подчеркнём, что равенство межэлектродного зазора на поверхностях, формируемых в направлении движения подачи, должно обеспечиваться созданием на этих поверхностях равномерного припуска на обработку.

***Припуск на электрохимическую размерную обработку поверхности и точность обработки.*** В тесной связи с рассмотренным влиянием величины межэлектродного зазора и равномерности припуска на обработку на разных поверхностях формируемого сложного профиля детали на точность обработки находится и вопрос о влиянии неравномерности припуска на отдельной обрабатываемой поверхности на точность и длительность обработки заготовки.

Неравномерность припуска на обрабатываемой поверхности может быть вызвана различными причинами, в том числе связанными с погрешностями взаимного расположения обрабатываемой и базовой поверхностями, сформированными на предыдущих операциях и при установке заготовки на станок для начала ЭХРО. К этим причинам можно отнести также: отклонения от параллельности, перпендикулярности или соосности базовой и обрабатываемой поверхностей, неплоскостность обрабатываемой поверхности, погрешности базирования и закрепления заготовки. Особо в числе этих факторов стоит исходная шероховатость обрабатываемой поверхности заготовки, которая представляет собой совокупность микровыступов и микровпадин на её поверхности.

На рисунке 5.21 представлено три эскиза, характеризующих снятие припуска  $z$  с поверхности заготовки, имеющей неравномерность припуска  $\Delta z_0$  (рис. 5.21, *a*) на её участках  $1 - 1$  и  $2 - 2$ . Схема предусматривает обработку при движении подачи электрода-инструмента  $D_s$  с равномерной скоростью  $v_s$  и обеспечением постоянства межэлектродного зазора  $\delta_{o1}$  с прокачкой электролита через межэлектродный промежуток ( $v_{эл}$ ).

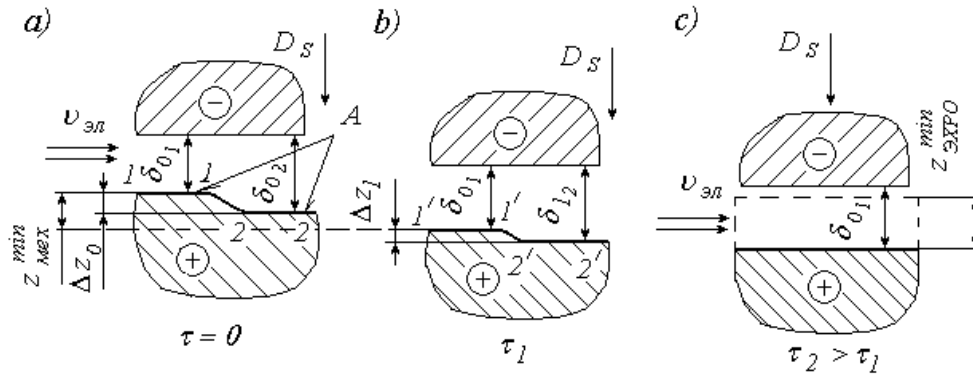


Рис. 5.21. Схемы этапов электрохимической обработки поверхности при наличии неравномерного припуска на её обработку

Схема предусматривает обработку при движении подачи электрода-инструмента  $D_s$  с равномерной скоростью  $v_s$  и обеспечением постоянства межэлектродного зазора  $\delta_{o1}$  с прокачкой электролита через межэлектродный промежуток ( $v_{эл}$ ).

При обработке с поверхности  $A$  заготовки следует удалить припуск  $z^{min}$ , который рассчитывается для условий механической обработки по используемой при обработке резанием формуле (5.16) и обозначен на рисунке 5.21,  $a$  как  $z_{мех}^{min}$  [16].

$$z_{мех}^{min} = Rz_{i-1} + h_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (5.16)$$

где  $Rz_{i-1}$  — шероховатость поверхности, полученная на предыдущей операции;  $h_{i-1}$  — дефектный слой на поверхности заготовки, сформировавшийся на предыдущей операции;  $\rho_{i-1}$  — пространственное отклонение поверхности заготовки, полученное на предыдущей  $i - 1$  операции, в данном случае  $\rho_{i-1} = \Delta z_o$ ;  $\varepsilon_i$  — погрешность установки заготовки на текущей  $i$ -ой, электрохимической операции.

Обрабатываемая поверхность  $A$  имеет два участка:  $1 - 1$  и  $2 - 2$ , расположенные на разной высоте относительно базовой поверхности (на рисунке не указана) и отстоящие друг относительно друга на расстоянии  $\Delta z_o$ . В исходном положении (рис. 5.21,  $a$ ) межэлектродные зазоры на выделенных участках заготовки не равны и составляют:  $\delta_{o1}$  на участке  $1 - 1$ ,  $\delta_{o2}$  на участке  $2 - 2$ . Разница между ними указана

на рисунке как  $\Delta z_o$ . В связи с неравенством межэлектродных зазоров скорости удаления припуска методом ЭХО на этих участках будут не равны. В связи с меньшим зазором поверхность участка 1 – 1 будет растворяться быстрее, чем пойдёт растворение на участке 2 – 2. Однако различие в положениях участков относительно базовой установочной поверхности будет сохраняться.

За время  $\tau_1$  на участке 1 – 1 будет снят слой металла, равный  $z_{\text{мех}}^{\text{min}}$ , и эта поверхность займёт положение 1' - 1' (рис. 5.21, б). За этот же временной промежуток участок поверхности 2 - 2 перейдёт в положение 2' – 2'. При этом исходная неравномерность расположения участков поверхности  $A \Delta z_o$  уменьшится до значения  $\Delta z_1$ .

Время  $\tau_1$ , которое потребуется для удаления исходного припуска на обработку  $z_{\text{мех}}^{\text{min}}$ , можно рассчитать, используя формулу (5.9):

$$\tau_1 = \frac{z_{\text{мех}}^{\text{min}}}{v_{p1}} = \frac{z_{\text{мех}}^{\text{min}} \rho_m \delta_{o1}}{k_{\text{эх}} k_{\text{вт}} \gamma_{\text{эл}} U_{\text{эл}}}, \quad (5.17)$$

где  $v_{p1}$  — скорость растворения материала на участке 1 – 1 ( $v_{p1} = v_s$ ).

Приняв, что скорость растворения на участке 2 – 2 будет примерно постоянна, можно, зная время  $\tau_1$ , рассчитать остаточную неравномерность расположения участков поверхности  $\Delta z_1$  и значение межэлектродного зазора  $\delta_{12}$  в этот момент на участке 2 – 2:

$$\Delta z_1 = z_{\text{мех}}^{\text{min}} \left( 1 - \frac{\delta_{o1}}{\delta_{o2}} \right) \text{ и } \delta_{12} = \delta_{o1} + \Delta z_1. \quad (5.18)$$

Поскольку межэлектродный зазор на участке 2 – 2 будет уменьшаться, и соответственно скорость анодного растворения на этом участке будет постепенно возрастать, фактическое значение неравномерности поверхностей  $\Delta z_1$  будет даже несколько больше расчётного.

При дальнейшем прохождении процесса анодного растворения остаточная неравномерность  $\Delta z_\tau$  будет уменьшаться. В какой-то момент  $\tau_2$  её значение станет меньше заданного отклонения от

плоскостности обрабатываемой поверхности  $A$ . Процесс ЭХРО в таком случае можно прекращать (рис. 5.21,  $c$ ).

Очевидно, что в связи с наличием неравномерности припуска на обработку на поверхности  $A$  рассчитанный для механической обработки минимальный припуск будет недостаточен для получения заданной неплоскостности поверхности  $A$ . Таким образом, неравномерность припуска на поверхности приводит к необходимости увеличения его по отношению к минимальному припуску, рассчитываемому для этих же условий обработки методами резания.

*Шероховатость поверхности и припуск на обработку.* Одной из составляющих минимально допустимого значения припуска на обработку поверхности является высота её микронеровностей  $Rz_{i-1}$ , сформированных на предыдущей операции. На операции ЭХРО исходная шероховатость должна быть удалена полностью. На её месте создаётся шероховатость, определяемая спецификой процесса анодного растворения. Из всех составляющих припуска на обработку по своему расположению микронеровности подвергаются анодному растворению в первую очередь. Это позволяет рассмотреть процесс их удаления отдельно от процесса удаления остальных составляющих припуска на обработку.

На рисунке 5.22 представлены временные этапы удаления исходной шероховатости с параметром  $Rz_{i-1} = h_o$ , осуществляемые при неподвижном электроде-инструменте с прокачкой электролита через МЭП. При этом принято, что обрабатываемая поверхность расположена параллельно рабочей поверхности электрода-инструмента, то есть межэлектродный зазор по всей поверхности выступов постоянен и имеет по микровыступам значение  $\delta_{o_1}$ , а погрешность пространственного расположения обрабатываемой поверхности и погрешность базирования отсутствуют.

Поскольку исходная шероховатость представляет собой совокупность микровыступов и микровпадин, межэлектродные зазоры микровыступов  $\delta_{o_1}$  меньше зазоров на микровпадинах  $\delta_{o_2}$ .

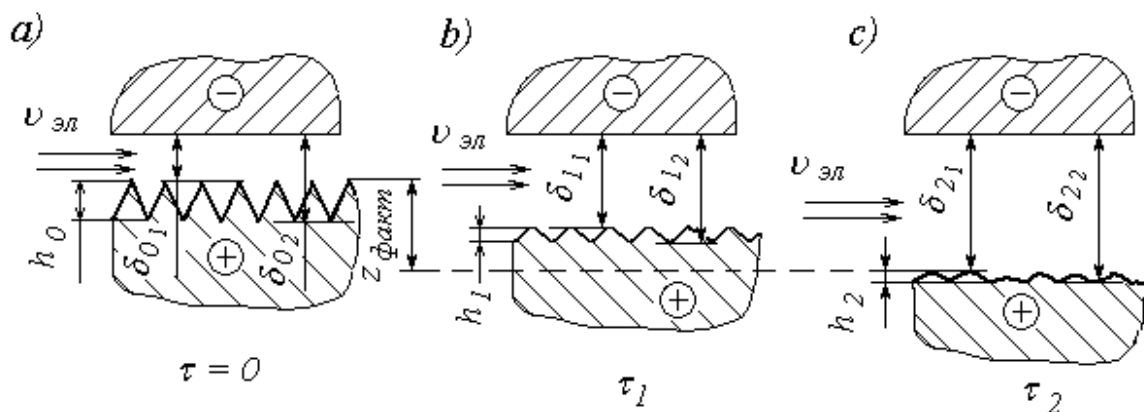


Рис. 5.22. Этапы удаления исходной шероховатости с поверхности заготовки

В соответствии с ранее выведенной закономерностью о зависимости скорости анодного растворения от межэлектродного зазора микровыступы будут растворяться быстрее, однако при этом будет проходить и процесс растворения микровпадин. Очевидно, что за время удаления микровыступов высотой  $h_0$  нижняя граница микровпадин опустится, но на меньшее расстояние, чем  $h_0$ . (рис. 5.22, *b*). Таким образом, шероховатость, уменьшившись в размере до величины  $h_1$ , как бы отступила вглубь заготовки, но не удалась полностью. Для полного её удаления и преобразования в шероховатость, свойственную процессу электрохимического растворения с высотой  $h_2$ , потребуется время  $\tau_2$  больше, чем  $\tau_1$ .

Исследования показывают, что при электрохимической обработке для удаления исходной шероховатости по причине одновременного растворения микровыступов и микровпадин требуется по отношению к механической обработке назначать дополнительный припуск. Если при механической обработке в формулу расчёта общего припуска на обработку ставится значение  $Rz_{i-1}$ , по рисунку 5.22, *a* обозначенное как  $h_0$ , то при электрохимической размерной обработке для удаления исходной шероховатости  $Rz_{i-1}$  требуется удаление слоя, составляющее, по данным В. П. Смоленцева, от 6 до 10  $Rz_{i-1}$ . [2].

Очевидно, что минимальный припуск на ЭХРО поверхности с неровностями на ней  $z_{\text{эхро}}^{\text{min}}$  будет значительно больше расчётного

минимального припуска для обработки этой же поверхности методом резания  $z_{\text{мех}}^{\text{min}}$  (рис. 5.21, с). Это не позволяет использовать формулу (5.16) в расчётах величины минимального припуска на обработку поверхности при электрохимической обработке, несмотря на то, что все её составляющие должны учитываться и при расчёте припуска на ЭХРО.

В связи со сложностями учёта особенностей определения составляющих припуска на обработку при ЭХРО общий припуск определяют экспериментальным методом и устанавливают для выполнения конкретных работ по производственным таблицам и номограммам.

**Точность обработки и напряжение на электродах  $U_{\text{эл}}$ .** Поскольку ЭХРО проводится в среде электролита, анодному травлению подвергаются не только подлежащие обработке поверхности, но и участки заготовки, прилегающие к обрабатываемым поверхностям и даже отстоящие от неё на значительных расстояниях. При увеличении напряжения на электродах нежелательное травление этих поверхностей увеличивается, что в целом снижает точность обработанной заготовки. Это обстоятельство является одной из причин, по которым напряжение на электродах ограничивают значениями 9...15 В. Увеличения напряжения на электродах сверх этих значений не рекомендуется и по той причине, что при повышенных значениях напряжения растут непроизводительные затраты электроэнергии, а при напряжениях более 30 В происходит пробой межэлектродного промежутка.

Для снижения влияния растравливания участков заготовки, прилегающих к обрабатываемым поверхностям, применяют методы локализации таких участков использованием специальных электролитов, нанесением защитных покрытий или конструированием специальных приспособлений. Точность формообразования поверхностей в таком случае возрастает.



### **Электропроводность электролита и точность обработки.**

Нестабильность электропроводности электролита в МЭП существенно влияет на общую погрешность ЭХРО и составляет до 50 % от её суммарного значения. Добиться стабильности электропроводности электролита в МЭП весьма сложно. Она зависит от температуры электролита, количества газообразных продуктов обработки, длины прохождения электролита вдоль обрабатываемой поверхности и других факторов.

Снижение газонаполнения МЭП достигается использованием электролитов, в которых водород в атомарном состоянии сразу вступает в реакцию с составляющими электролита, или путём отсоса газов по длине зазора. Несмотря на достоинства этих способов их применяют весьма ограниченно из-за возможного усиления коррозии оборудования при использовании безводородных электролитов или сложности создания электродов-инструментов с отверстиями для отсоса образующихся газов.

Электропроводность электролита существенно влияет на точность обработки при изготовлении крупногабаритных деталей. К таковым, например, относятся турбинные лопатки, схема обработки рабочих поверхностей которых представлена на рисунке 5.3, *b*. При реализации этой схемы используется поперечная (по отношению к направлению движения подачи  $D_s$ ) прокачка электролита (вдоль поверхности заготовки) в закрытой камере без смены электролита на протяжении длины лопатки. В связи с тем, что по мере движения электролита вдоль лопатки в направлении оси  $\ell$  его состав меняется, изменяется электропроводность электролита, а соответственно и плотность тока  $\rho_i$ . Производительность съёма материала по длине лопатки падает, что снижает точность обработки (рис. 5.23).

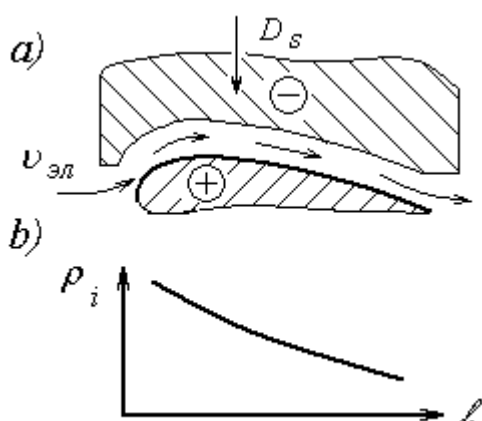


Рис. 5.23. Зависимость плотности тока в электролите от длины обработки

Для уменьшения влияния нестабильности электропроводности электролита по длине обработки и снижения растравливания необрабатываемых поверхностей используют метод *компенсации изменения параметров воздействием факторов, снижающих эти изменения*. Применительно к схеме обработки лопатки это означает, что для компенсации снижения скорости съёма материала в конце пера лопатки нужно откорректировать профиль электрода таким образом, чтобы межэлектродный зазор по мере насыщения электролита продуктами эрозии постепенно уменьшался, обеспечивая тем самым постоянство скорости съёма по всей длине пера лопатки.

Широкие возможности в части устранения погрешности, связанной с нестабильностью электропроводности при обработке длинных поверхностей открываются при обеспечении смены электролита за период его прохождения вдоль обрабатываемой поверхности. Решение этой задачи достигается, в частности, использованием импульсно-циклических технологий, основанных на осцилляции электрода-инструмента или заготовки и импульсной подаче напряжения на МЭП (см. рис. 5.15). Осцилляция электрода-инструмента обеспечивает сжатие газожидкостной межэлектродной среды во время пропускания импульса тока и быструю её замену в межэлектродном пространстве во время акта отвода электрода-инструмента от поверхности заготовки.

***Точность формы поверхности.*** При ЭХРО процесс анодного растворения происходит не только по обрабатываемой поверхности, но и по сопряжённым с обрабатываемой поверхностям со скоростями обратно пропорциональными межэлектродным зазорам. Это приводит к изменению не только размеров заготовки, но и к погрешностям формы обрабатываемых поверхностей.

Для каждой схемы обработки существуют свои специфические закономерности в образовании погрешностей формы обрабатываемых поверхностей. В результате, например, прошивания отверстия цилиндрическим электродом-инструментом с прокачкой электролита через центральное отверстие происходит образование не цилиндрического, а конического отверстия с углом конуса  $2\alpha = 2...10^\circ$

(рис. 5.24, *a*). Большие значения конусности соответствуют обработке более глубоких отверстий.

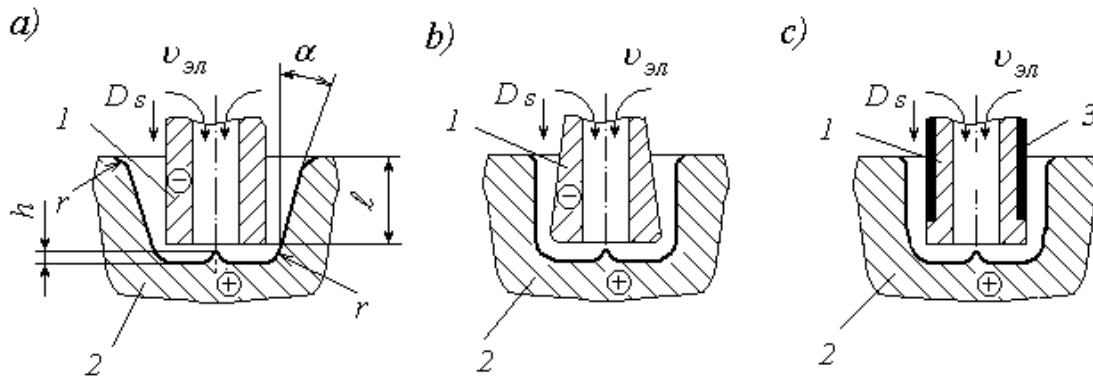


Рис. 5.24. Погрешности формы прошиваемого отверстия (*a*) и способы её снижения (*b, c*): 1 — электрод-инструмент; 2 — заготовка; 3 — изоляционный материал

Кроме того, на сопряжённых с образовавшимся отверстием поверхностях образуются радиусы  $r$ , которые часто требуют удаления путём введения дополнительных операций. Под отверстиями в электродах-инструментах, через которые подаётся электролит в МЭП, образуется выступ. Высота выступа  $h$  обычно не превышает 1,5 мм и во многих случаях при обработке глухих отверстий удаления выступа не требуется. Однако в чертеже детали должно быть введено указание на возможность наличия такого выступа.

Для снижения влияния нежелательных параллельных процессов на точность ЭХРО используют различные способы, в частности, проводят коррекцию диаметра электрода-инструмента по схеме рисунка 5.24, *b*, предусматривающую увеличение зазора между боковыми поверхностями электрода-инструмента и стенкой прошитого рабочей частью электрода отверстия, или покрывают цилиндрическую часть электрода-инструмента изоляционным материалом (рис. 5.24, *c*). В качестве изоляционных материалов используют стиракрил, эпоксидную смолу, капролон. На подготовленную поверхность электрода-инструмента могут напрессовываться втулки из органического стекла, эбонита, винипласта и других изоляционных материалов.

**Показатели точности электроэрозионной размерной обработки.** Из-за наличия специфических погрешностей электрохимической обработки точность ЭХРО не всегда удовлетворяет требованиям современного машиностроения. Это сдерживает использование данного метода обработки для получения прецизионных деталей.

В настоящее время при реализации ЭХРО по традиционным схемам можно получить:

— при обработке неподвижными электродами со съёмом по глубине до 0,2 мм погрешность не более 0,02 мм, при большей глубине – 0,03...0,05 мм;

— при изготовлении лопаток турбин, компрессоров и других фасонных поверхностей погрешность размеров может достигать 0,1...0,6 мм;

— при прошивании мелких отверстий и при изготовлении полостей точность обработки находится в пределах 9...10 квалитетов, а при отрезании — в пределах 12...14 квалитетов точности.

Значительное повышение точности выполнения размеров и формы обрабатываемых поверхностей достигается применением импульсно-циклических электрохимических технологий, основанных на осцилляции электрода-инструмента или заготовки, работе со сверхмалыми межэлектродными зазорами и импульсной подаче напряжения на электроды (ЕТ-технологии). Разрешающая способность при копировании регулярного рельефа с торца электрода-инструмента на заготовку, принимающая значения менее 1 мкм, позволяет при применении данных технологий исключить традиционные финишные операции чистового шлифования и полирования. При этом повторяемость (погрешность) одноименных размеров в партии деталей для ЕТ-технологий достигает 2 мкм.

### **5.5.3. Обрабатываемость материалов и производительность электрохимической размерной обработки**

**Обрабатываемость материалов.** Под обрабатываемостью материалов понимают способность материала подвергаться обработке

тем или иным технологическим методом. Электрохимической обработке подвергаются только электропроводные материалы.

Основным показателем обрабатываемости материалов ЭХРО является электрохимический эквивалент металла  $k_{эx}$  (г/(А·мин)), характеризующий массу материала заготовки в граммах, удаляемого при прохождении в электролите тока в 1 А в течение 1 минуты. Для практических целей съём металла удобнее оценивать не в массовых, а в объёмных или линейных единицах. В связи с этим для расчёта технологических параметров ЭХРО часто пользуются значением объёмного электрохимического эквивалента  $k_{эx_v}$  (мм<sup>3</sup>/(А·мин)), определяемого по формуле

$$k_{эx_v} = k_{эx} / \rho_m, \quad (5.18)$$

где  $\rho_m$  — плотность металла, г/мм<sup>3</sup>.

В таблице 5.2 приведены данные по величинам электрохимических эквивалентов по массе и объёмных электрохимических эквивалентов для имеющих широкое применение металлов с учётом их валентности.

Таблица 5.2

Электрохимические массовые и объёмные эквиваленты металлов и сплавов

Металл	$\rho_m \cdot 10^{-3}$ , г/мм <sup>3</sup>	Валентность, $n$	$k_{эx}$ , г/(А·мин)	$k_{эx_v}$ , мм <sup>3</sup> /(А·мин)
Алюминий	2,71	3	0,0056	2,07
Вольфрам	19,2	5	0,0228	1,19
		6	0,0190	0,99
Железо	7,86	2	0,0173	2,2
		3	0,01158	1,47
Марганец	7,4	2	0,0171	2,31
		4	0,0085	1,15
Медь	8,93	1	0,0395	4,42
		2	0,01976	2,21
Свинец	11,34	2	0,0644	5,68
		4	0,0322	2,83

Тантал	16,6	3	0,0375	2,26
		5	0,0225	1,36
Титан	4,5	4	0,0074	1,60
Хром	7,16	3	0,01076	1,5
		6	0,0054	0,75
Д1	2,8	–	0,0056	2,0
Бр 06Ц6С3	8,6	–	0,03368	3,92
ЭИ893	8,8	–	0,01584	1,8
Сталь 45	7,65	–	0,01319	1,72
X18H9T	7,9	–	0,01706	2,16
ШХ15	7,8	–	0,01586	2,03
30ХГСА	7,85	–	0,01727	2,20
T15K6	11,0	–	0,01683	1,53
ВК8	14,35	–	0,0186	1,29
BT16	4,68	–	0,01053	2,30

***Основное время на электрохимическую размерную обработку.***

Основное время обработки  $\tau_o$ , то есть время, затрачиваемое непосредственно на анодное растворение материала при выполнении технологической операции, определяется в общем случае отношением длины пути электрода-инструмента  $\ell$  (рис. 5.13) к его средней скорости подачи  $v_{ср}$  на участке обработки:

$$\tau_o = \ell / v_{ср} . \quad (5.20)$$

В связи со спецификой реализации схемы движения электрода-инструмента, разнообразием видов обрабатываемых поверхностей и схем обработки определение  $v_s$  для каждого вида обработки и даже для отдельных форм изготавливаемых поверхностей заготовки осуществляется по разным методикам.

Например, при проведении ЭХРО плоской поверхности с постоянной скоростью подачи электрода-инструмента и при установившемся режиме обработки, характеризующемся равенством скоростей растворения материала  $v_p$  и скорости подачи  $v_s$ , расчёт основного

времени обработки при назначенном припуске на обработку  $z$  проводят по формуле

$$\tau_o = z/v_s. \quad (5.20)$$

Заменяя в формуле (5.20) скорость подачи электрода инструмента  $v_s$  на равную ей скорость анодного растворения  $v_p$ , определяемую по формуле (5.9), получим значение основного времени, определяемое параметрами режима обработки ЭХРО:

$$\tau_o = \frac{z\rho_m\delta}{k_{эм}k_{эх}\gamma_{эл}U_{эл}}. \quad (5.21)$$

При обработке такой же плоской поверхности, но с неподвижными электродами, для расчёта  $\tau_o$  формулы (5.20) и (5.21) неприменимы, так как  $v_s = 0$ , а межэлектродный зазор  $\delta$  не имеет постоянного значения, а со временем возрастает до конечного значения  $\delta_k$ :

$$\delta_k = z + \delta_o. \quad (5.22)$$

Основное время на обработку в данном случае можно определить, если воспользоваться формулой зависимости скорости растворения от величины межэлектродного зазора (5.9) и представить скорость в текущий момент как производную от изменения межэлектродного зазора ко времени  $d\delta/d\tau$  при  $k_{эм} = \text{Const}$ .

Интегрирование полученного выражения по переменной величине зазора  $\delta$ , изменяющегося от начального значения  $\delta_o$  до конечного значения  $\delta_k$ , позволяет определить основное время обработки  $\tau_o$  в виде следующего выражения

$$\tau_o = \frac{\rho_m(\delta_k^2 - \delta_o^2)}{2k_{эм}k_{эх}\gamma_{эл}U_{эл}}. \quad (5.23)$$

Подстановка в формулу (5.23) значения конечного зазора из формулы (5.22) даёт возможность установить связь между основным временем обработки и припуском на обработку в виде следующей зависимости:

$$\tau_o = \frac{\rho_m(2\delta_o z + z^2)}{2k_{эм}k_{эх}\gamma_{эл}U_{эл}}. \quad (5.24)$$

Скорость анодного растворения в конце обработки будет равна

$$v_{pк} = k_{эл} k_{вт} \gamma_{эл} U_{эл} / \delta_k \rho_m. \quad (5.25)$$

Наличие неровностей на обрабатываемой поверхности или пространственных отклонений, связанных с погрешностями предыдущей обработки, погрешностями базирования и закрепления, как это указывалось ранее, потребует для их устранения дополнительного припуска и соответственно дополнительных временных затрат.

Рассмотренные примеры определения основного времени на обработку относятся только к схемам ЭХРО, реализуемым путём анодного растворения поверхности обрабатываемой заготовки. В этом случае электрод-инструмент не изнашивается. Методы, относящиеся к группе ЭХРО с использованием дополнительных видов воздействия на заготовку, характеризуются износом инструмента в той же степени, как это имеет место при абразивных методах обработки. Этот износ приводит к необходимости его учёта в расчётах основного времени процесса.

**Производительность ЭХРО.** Основной характеристикой производительности ЭХРО является объёмная производительность  $P_v$ .

$$P_v = V/\tau_o, \quad (5.26)$$

где  $V$  — объём металла, удалённого с заготовки за время  $\tau_o$ .

При относительно малых значениях линейной скорости растворения материала производительность по объёму при обычных значениях режимов обработки не превышает 5000 мм<sup>3</sup>/мин. При больших площадях обработки  $P_v$  может достигать 60000 мм<sup>3</sup>/мин. Такие значения производительности достигаются, например, при обработке на копировально-прошивочных станках при площадях обработки до 600 см<sup>2</sup> и использовании силы тока до 25000 А.

Максимальные значения производительности ЭХРО более чем на порядок ниже производительности обработки заготовок резанием. Однако производительность ЭХРО не зависит от механических свойств заготовки (твёрдости, предела прочности, ударной вязкости и др.). В связи с этим ЭХРО используют для обработки заготовок из



твёрдых сплавов, труднообрабатываемых традиционными методами жаропрочных, коррозионно-стойких, немагнитных токопроводящих материалов, а также для обработки поверхностей сложных форм из других материалов, которые не могут быть получены резанием.

Производительность процесса ЭХРО оценивают также по скорости анодного растворения или скорости подачи электрода-инструмента. В зависимости от припуска и начального межэлектродного зазора средняя скорость растворения  $v_p$  в методах ЭХРО небольшая и находится в пределах 0,001...0,01 мм/с.

## 5.6. КОНСТРУКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА

*Общая характеристика.* Электрод-инструмент проектируют и изготавливают, как правило, для каждого типоразмера детали. Конструкция электрода-инструмента определяется схемой обработки, принятым материалом, технологией изготовления, способом крепления в электрододержателе станка, формой и размерами рабочих поверхностей, а также механической прочностью. Все электроды-инструменты имеют рабочую и крепёжную части. Рабочей частью осуществляется анодное растворение материала заготовки, а крепёжную часть используют для связи с узлами электрохимического станка, подвода электрического тока, подвода или отвода электролита. Крупногабаритные и сложнопрофильные электроды-инструменты для такой операции, как электрохимическое объёмное копирование, часто выполняют сборными (рис. 5.25).

По типу электроды-инструменты подразделяют на пластинчатые, дисковые и ленточные.

Конструкция электрода-инструмента должна обеспечивать надёжное и равномерное распределение и подачу в рабочую зону электролита на всём протяжении МЭП. Размещение полостей, канавок и щелей в электроде-инструменте не должно приводить к образованию так называемых «мёртвых зон», где отсутствует циркуляция электролита. При проектировании электродов-инструментов необ-

ходимо предусмотреть, чтобы электролит протекал плавно, без резких поворотов, поскольку это приводит к срывам потока и появлению местных необработанных участков.

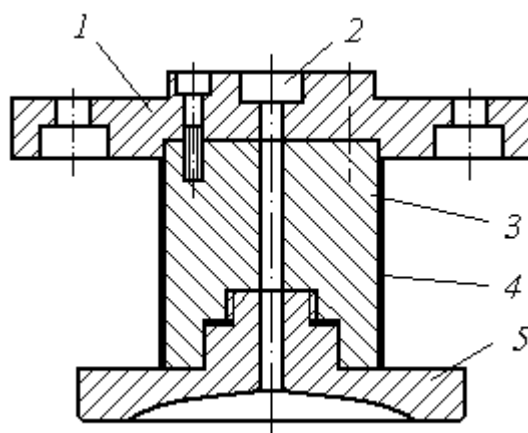


Рис. 5.25. Конструкция сборного электрода-инструмента для изготовления сферической поверхности: 1 — фланец; 2 — накопительная камера для электролита; 3 — переходная оправка; 4 — электроизоляционное покрытие; 5 — рабочая часть электрода-инструмента

При электрохимической обработке внутренних полостей могут быть приняты различные схемы подачи электролита в зазор между электродом-инструментом и заготовкой: вдоль или поперек обрабатываемой поверхности (см. рис. 5.11) или через щели и отверстия в электроде-инструменте. Эти аспекты также учитываются при проектировании электрода-инструмента.

Точность формы и размеров рабочего профиля электрода-инструмента должна быть на один квалитет выше, чем точностные параметры изготавливаемой поверхности детали. Обычно она назначается в пределах 6...8-го квалитетов точности. Микронеровности поверхностей рабочей части электрода-инструмента при традиционных методах ЭХРО не копируются на обработанных поверхностях заготовки. Поэтому шероховатость поверхности его рабочей части не влияет на качество обработанной поверхности, но всё же определяет характер течения электролита, интенсивность загрязнения зазора продуктами обработки. Поэтому значение шероховатости рабочих

поверхностей электродов-инструментов по параметру  $Ra$  принимают не более 1,32 мкм.

В то же время при использовании импульсно-циклических технологий электрохимического объёмного копирования (см. рис. 1.15), реализуемых на сверхнизких значениях межэлектродного зазора (ЕТ-технологии), локализация электрической эрозии на сверхмалых площадях приводит к копированию на обработанной поверхности заготовки шероховатости торцевой поверхности электрода-инструмента. Это требует создания на электроде-инструменте при его изготовлении такой шероховатости, которая не превышала бы значений параметра шероховатости поверхности детали по чертежу.

**Материалы.** Для изготовления электродов-инструментов необходимо выбирать электропроводные материалы, обладающие высокой коррозионной стойкостью, 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, алюминиевые сплавы, нержавеющие стали.

Медь и её сплавы (латуни и бронзы) имеют высокую электропроводность, хорошую свариваемость, удовлетворительную адгезию к покрытиям, достаточную механическую прочность. Главным недостатком медных электродов 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 нержавеющих сталей, например, стали 12Х18Н9Т. Стали этой группы не разрушаются при коротких замыканиях, имеют предел прочности в 2...3 раза выше, чем медь, обладают высокой адгезией к покрытиям. Однако нержавеющие стали имеют низкую удельную электрическую проводимость (в 30...50 раз меньше, чем у меди).

Поэтому контактные участки для подвода напряжения у электродов-инструментов из этих материалов должны быть большими.

Для защиты части электрода-инструмента от нежелательных вторичных явлений анодного растворения поверхностей, не подлежащих обработке, нерабочие поверхности покрываются изоляционным материалом (см. рис. 5.24, *b*). Диэлектрические материалы используются в виде покрытий толщиной 0,05...0,5 мм или в виде механически обработанных конструктивных элементов (стержней, брусков, листов, плит), которые либо закрепляются на обрабатываемой поверхности, либо составляют часть электрода-инструмента. В качестве покрытий используют эпоксидные смолы, лаки, керамические эмали, капрон в порошке, полиэтилен. Поверхность заготовки, на которую наносится покрытие, предварительно обрабатывают для повышения шероховатости: крацуют металлическими щётками, обдувают дробью, накатывают канавки.

Если покрытия наносят на нерабочие поверхности электрода-инструмента, то для его создания обычно используют специальную резину с повышенной адгезией к металлам, пластмассу типа АСТ-Т, стиракрил. За счёт упругих свойств покрытие из резины прочно удерживается на поверхности даже при больших скоростях течения электролита.

В качестве материалов при конструировании переходников, крепёжных частей, направляющих для электродов-инструментов, работающих по схеме протягивания, упоров и других деталей отдельные их конструктивные элементы изготавливают из диэлектриков. Чаще всего применяют в таких случаях резину, стеклотекстолит, текстолит, фторопласт, капролон. Области их применения ограничиваются свойствами материалов и условиями обработки. Так, стеклотекстолит и текстолит, несмотря на хорошие характеристики, набухают в электролите. Резина может работать при температуре не выше 325...330 К. При коротких замыканиях, когда температура превышает 1500 К, резина разрушается. Кроме того, резиновые детали не позволяют точно базировать заготовку, поскольку резина очень упруга и

изменяет форму при усилиях закрепления. Фторопласт обладает удовлетворительной прочностью, хорошо работает при температурах до 530 К, но из-за большой массы конструкции из него тяжелы, и это может влиять на точность обработки.

### ***Форма и размеры рабочей части электрода-инструмента.***

В общем случае форма электрода-инструмента не эквидистантна форме изготавливаемой поверхности заготовки, то есть не равноудалена по всем своим поверхностям от формируемых на заготовке поверхностей. Это объясняется, во-первых, непостоянством режима обработки в разных точках обрабатываемой заготовки, в частности, колебаниями в процессе обработки локальных значений температуры, изменениями состава электролита и его зашламливанием, непостоянством напряжения на электродах. Соответственно этому скорость анодного растворения материала изменяется как во времени, так и по месту протекания процесса на заготовке. Во-вторых, формируемые в процессе обработки поверхности заготовки занимают различную ориентацию относительно направления движения подачи электрода-инструмента, что определяет и различие условий протекания электролиза на этих поверхностях. В-третьих, даже при получении на заготовке только одной плоской поверхности при использовании плоского электрода-инструмента и при постоянстве режима электролиза электрическое поле в МЭП вблизи краёв плоскости неоднородно. Здесь плотность тока и съём металла будут отличаться от соответствующих значений на основной части заготовки, что приводит к появлению в местах сопряжений обрабатываемых поверхностей (углах) радиусов (см. рис. 5.24, *a*). Такое отличие будет тем заметнее, чем дальше отстоят друг от друга заготовка и электрод-инструмент.

В связи с этим при проектировании электрода-инструмента для изготовления конкретной детали исходную эквидистантную форму его корректируют на основе проведения дополнительных расчётов и обработки экспериментальных данных.

Рассмотрим особенности и основные направления корректировки профиля электрода-инструмента применительно к выполнению

операции прошивания отверстия (см. рис. 5.2) и объёмного копирования на заготовке поверхности сложной формы (см. рис. 5.3).

**Электроды-инструменты для схемы прошивания.** Конструкция электрода-инструмента для прошивания отверстия определяется формой отверстия и его размерами. Цилиндрические отверстия диаметром менее 1,0...1,5 мм прошивают струйным методом (см. рис. 5.2, б), при котором электродом-инструментом является струя электролита.

При изготовлении отверстий больших диаметров в качестве инструмента используют металлический стержень, параметры которого определяется размерами и формой прошиваемого отверстия.

Отверстия при прошивании могут быть сквозными или глухими, цилиндрическими, коническими, ступенчатыми, со сложной фасонной формой. В большинстве случаев электрод-инструмент выполняют в виде трубки 1, через центральное отверстие которой прокачивается электролит. На рисунке 5.26 представлена схема прошивания цилиндрического отверстия диаметром  $D$  в заготовке 2, для которой и рассмотрим особенности проектирования рабочей части электрода-инструмента.

Для уменьшения растревания боковой цилиндрической поверхности отверстия при углублении электрода-инструмента в заготовку на наружной цилиндрической поверхности его нанесено изолирующее покрытие 3. Покрытие наносится на расстоянии  $H$  от рабочего торца электрода-инструмента, что делается для предохранения его от разрушения струей электролита и продуктами обработки.

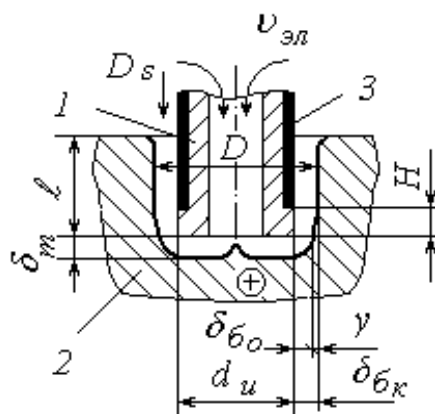


Рис. 5.26. Схема прошивания отверстия электродом-инструментом с защитным покрытием

Таким образом, при углублении электрода-инструмента в заготовку кроме образования по боковой цилиндрической поверхности электрода-инструмента основного межэлектродного зазора  $\delta_{\bar{o}}$  за время прохождения участка (бурта)  $H$  относительно каждой точки поверхности образованного отверстия происходит дополнительное растравливание образовавшегося отверстия на величину  $y$ .

Для устранения такого растравливания у электродов-инструментов с толстыми стенками вместо изоляции боковой поверхности уменьшают диаметр инструмента на 1,5...2 мм по сравнению с диаметром бурта или вводят коррекцию диаметра в соответствии с рисунком 5.24, *b*.

В связи с тем, что при прохождении бурта  $H$  вдоль сформированного отверстия с боковой его поверхности происходит съём материала, диаметр электрода-инструмента  $d_u$  следует рассчитывать по формуле

$$d_u = D - 2(\delta_{\bar{o}} + y), \quad (5.27)$$

где  $y$  — съём металла с боковой поверхности отверстия на участке  $H$  электрода-инструмента.

Съём  $y$  определяется как изменение бокового зазора за время прохождения отверстия буртом расстояния  $H$ :

$$y = \delta_{\bar{o}_k} - \delta_{\bar{o}},$$

где  $\delta_{\bar{o}_k}$  — конечное значение бокового зазора;  $\delta_{\bar{o}}$  — начальное значение бокового зазора. Начальный боковой зазор  $\delta_{\bar{o}}$  можно приравнять к торцовому установившемуся зазору  $\delta_m$ , который рассчитывают из формулы (5.9). Конечный боковой зазор  $\delta_{\bar{o}_k}$  рассчитывают по уравнению (5.11):

$$\delta_{\bar{o}_k} = \sqrt{\delta_{\bar{o}}^2 + 2k_{эл}k_{вт}\gamma_{эл}U_{эл}\tau/\rho_m},$$

где  $\tau$  — время воздействия бурта на боковую поверхность. Оно равно отношению его высоты  $H$  к скорости подачи инструмента ( $\tau = H/v_s$ ). Тогда по формуле (5.27)

$$d_u = D - 2\sqrt{\delta_m^2 + 2k_{эл}k_{эм}\gamma_{эл}U_{эл}H / \rho_m v_s}. \quad (5.28)$$

Более сложные расчёты по определению профиля электрода-инструмента выполняются при *проектировании электродов-инструментов для изготовления полостей сложных пространственных форм*. Изготовление таких полостей необходимо, например, при производстве ковочных штампов, литейных форм, пресс-форм, лопаток энергетических машин (газотурбинных двигателей, гидроагрегатов).

При конструировании рабочей части электрода-инструмента для изготовления полости сложной формы сначала по чертежу изготавливаемой поверхности детали строят эквидистантный профиль электрода-инструмента с межэлектродным зазором, равным установившемуся зазору  $\delta_m$ . Далее полученный профиль корректируют и находят действительную форму и размеры электрода-инструмента. Известно три метода коррекции эквидистантного профиля: графоаналитический метод, метод моделирования электрическим полем и производственный метод.

При использовании *графоаналитического метода коррекции размеров профиля инструмента* на практике обычно пользуются способом разделения контура изготавливаемой поверхности на отдельные участки. Далее для границ каждого участка находят отклонения формы и размеров инструмента от соответствующих параметров эквидистантного профиля, по которым и определяют требуемые размеры электрода-инструмента.

При известной скорости подачи электрода-инструмента  $v_s$  (или определённой по формуле (5.9)) размеры электрода-инструмента на вертикальных участках при отсутствии диэлектрической защиты на поверхности рассчитывают по формуле (5.28). При этом за величину  $H$  принимают расстояние вдоль оси электрода-инструмента от его рабочего торца до того сечения электрода-инструмента, для которого рассчитывается откорректированный диаметр.



Для наклонных или криволинейных участков заготовки профиль инструмента рассчитывается по методике, раскрытой далее на примере коррекции профиля электрода-инструмента для изготовления наклонной поверхности на заготовке  $1$  с углом  $\psi$  (рис. 5.27) [2].

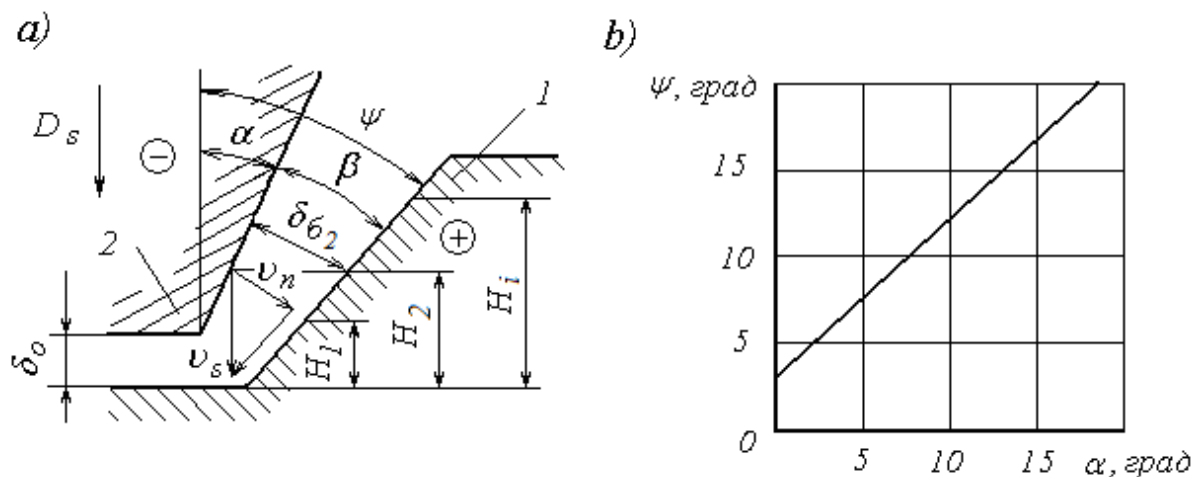


Рис. 5.27. Схема и график определения параметров профиля электрода-инструмента для получения наклонной поверхности на заготовке [2]

Задача определения профиля электрода-инструмента сводится в данном случае к определению требуемого бокового зазора  $\delta_\sigma$  для каждой точки профиля изготавливаемой поверхности  $1$  и определения на основе этого зазора соответствующего размера профиля электрода-инструмента. На рисунке 5.27,  $a$  показана схема, используемая при расчёте этих зазоров.

Начальный этап вхождения электрода-инструмента в заготовку относится к нестационарным процессам. На нестационарном участке боковой зазор изменяется во времени, постепенно приближаясь к установившемуся значению. Будем считать, что на рисунке 5.27 зона нестационарного режима обработки располагается выше торца электрода-инструмента, на высоте  $H_1$  от дна поверхности. Таким образом, установившийся режим будет наблюдаться на той части электрода-инструмента, которая расположена выше уровня точки на высоте  $H_1$  от дна отверстия и  $H_1 - \delta_o$  от торца инструмента.

На основе этой физической картины анодного растворения материала на различных участках электрода-инструмента ведут расчёт его профиля в далее приведённой последовательности.

1. Определяют нормальную составляющую  $v_n$  скорости подачи  $v_s$  по формуле  $v_n = v_s \cdot \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между рабочей поверхностью электрода-инструмента 2 и направлением его подачи  $D_s$ . Этот угол находят как функцию от значения угла  $\psi$  наклона поверхности заготовки 1 к направлению движения подачи электрода-инструмента по экспериментальным графикам типа графика, приведённого на рисунке 5.27,  $b$  для сплава 5ХНМ [2].

2. По высоте поверхности заготовки через постоянный шаг проводят три — четыре сечения, отстоящие от нижнего уровня полости на расстояниях  $H_1, H_2, \dots, H_i$ . Для этих сечений находят момент времени их обработки  $\tau_i = H_i/v_s$ , где  $i$  — номер сечения.

3. Определяют границу установившегося режима, характеризуемую высотой  $H_1$ . Для этого пользуются разработанными экспериментальными номограммами. В точках профиля электрода-инструмента, где  $H_i > H_1$ , режим считается стационарным, боковой зазор рассчитывают по формуле (5.13):

$$\delta_y = \frac{k_{em} k_{em} \gamma_{эл} U_{эл}}{v_n \rho_m}.$$

На участках, где  $H_i < H_1$ , расчёт ведут по более сложным уравнениям, разработанным для нестационарных процессов. В этих расчётах скорость подачи инструмента принимают равной  $v_n$ , по ним находят значения конечного зазора  $\delta_{i_k}$  для ряда точек переходной зоны.

4. Вычисленные значения зазоров  $\delta_{i_k}$  откладывают в выбранных сечениях по нормали к поверхности детали и получают участок профиля электрода-инструмента.

Нахождение формы электрода-инструмента *методом моделирования* осуществляют путём создания моделей, имитирующих на реальных электрических, гидравлических и других типах полей процессы, проходящие в межэлектродном промежутке.

Графоаналитический метод и метод моделирования нахождения формы и размеров электрода-инструмента не учитывают таких

важных факторов процесса, как гидродинамика потока электролита и изменение его температуры, они сложны в расчётах, требуют применения ЭВМ. В связи с тем, что эти методы дают приближённые результаты, широкого применения при нахождении профиля электродов-инструментов они не нашли.

*Производственные методы.* В производственных условиях при проектировании профиля электрода-инструмента для изготовления сложных фасонных поверхностей используют методы обратного копирования и последовательных приближений.

При методе *обратного копирования* электрод-инструмент изготавливают с помощью ЭХРО. На первом этапе реализации этой технологии методами резания и слесарной доводки изготавливается металлическая модель детали. Далее эта модель используется в качестве промежуточного электрода-инструмента при электрохимическом объёмном копировании её формы на заготовке, из которой будет изготавливаться требуемый электрод-инструмент. В результате обратного копирования на заготовке создаётся нужная для изготовления партии деталей форма электрода-инструмента. Метод обратного копирования весьма трудоёмок. Он даёт хорошие результаты только при небольшом и равномерном припуске на электрохимическую обработку рабочей части заготовки электрода-инструмента и при использовании схемы обработки с неподвижными электродами.

При удалении значительных припусков метод обратного копирования может использоваться только для предварительного изготовления электрода-инструмента. Окончательную доводку рабочего профиля электрода-инструмента выполняют методом *последовательных приближений* путём уточнения его формы и размеров после изготовления пробной партии деталей. Уточнение ведут до получения новой партии пробных деталей, соответствующих требованиям чертежа.

Проектирование профиля рабочей части электрода-инструмента составляет только один из этапов, необходимых для создания его чертежа. Кроме этого необходимо спроектировать крепёжную часть

электрода-инструмента, определить положение щелей и отверстий для подвода электролита в зону обработки, разработать различные вспомогательные элементы электрода типа направляющих для электрохимического протягивания или упоров и создать конструкцию приспособления для установки его на станок.

## **5.7. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

### **5.7.1. Типовая структура электрохимического оборудования**

Для электрохимической размерной обработки используют установки, представляющие собой системы устройств и приборов, обеспечивающих обработку заготовок методами этой группы и близкие по структуре к агрегатным станкам. В комплекс устройств и систем электрохимического станка входят: узлы для размещения и крепления электрода-инструмента и заготовки, снабжённые приводами их движений; источник технологического тока с регулируемым напряжением и система электропитания; гидросистема, обеспечивающая прокачку электролита через МЭП с требуемым давлением и расходом и регенерацию электролита; пульт управления, осуществляющий взаимосвязь и контроль работы всех систем и узлов станка; система подачи воздуха или газа в электролит для его перемешивания и система вентиляции, служащая для удаления из зоны обработки выделяющихся газов и испарений рабочей жидкости.

На рисунке 5.28 в виде отдельных агрегатов представлена принципиальная схема устройства станка для электрохимической обработки. На схеме условными изображениями указаны: рабочая камера 9 с расположенными в ней заготовкой 8 и электродом-инструментом 3, источник питания 11 с пультом управления 10 и токопроводящими шинами 1, обеспечивающими подвод электроэнергии в зону обработки; привод подачи электрода-инструмента 2; гидросистема, в состав которой входят управляющая аппаратура, бак с электролитом 7, насос высокого давления 4 для подачи электролита через трубопроводы в

зону обработки, теплообменник 6, служащий для поддержания постоянной (заданной) температуры электролита, система очистки электролита с centrifугой 5.

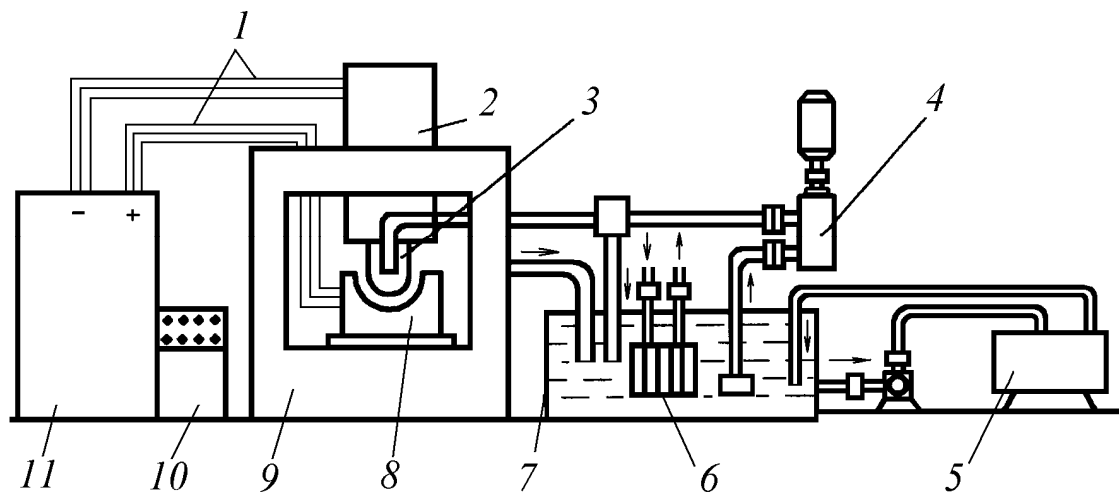


Рис. 5.28. Принципиальная схема станка для электрохимической обработки

Механическая часть электрохимического станка и его общая компоновка зависят от схемы обработки, габаритов изготавливаемых деталей и технологических требований к обрабатываемой поверхности. Наиболее простую конструкцию имеют станки, работающие по схеме с неподвижными электродами. Обычно они предназначены для обработки заготовок небольших габаритов, поэтому оснащены маломощными источниками питания. Все узлы таких станков могут быть размещены в общем корпусе. Неподвижными электродами оснащаются в основном станки для электрохимического удаления заусенцев, электрохимического маркирования и округления кромок.

Современные конструкции электрохимических станков содержат две стойки, в одной из них размещён источник питания и блоки управления режимом (система адаптивного управления), в другой — устройства для хранения, очистки и прокачки электролита. Адаптивное управление позволяет изменять режимы обработки в зависимости от состояния электрических и гидравлических показателей МЭП. Станок непрерывно работает в режиме, позволяющем получить заданные технологические показатели. Для этого его комплектуют

специализированной ЭВМ, которая выполняет расчёты режима для каждого момента обработки заготовки и даёт управляющие команды на выполнение конкретных действий исполнительным элементам станка.

По компоновке электрохимические станки подразделяют на станки с вертикальным (как правило, универсальные и специализированные станки) и станки с горизонтальным движением подачи электрода-инструмента.

Большинство электрохимических станков являются полуавтоматическими установками. У этих станков автоматизирован цикл электрохимической обработки, а переходы по установке, выверке, закреплению и снятию заготовки выполняет оператор. Он же запускает станок и вспомогательные агрегаты в работу. Отключение станка и агрегатов происходит автоматически при достижении заданного размера обработки.

### **5.7.2. Виды и характеристики электрохимических станков**

По степени универсальности группа станков для электрохимической размерной обработки подразделяется на универсальные, специализированные и специальные станки. В отечественной классификации металлообрабатывающих станков эти станки за исключением электроабразивных и электроалмазных станков включены в четвертую группу — группу комбинированных станков. Электроабразивные и электроалмазные станки по отечественной классификации отнесены к третьей группе.

*Универсальные электрохимические станки* предназначены для выполнения электрохимического прошивания отверстий (см. рис. 5.2, *a*) и электрохимического объёмного копирования (см. рис. 5.3, *a*). Выпускают их с размерами стола от 200 × 320 мм до 630 × 1000 мм. Площадь обработки может достигать 600 см<sup>2</sup> при производительности по объёму удаляемого припуска от 600 до 40000 мм<sup>3</sup>/мин. Погрешность получаемых размеров на станках этой группы находится в пределах от 0,02 до 0,3 мм.

На рисунке 5.29 представлен один из представителей группы этих станков — отечественный электрохимический копировально-прошивочный настольный станок серии ET500.

Станки серии ET500 предназначены для выполнения прецизионных копировально-прошивочных работ, а также для снятия заусенцев и округления кромок на малогабаритных прецизионных заготовках



Рис. 5.29. Универсальный электрохимический копировально-прошивочный станок

размерами  $150 \times 150 \times 100$  мм (длина – ширина – высота). Станок занимает небольшую площадь и не требует подключения к магистралям холодной технической воды и сжатого воздуха. Приоритетные области использования станка: ювелирное производство, геральдика, инструментальное производство (пресс-формы, пуансоны), детали точного приборостроения и медицинского

инструмента. Станок успешно используется в условиях как единичного, так и массового производства.

В станке заложены передовые технические решения в области технологии прецизионной электрохимической обработки, что позволяет обрабатывать заготовки с обеспечением высоких технологических показателей из широкого спектра металлов и сплавов, включая титановые, жаропрочные сплавы, металлокерамику (металлокерамические твёрдые сплавы) и наноструктурированные материалы.

Станки серии ET500 могут осуществлять обработку заготовок по площади до  $700 \text{ мм}^2$  с погрешностью обработки менее  $0,02 \text{ мм}$  и шероховатостью поверхности до  $Ra 0,02 \text{ мкм}$  при отсутствии на обработанной поверхности зоны термического влияния.

К станкам серии «ET» относятся и более габаритные и мощные станки серий ET1000, ET3000, ET6000, ET8000. Структурно все они

имеют: механическую систему, генератор импульсов, автоматизированную систему управления технологическим процессом на базе CNC системы УЧПУ, гидравлическую систему (для очистки и подачи электролита на станок), систему обеспечения экологической чистоты процесса, что необходимо, например, для обработки хромосодержащих сталей и сплавов.

Станки серии «ЕТ» способны работать по алгоритмам, характерным для всех наиболее распространённых в настоящее время технологических схем проведения электроэрозионной обработки, в частности, для:

- высокопроизводительной электрохимической обработки с постоянной подачей на постоянном токе с прямой и обратной полярностью;

- работы по импульсно-циклической схеме (см. рис. 5.15);

- импульсной электрохимической обработки вибрирующим электродом-инструментом;

- работы по оригинальной ЕТ-технологии прецизионной импульсной электрохимической обработки на прямой и обратной полярности (см. раздел 5.5.1).

**Специализированные станки** составляют большую гамму электрохимических станков. К ним относят станки, используемые для обработки как наружных, так и внутренних поверхностей, в том числе станки: электрохимического струйного прошивания отверстий (см. рис. 5.2, б), анодно-механической резки заготовок (см. рис. 5.6, а), электрохимической обработки цилиндрических поверхностей (см. рис. 5.6, б), удаления заусенцев и притупления острых кромок (см. рис. 5.10), электрохимического шлифования плоскостей (см. рис. 5.7, а), электрохимического хонингования отверстий (см. рис. 5.8, а), электрохимического суперфиниширования цилиндрических поверхностей (см. рис. 5.8, б), электрохимической заточки режущего инструмента (см. рис. 5.6, б); электрохимического маркирования, протягивания и калибрования (см. рис. 5.5).



**Специальные электрохимические станки** используют в крупносерийном производстве, например, для двухсторонней обработки пера турбинных лопаток длиной до 1 м (см. рис. 5.3, б), вырезания плоских заготовок сложного контура (см. рис. 5.4, б), прошивания профильных отверстий диаметром от 1 до 12 мм и глубиной до 800 мм, двухстороннего полирования крышек шатунов и выполнения других специфических операций.

Для обработки профиля пера лопаток применяют станки с горизонтальным или вертикальным направлением подачи электродов-инструментов.

На рисунке 5.30 представлен внешний вид электрохимического станка модели ЭХС-5000, предназначенного для двухстороннего объёмного формирования поверхностей сложной формы различных дета-



Рис. 5.30. Электрохимический станок ЭХТ-5000 для обработки турбинных лопаток

лей, в том числе лопаток компрессорных установок и авиационных двигателей из титановых и жаропрочных сплавов. Станок представлен на рисунке без рабочей станции, обеспечивающей электропитание рабочей зоны, и стойки управления. Заготовка устанавливается в рабочую камеру диаметром 360 мм и высотой 220 мм, расположенную на столе

станка. На рисунке рабочая камера находится в открытом положении с поднятой крышкой. При работе зона обработки закрывается двумя подвижными кожухами, перемещающимися по направляющим стола.

Высота обрабатываемых на станке лопаток находится в пределах 30...120 мм, а ширина — 20...70 мм. Следящие системы обеспечивают точность позиционирования электродов в пределах  $\pm 2$  мкм.

Поверхности, обработанные электрохимическим способом на данном станке, не имеют дефектного слоя, остаточных напряжений и микротрещин, отсутствует износ электрода-инструмента. Одним комплектом электродов при соблюдении требований к технологическому процессу можно изготовить неограниченное количество идентичных изделий. ЭХРО заготовок на станке ЭХТ-5000 включает в себя выполнение чистовой операции с высоким качеством и точностью обработки. Никаких дополнительных доводочных операций после изготовления детали на данном станке не требуется.

К достоинствам данного станка относится автоматизированное управление процессом, широкий диапазон регулирования параметров обработки, высокая точность позиционирования электродов и поддержания межэлектродных зазоров, высокая степень защиты от коротких замыканий.

**Станки для электрохимической размерной обработки по схеме течения** (см. рис. 5.4, в) создают на базе токарных станков с учётом специфических условий электрохимической обработки. Детали станка, имеющие контакт с электролитом, должны быть выполнены из нержавеющей стали, а подвижные части герметизированы с помощью манжет и уплотнений. Шпиндель станка и электрод-инструмент должны быть надёжно изолированы. Зону обработки заготовки необходимо закрыть щитками с окнами для наблюдения за процессом. Используют станки с горизонтальным и вертикальным расположением шпинделя. Источники питания таких станков обычно имеют предельную силу тока до 1000 А и могут быть установлены в корпусе механической части станка.

**Электрохимические протяжные станки.** Эти станки по конструкции близки к токарным станкам, поскольку поступательное перемещение инструмента может сопровождаться вращением заготовки. Скорость продольной подачи электрода-инструмента в таких станках плавно регулируется в пределах 12...480 мм/мин, а окружная скорость вращения заготовки находится в диапазоне от 30 до 100 м/мин. На рисунке 5.31 приведён внешний вид электрохимического протяжного

станка, предназначенного для чистовой обработки отверстий различного профиля.

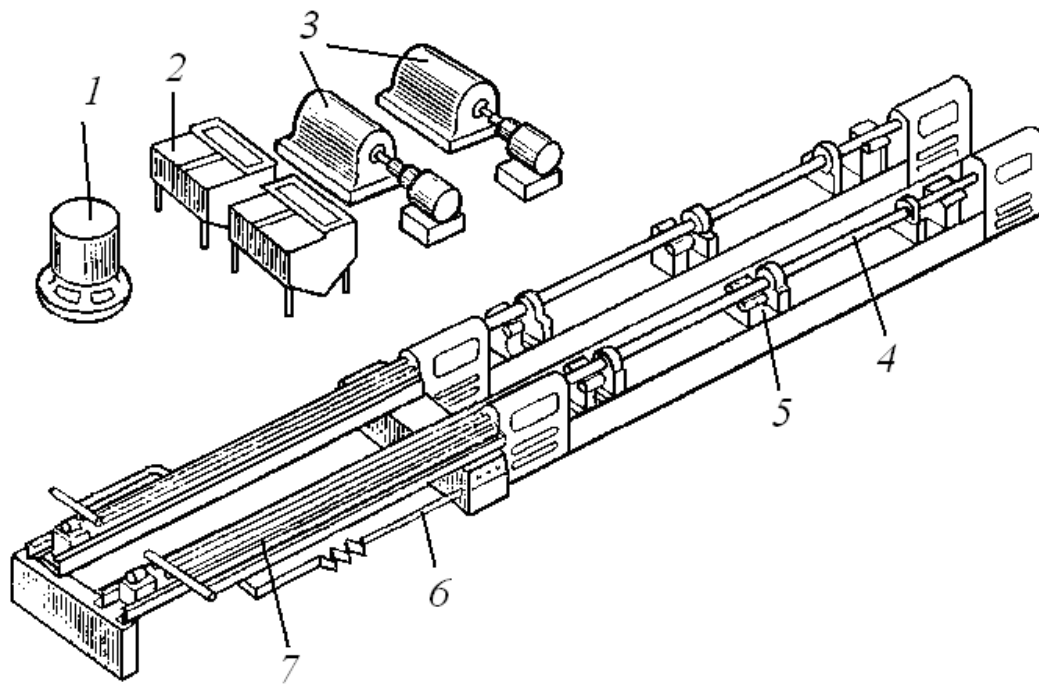


Рис. 5.31. Электрохимический протяжной станок

На станке можно обрабатывать одновременно две заготовки. Ванны 2 для хранения электролита и агрегат очистки 1, как правило, делают общими, а насосы 3, источники питания и систему подачи инструмента — отдельными для обработки каждой заготовки. При протягивании отверстий большой длины заготовку 4 закрепляют в нескольких местах и в этих же местах подают на заготовку напряжение. На рисунке 5.31 показан электрохимический протяжной станок с одной промежуточной опорой 5, которая служит как токопровод для подачи напряжения на электрод-инструмент. Для подвода тока к электроду-инструменту, находящемуся внутри заготовки, используют либо скользящий контакт, либо складывающиеся жёсткие пластины 6, которые по мере движения могут раздвигаться вдоль штанги 7.

Станки, работающие по схеме протягивания, занимают значительные площади, так как штанга выходит за пределы заготовки не менее, чем на её длину. Кроме того, для них требуются достаточно мощные источники питания и насосы повышенного напора. Если

размеры станка превышают 3 м, то его оснащают переносным пультом управления с гибким кабелем.

*Станки для разрезания заготовок* могут иметь электрод-инструмент в форме диска, ленты или проволоки.

На отрезных электрохимических станках, использующих электрод-инструмент в виде диска, заготовка закрепляется неподвижно, а диску придаётся вращение. Диск толщиной 0,6...1,5 мм вращается со скоростью 25...35 м/с и перемещается в направлении движения подачи с помощью следящей системы, поддерживающей постоянный межэлектродный зазор. Обработка происходит обычно в открытой ванне с подачей электролита поливом в зону реза.

Как правило, на станках для электрохимического резания заготовок вращающимся диском создаются условия обработки и подбираются режимы, обеспечивающие комбинирование процесса электролиза с процессами электроэрозионного растворения материала и удаления продуктов обработки механически вращающимся диском. Такая обработка получила название анодно-механической резки (см. рис. 5.6), а применяемое оборудование — станки для анодно-механической резки.

На рисунке 5.32 представлен анодно-механический дисковый отрезной станок модели 4А821. Он предназначен для разрезания проката сечением, вписывающимся в квадрат со стороной 400 мм, выполненного из нержавеющей, кислотостойких и других высоколегированных или закалённых сталей, трудно поддающихся обработке резцом.

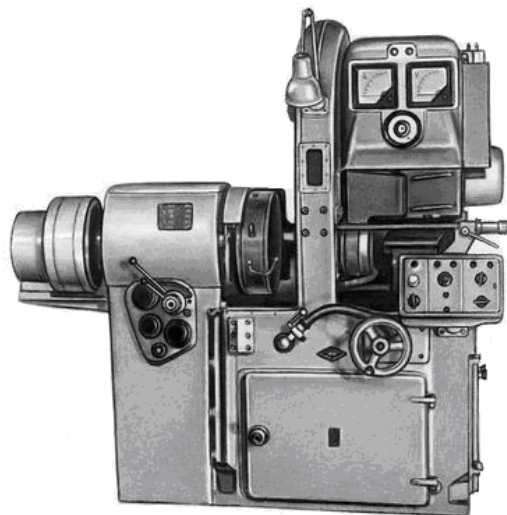


Рис. 5.32. Станок анодно-механический отрезной дисковый модели 4А821

Аналогично работают ленточные станки, но на них в качестве электрода-инструмента, являющегося анодом, используют поступательное перемещение ленты.

Более широкими технологическими возможностями обладают станки с непрофилированным электродом-инструментом в виде проволоки диаметром 0,3...2 мм. Станки такого типа оснащены следящими устройствами для перемещения заготовки в плоскости или в пространстве, что позволяет получить любой контур реза. В станках устанавливают насосы высокого давления (1,5...2 МПа), чтобы на выходе сопла скорость электролита достигала 60...80 м/с. Поскольку диаметр сопла невелик (до 2...2,5 мм), расход жидкости и затраты энергии на её прокачку незначительны.

### **5.7.3. Узлы и системы электрохимических станков**

**Источники питания.** Источники питания электрохимических станков преобразуют переменное напряжение электрической сети в постоянное или униполярное импульсное напряжение. Во всех случаях, кроме обработки струйным методом, выходное напряжение источника питания обычно не превышает 36 В. Сила тока может достигать 30000 А и зависит от мощности источника питания.

Источники могут быть со ступенчатым и плавным регулированием силы тока или напряжения и стабилизацией выходных параметров. Они бывают двух видов: электромеханические и статические. Электромеханический источник питания представляет собой механически связанные электродвигатель и генератор, вырабатывающий ток требуемого напряжения. При работе генератора возникают шум, вибрации. Электромеханические источники питания сложны в обслуживании, имеют низкий КПД и в настоящее время используются редко.

Благодаря развитию выпрямительной техники были созданы *статические* источники питания на селеновых и кремниевых выпрямителях. Наиболее перспективными являются источники с управляемыми выпрямителями, называемыми тиристорными преобразователями, с системами защиты от перегрузок. Некоторые преобразователи

позволяют менять полярность напряжения на выходе, их называют реверсивными.

Простейшими статическими источниками питания являются селеновые неуправляемые выпрямители, состоящие из трансформатора и выпрямителя. Серийно выпускаются тиристорные источники питания типа ВАК (выпрямительный агрегат кремниевый), и ВАКР (реверсивный) с силой выходного тока до 25000 А. Они имеют устройства для автоматического поддержания заданной силы тока, напряжения, плотности тока, дают возможность регулировать напряжение от нескольких вольт до 36 и даже до 48 В. Чтобы получить импульсное напряжение, используют специальные источники питания или приставки, подключаемые к источникам питания с постоянным напряжением.

Для правильного выбора промышленного источника питания необходимо учитывать потребность в реверсировании и рассчитать максимальную силу выходного тока. При изготовлении деталей из различных сплавов напряжение источника берут по наибольшему граничному значению для всех обрабатываемых на станке материалов. При определении силы тока на выходе источника питания расчёт следует выполнять для заготовок, обработка которых потребует наибольшего тока, по формуле

$$I_{un} = I/k_u, \quad (5.29)$$

где  $I_{un}$  — сила тока источника питания;  $I$  — сила тока, необходимая для анодного растворения обрабатываемой поверхности заготовки;  $k_u$  — коэффициент загрузки источника питания при режиме длительной работы. Для разных типов источников питания  $k_u$  колеблется в пределах от 0,65 до 0,98.

Расчёт силы тока для осуществления процесса ЭХРО выполняется по формуле, полученной из формул (5.8) и (5.9)

$$I = \rho_i S = v_s S \rho_m / k_{эx} k_{вm}, \quad (5.30)$$

где  $v_s$  — расчётная скорость движения подачи электрода-инструмента;  $S$  — площадь рабочей части электрода-инструмента.

При обработке по схеме с неподвижными электродами требуемая сила тока со временем меняется. Расчёт в таком случае ведут по скорости съёма в начальный момент времени, когда межэлектродный зазор равен  $\delta_o$ :

$$v_{S_o} = k_{вм} k_{эж} \gamma_{эл} U_{эл} / (\rho_m \delta_o).$$

При расчёте площади рабочей части электрода-инструмента следует учесть наличие на нём нерабочих участков. Это могут быть щели, отверстия, площадки, покрытые диэлектриком, и другие виды поверхностей. В этом случае площадь рабочей части электрода-инструмента

$$S = S_o - S_I. \quad (5.31)$$

где  $S_o$  — общая площадь рабочей части электрода-инструмента;  $S_I$  — площадь нерабочих участков. Расчёт общей площади  $S_o$  для схемы электрохимического разрезания выполняют для момента прохождения инструментом максимального размера поперечного сечения, например, диаметра заготовки.

По известным напряжению и силе тока источника питания можно найти потребляемую им мощность

$$N = I_{un} U / \eta_{un}, \quad (5.32)$$

где  $\eta_{un}$  — КПД источника питания.

**Выбор токоподводов.** Ток от источника питания к механической части станка передают по гибким или жёстким шинам. При силе тока до 100 А используют отдельные провода большого сечения или их наборы. Если сила тока не превышает 1000...1200 А, то применяют наборы гибких медных оплётков или пакеты медной фольги. При большей силе тока используют шины в виде полос из меди, алюминия или их сплавов. Иногда токоподводы делают охлаждаемыми (воздухом или водой).

Площадь сечения токоподвода  $S_m$  находят из условия прохождения по нему тока с предельной плотностью  $\rho_i^{max}$  по формуле

$$S_m = I / \rho_i^{max}. \quad (5.33)$$

Для медных токоподводов без охлаждения  $\rho_i^{max} = 1...2 \text{ А/мм}^2$ , для алюминиевых  $\rho_i^{max} = 0,8...1,5 \text{ А/мм}^2$ . При охлаждении водой  $\rho_i^{max} = 3...6 \text{ А/мм}^2$  и  $\rho_i^{max} = 2...3 \text{ А/мм}^2$  соответственно для медных и алюминиевых проводов.

Площади контакта  $S_k$  в местах соединений рассчитывают по формуле

$$S_k = I / \rho_{i_k}, \quad (5.34)$$

где  $\rho_{i_k}$  — предельная плотность силы тока, проходящего через контакт (без охлаждения  $\rho_{i_k} \leq 1 \text{ А/мм}^2$ , с охлаждением  $\rho_{i_k} \leq 8 \text{ А/мм}^2$ ).

**Системы подачи электролита.** Если процесс ЭХРО протекает в течение нескольких секунд, например, при маркировании деталей по схеме с неподвижными электродами, то электролит не успевает загрязниться продуктами обработки. В этих условиях обработку ведут в стационарном электролите. При времени процесса до 8...10 с для обновления электролита в зоне электродов могут быть использованы ультразвуковые или низкочастотные вибрации электродов или лента, перемещаемая через межэлектродный промежуток.

Если изготавливают детали, предназначенные для перемещения газов или жидкостей (например, крыльчатки компрессоров, насосов, шнеков), то электролит можно перемещать за счёт вращения самой заготовки. Жидкость протекает по зазору между электродами со скоростью, регулируемой частотой вращения заготовки.

В остальных случаях для прокачки электролита через МЭП используют насосы.

При выборе насоса определяется скорость движения электролита, требуемый его расход, перепад давлений на входе и выходе, противодавление и напор насоса. Под напором насоса  $H$  (м) понимается удельная механическая работа, передаваемая насосом перекачиваемой жидкости:

$$H = E/G,$$



где  $E$  – механическая энергия,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $G$  – вес перекачиваемой жидкости,  $\text{Н}$ .

При этом напор, создаваемый насосом, и расход перекачиваемой жидкости  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{час}$ ) зависят друг от друга. Эта зависимость отображается графически в виде падающей характеристики напора  $H$  при росте расхода жидкости  $Q$ .

В таблице 5.3 приведены рекомендуемые для различных схем электрохимической обработки диапазоны скоростей электролита и напоров насоса.

Таблица 5.3

Рекомендуемые параметры для выбора насосов

Схема обработки	Средняя скорость течения электролита, м/с	Противодавление, Па	Напор насоса, м
Обработка неподвижным электродом-инструментом	12...20	$(0,2...0,5) \cdot 10^5$	30...80
Прошивание:			
- отверстий и мелких полостей	6...10	$(1...1,5) \cdot 10^5$	100...150
- крупных полостей	10...16	$(0,5...0,8) \cdot 10^5$	30...80
- обработка профиля пера лопатки	15...20	$(0...0,5) \cdot 10^5$	30...50
Точение*	10...15	$(0...0,5) \cdot 10^5$	30...50
Протягивание	9...18	$(0,2...1,5) \cdot 10^5$	40...80
Разрезание:			
- иском*	10...12	-	-
- непрофилированным электродом-проволокой	6...18	-	150...250
Шлифование	12...15	$(0,2...0,5) \cdot 10^5$	30...80

\* – подача электролита осуществляется поливом.

Некоторые схемы прокачки электролита с соответствующими пояснениями по областям их использования представлены на рисунке 5.11.

### *Агрегаты очистки электролита от продуктов обработки.*

При ЭХРО в электролите происходит накопление продуктов обработки. При малых межэлектродных зазорах в загрязнённом электролите между электродом-инструментом и заготовкой может произойти пробой МЭП и короткое замыкание. В связи с этим во время циркуляции электролита по замкнутому контуру после его выхода из МЭП проводят очистку загрязненного электролита от продуктов анодного растворения.

Очистка электролита может выполняться несколькими способами. Наиболее часто применяют метод *отстоя* отработанного электролита в ваннах. Однако для ванн объёмом  $V$  более  $0,4...0,5 \text{ м}^3$  отстой занимает слишком много времени, а потому этот метод очистки часто используют в комбинации с другими способами: центрифугированием, очисткой пресс-фильтрами и вакуумными фильтрами, электрофлотацией или осаждением продуктов обработки с помощью коагуляторов.

*Метод центрифугирования* используют для очистки электролита на станках, работающих независимо от других. Серийно выпускают отстойные центрифуги периодического действия, шнековые осадительные центрифуги непрерывного действия. Эти устройства обеспечивают очистку электролита с концентрацией в нём продуктов обработки до  $3 \text{ кг/м}^3$ . Центрифуги оснащают устройствами для автоматической выгрузки отходов.

Если на участке работает несколько электрохимических станков, то используют централизованную систему очистки электролита для всех станков на основе применения *вакуумного фильтра*, схема работы которого показана на рис. 5.33. Электролит поступает во вспомогательную ванну 1. В эту же ванну частично погружен вращающийся барабан 2, наружная

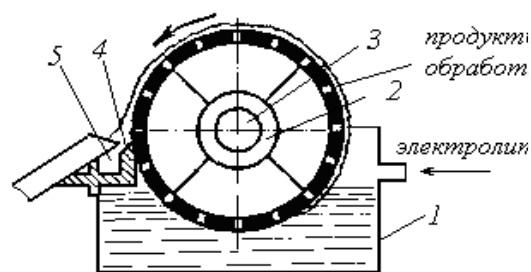


Рис. 5.33. Схема работы вакуумного фильтра

поверхность которого покрыта мелкой сеткой. Воздух из внутренней полости барабана 2 откачивают вакуумным насосом через центральное отверстие 3.

Жидкость через ячейки попадает в барабан, а продукты обработки, оседая на наружной поверхности барабана, закрывают ячейки сетки. Когда участок барабана выходит из жидкости, за счёт разности давлений снаружи и внутри барабана продукты обработки как бы прилипают к сетке. В процессе вращения ротора скребок 4 очищает барабан и сбрасывает загрязнения в приёмный лоток 5.

Вакуумные фильтры надёжны в работе, позволяют получить отходы, пригодные для дальнейшей переработки: гидроксиды металлов, содержащиеся в продуктах обработки, успешно используются в качестве сырья для порошковой металлургии. Применение вакуумных фильтров позволяет создавать автоматические системы очистки электролита. Загрязнённость электролита после очистки в таких устройствах не превышает 0,5 кг твёрдого вещества в 1 м<sup>3</sup> жидкости.

*Пресс-фильтры* представляют собой систему улавливателей (фильтровальной ткани, бумаги), через которую под давлением прокачивают электролит. Такие агрегаты имеют высокую производительность, полностью механизированы, позволяют получить высокую чистоту электролита (содержание примесей 0,05 ...5 кг/м<sup>3</sup>). К их недостаткам следует отнести большие габариты, необходимость замены фильтрующих элементов после их загрязнения.

Очистка электролита *электрофлотацией* заключается в отделении продуктов обработки с помощью электрического поля, создаваемого в ванне, после чего продукты обработки вместе с частью электролита сливают в отстойник или центрифугируют. Процесс длится несколько десятков секунд. Способ позволяет получить электролит с загрязнённостью в пределах 0,05...0,2 кг/м<sup>3</sup>. Этот способ недостаточно надёжен и требует дополнительных затрат энергии на флотацию. Для удаления продуктов обработки используются химические вещества — коагуляторы, способствующие переходу продуктов обработки в нерастворимое состояние и выпадению в осадок. Коагуляторы вызывают

образование пены, которая может нарушать стабильность процесса анодного растворения, поэтому для больших ванн (объёмом более 1 м<sup>3</sup>) их не используют.

#### **5.7.4. Системы регулирования режима электрохимической размерной обработки**

В электрохимических станках для оптимизации процесса электролиза и создания стабильных условий по обеспечению заданной производительности, точности обработки или шероховатости поверхности используют разнообразные системы регулирования параметров режима обработки. Регулирование может осуществляться вручную оператором, автоматически следящими системами или управляющей программой при изготовлении деталей на станках с ЧПУ. В качестве основного параметра управления режимом в зависимости от схемы и условий обработки используют:

- при неподвижных электродах – постоянную плотность тока  $\rho_i$ ;
- при ЭХРО заготовок с постоянной площадью обрабатываемой поверхности – постоянную силу тока  $I$ ;
- при необходимости удалить определённый объём металла — количество электричества  $q$ ;
- в случае обработки заготовок с переменной площадью – оптимальное значение торцового межэлектродного зазора  $\delta_m$ .

Постоянство плотности тока  $\rho_i$  осуществляют по мере анодного растворения металла заготовки и роста межэлектродного зазора пропорциональным увеличением напряжения на электродах.

Регулирование силы тока  $I$  и обеспечение её постоянного значения достигают изменением скорости подачи  $v_s$  электрода-инструмента к заготовке. Если ток увеличивается, то скорость подачи снижают, пока сила тока не достигнет установленного значения. В свою очередь,  $v_s$  регулируют вручную или с помощью автоматических систем, которые находят применение при электрохимическом прошивании отверстий, протягивании, шлифовании, точении, разрезании.

Дозирование количества электричества  $q$  осуществляют с помощью прибора типа ваттметр с выключателем. После прохождения заданного количества электричества ток автоматически выключается. Эта система используется для чистовой обработки каналов и полостей в гидроаппаратуре или заготовках других деталей.

Более сложно регулировать режим ЭХРО при объемном формообразовании в заготовках полостей с переменной площадью. Регулировка в этих случаях осуществляется поддержанием постоянным оптимального размера торцевого межэлектродного зазора. Для этого электроды при выключенном напряжении периодически сближаются

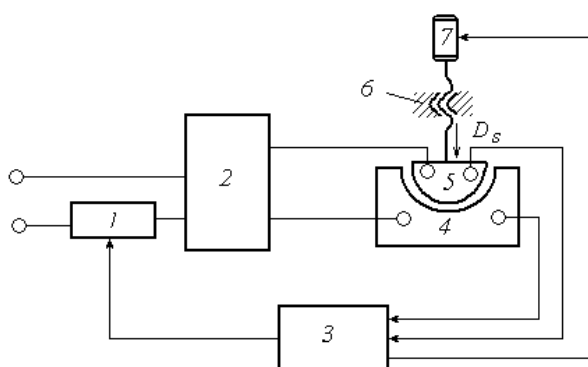


Рис.5.34. Схема системы регулирования режима ЭХРО

вплоть до контакта. Структурная схема действия системы данного способа регулирования приведена на рисунке 5.34.

Электрод-инструмент 5 в процессе обработки перемещается системой движения подачи 6 к заготовке 4 с постоянной скоростью подачи  $v_s$ , определяемой текущей площадью обработки. Через некоторое время прерывателем 1 отключают источник питания 2 и сближают электроды 4 и 5 до касания. Момент касания улавливается системой 3 автоматического регулирования процесса ЭХРО. От блока 3 сигнал поступает на двигатель 7 системы движения подачи 6. По этому сигналу электрод-инструмент 5 отводится на заданный размер межэлектродного зазора, после чего от блока 3 поступает сигнал прерывателю 1 на включение источника 2.

Чем чаще происходит регулирование зазора, тем выше точность формообразования детали, но при этом снижается производительность процесса, так как растворение металла происходит только при протекании рабочего тока.

Логическое развитие схема регулирования межэлектродного торцового зазора на основе создания периодического контакта электрода-инструмента с заготовкой получила в системах управления при импульсно-циклическом способе ведения электрохимической обработки, используемом в современных копировально-прошивочных станках. Описание принципа контроля межэлектродного зазора и пример схемы реализации импульсно-циклической схемы регулирования зазора и управления процессом приведены в разделе 5.4.4.

## 6. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

В группе технологических методов нанесения покрытий, включающей физические, химические и электрохимические методы, электрохимические методы являются наиболее распространёнными. Они характеризуются широким функциональным назначением, возможностью получения широкого диапазона толщины покрытий — от нанометров до нескольких миллиметров, достаточно простой технологией и экономичностью. Электрохимические покрытия используют для восстановления изношенных деталей, защиты поверхности от коррозии, создания диэлектрических свойств поверхности заготовки, получения оттисков поверхностей сложных форм, подготовки поверхностей под пайку. Часто их применяют и как декоративные покрытия, направленные на придание поверхности определённого цвета, рельефа, формы и рисунка.

Возможность регулирования толщины слоя изменением продолжительности процесса и плотности тока, а также уменьшения расхода цветных металлов на покрытие поверхности выгодно отличает электрохимические покрытия от других их видов. К основным недостаткам методов этой группы относят необходимость применения внешнего источника постоянного тока, необходимость обезвреживания сточных вод на основе их регенерации, сложные санитарно-гигиенические условия труда.

Электрохимические покрытия по виду наносимого на поверхность материала подразделяют на металлические, оксидные и фосфатные. В системе общей классификации покрытий оксидные и фосфатные покрытия относят к неметаллическим неорганическим покрытиям. Формирование металлических, оксидных и фосфатных покрытий осуществляют разными технологическими методами. Металлические покрытия получают способом осаждения материала из растворов солей на катоде. Оксидные и фосфатные покрытия создают получением оксидных или фосфатных плёнок на поверхности анода.

## 6.1. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ОСАЖДЕНИЕМ МЕТАЛЛОВ ИЗ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ

*Физико-химические основы нанесения гальванических покрытий.* Технологические методы данной группы направлены на получение металлических покрытий и реализуются путём осаждения ионов металла на катоде, которым в данных процессах выступает заготовка (основа). Процессы, проходящие в системе «электролит — электроды» при осаждении металла из раствора электролита на катоде описывается равенством



где Me — условное обозначение марки металла.

Ионы металла, находящиеся в растворе, под действием приложенного к электродам напряжения подходят к катоду и восстанавливаются на нём, присоединяя электроны и формируя на начальном этапе центры кристаллизации или кристаллические зародыши. В дальнейшем процесс образования покрытия связан с ростом кристаллов, формированием кристаллитов и приобретением покрытием чётко выраженной кристаллической структуры.

Пример реализации электрохимического осаждения меди из водного раствора  $\text{CuSO}_4$  представлен в виде физико-химических реакций с их описанием в разделе 5.1.

Методы электролитического осаждения металлов на поверхности металлических и неметаллических изделий получили название *гальванотехники*, а сами покрытия называют также гальваническими покрытиями [20].

По функциональному назначению гальванотехнику подразделяют на гальваностегию и гальванопластику.

*Гальваностегия* — электролитическое осаждение тонкого слоя металла на поверхности какого-либо металлического изделия для защиты его от коррозии, повышения износоустойчивости, предохранения от цементации или для декоративных целей.



Осадки, полученные методом гальваностегии, имеют малую толщину (от единиц нанометров до десятков микрометров), характеризуются мелкозернистой структурой, надёжным адгезионным сцеплением с материалом основы, высокой плотностью. Однако они всегда содержат поры и примеси в количестве  $1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-4}$  части от всей массы покрытия.

Примесями в таких покрытиях могут быть газы  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  либо твёрдые включения углерода, серы и других веществ. Примеси снижают прочность и пластичность покрытия. При наличии примесей возможно появление на покрытии трещин, вспучиваний, ухудшается его сцепление с основой. В покрытиях этого типа создаются значительные внутренние напряжения, значения которых зависят от структуры и природы осаждаемого металла и могут достигать 500 МПа. Большие величины внутренних напряжений в ряде случаев вызывают растрескивание покрытий, отслаивание их от основного металла и снижение антикоррозионных свойств. Возникновение внутренних напряжений объясняется тем, что кристаллы при их росте не успевают принять равновесную структуру, в связи с этим параметры их кристаллических решёток искажаются.

Внутренние напряжения особенно велики в покрытиях хромом, платиновыми металлами, металлами подгруппы железа, а также в покрытиях электрическими сплавами.

*Гальванопластика* — получение точных металлических копий методом электролитического осаждения металла на металлическом или неметаллическом образце с последующим отделением сформированного покрытия от образца.

Целью гальванопластики является получение точной металлической копии формы поверхности образца. Методом гальванопластики получают прочные и массивные покрытия, легко отделяющиеся от покрываемой поверхности. Основное применение как покрытие в гальванопластике имеет медь, более ограниченное применение находят железо, никель, серебро, золото, а также олово, хром и их сплавы.

Если копируемое изделие изготовлено из материала непроводящего электрический ток, то для нанесения металлического покрытия его покрывают тонким слоем электропроводного материала, а затем уже наносят гальваническое покрытие. Этот слой обычно делают легко отделяющимся от поверхности изделия, например, из порошка графита, наносимого напылением. В гальваническом производстве труб и других полых предметов электролитическое осаждение в ряде случаев производят на сердечники из легкоплавких сплавов, которые потом удаляют путём нагрева выше температуры их плавления.

**Металлические покрытия.** К основным используемым в промышленности металлическим покрытиям относят покрытия медью, цинком, кадмием, оловом, никелем, хромом, свинцом, серебром, золотом, покрытия из сплавов, в частности, Cu – Zn, Cu – Sn, Cr – Mo, Fe – Ni, Cr – W, Au – Sb, V – Ni – Cr. Широкое распространение получили многослойные комбинированные покрытия, обеспечивающие лучшие функциональные свойства, чем однослойные, в том числе сцепление покрытия с основой.

**Цинкование** — покрытие цинком. Цинкование является наиболее распространённым способом металлизации железа для защиты его от атмосферной коррозии. Защитные свойства покрытия сохраняются даже при малой толщине слоя, а также при наличии на поверхности заготовки пор. Слой цинка со временем заметно темнеет. Этим объясняется невозможность использования цинка как декоративного покрытия. Для защиты цинкового покрытия от коррозии его покрывают оксидной плёнкой или хромируют.

**Кадмирование** — покрытие кадмием. Кадмиевое покрытие, также как и цинковое, применяют для защиты чёрных металлов от коррозии. Кадмий более устойчив к коррозии, чем цинк. Поэтому его применяют для защиты изделий, работающих в агрессивных средах, таких как морская вода. Высокая пластичность кадмиевого покрытия используется при кадмиевом покрытии резьбовых поверхностей деталей с целью обеспечения герметичности и антикоррозионной стойкости резьбовых соединений.

*Оловянирование (лужение)* — покрытие поверхности изделий оловом. Главные преимущества такого покрытия состоят в безвредности олова для человеческого организма и легкости пайки изделий с применением олова в качестве припоя. Покрытие оловом имеет плотную структуру и хорошо защищает металл механически. Используют это покрытие в пищевой и радиотехнической промышленности. В электрохимических технологиях нанесения покрытий олово применяют довольно редко, что объясняется его дефицитностью и высокой стоимостью.

*Меднение* — покрытие медью. Медные покрытия, как правило, не применяют в качестве самостоятельного гальванического покрытия ни для декоративных целей, ни для защиты стальных изделий от коррозии. Медь довольно быстро окисляется в атмосферных условиях, покрываясь карбонатами и гидрокарбонатами. К тому же повреждение покрытия приводит к интенсивной коррозии основного металла. Медные покрытия используют в качестве подслоя при никелировании, хромировании и при некоторых других процессах. Так, при цементации стальной заготовки те её части, которые не должны насыщаться углеродом, покрывают медью.

*Никелирование* широко применяют при защитно-декоративной отделке изделий. Это покрытие хорошо полируется, его поверхность может быть доведена до зеркального блеска, который в атмосферных условиях сохраняется длительное время. Электролитический никель в два — три раза твёрже железа, а потому никелированные изделия хорошо противостоят истиранию. Никель используют также в качестве подслоя при хромировании. При осаждении никелевых покрытий в большей мере, чем при осаждении других покрытий, требуются тщательность проведения подготовительных операций и, прежде всего, обезжиривания.

*Хромирование* — покрытие хромом. Хромовое покрытие характеризуется высокой химической стойкостью, твёрдостью и износостойкостью. На хром не действуют органические кислоты, сера, сероводород, растворы щелочей. Хром стоек к действию влажной

атмосферы и длительное время сохраняет свой блеск. Высокая твёрдость, низкий коэффициент трения, жаростойкость и высокая коррозионная устойчивость покрытия хромом обеспечивают деталям высокую износоустойчивость. При хромировании заготовок из стали на покрываемой поверхности перед этим создают подслои меди или никеля.

Широкое распространение покрытий деталей хромом сдерживает ряд особенностей процесса хромирования, связанных с низким выходом по току, необходимостью использования очень высоких значений плотности тока при электролизе, отрицательной микрорассеивающей способностью электролитов, приводящей к значительному росту слоя покрытия на микровыступах поверхности. Эти специфические для процесса хромирования особенности приводят к высоким энергетическим затратам на проведение процесса, повышению стоимости изделий с покрытием хромом и необходимости дополнительной обработки поверхности заготовки после нанесения покрытия.

*Свинцевание* — покрытие поверхности свинцом. Это покрытие наносят на изделия из чёрных и цветных металлов в целях защиты их от воздействия некоторых агрессивных газов и растворов, в частности серной и сернистой кислот и их соединений. Свинцовистое покрытие характеризуется низкими твёрдостью и прочностью. Для защиты изделия от коррозии требуется большая толщина свинцовистого слоя, находящаяся в пределах от 20 до 1000 мкм.

*Серебрение* как процесс получения покрытия из серебра широко применяют в гальванической практике для защитно-декоративных целей (ювелирные изделия, музыкальные инструменты и пр.), а также для повышения электропроводности деталей радио- и электроаппаратуры. Серебро обладает высоким коэффициентом отражения света (до 95 %). Поэтому серебрению подвергают фары, рефлекторы, металлические зеркала. Со временем серебряные покрытия тускнеют, а само покрытие характеризуется малой механической прочностью.

*Золочение* — покрытие золотом. Золото по своим декоративным свойствам превосходит все прочие металлы. Оно характеризуется

высокой химической стойкостью, но со временем тускнеет. Кроме ювелирного дела и часового производства золотые покрытия применяют и для защиты от коррозии точных приборов или отдельных их деталей. Недостатками золотых покрытий являются их малые твердость и износостойкость.

**Электролиты и их характеристики.** Электролиты для нанесения гальванопокрытий подразделяют на простые и сложные. Основным компонентом простого электролита является соль неорганической кислоты, которая в водном растворе полностью диссоциирует на ионы. В электролитах этой группы получают рыхлые крупнозернистые осадки при большом выходе по току. Этот метод используют для нанесения покрытий на деталях простой конфигурации и полуфабрикатах (лентах, листах, проволоке). Например, для цинкования поверхности листов используют сульфатный электролит, основным компонентом которого является соль цинка  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ , для кадмирования — сульфатный электролит с основным компонентом соли кадмия  $CdSO_4 \cdot 8/3(H_2O)$ .

В сложных электролитах основным компонентом является комплексная соль. Использование этих электролитов позволяет создавать мелкозернистые, гладкие и равномерные осадки. Комплексные электролиты применяют для получения покрытий на деталях сложной формы.

В электролит вводят добавки, функции которых соответствуют функциям добавок в электролите при электрохимической размерной обработке (см. раздел 5.3).

**Режим нанесения покрытия.** Технологические параметры осаждения покрытия, влияющие на его технико-экономические показатели, включают: вид соли, из которой извлекается металл; свойства материалов анода и катода, в первую очередь, их химический и электрохимический эквиваленты, плотность, валентность и атомную массу; параметры режима электролиза. Режим электролиза определяется характеристиками электролита, механическими характеристиками и электрическими параметрами процесса.

К характеристикам электролита относят состав и концентрацию электролита, значение водородного показателя  $pH$ , температуру электролита, состав и концентрацию добавок органических веществ. Сущность и направления влияния этих характеристик на процесс электролиза детально раскрыт в разделе 5.3. Здесь кратко остановимся только на отдельных аспектах влияния значения этих параметров на технико-экономические показатели процесса нанесения покрытия.

*Концентрацию электролита* характеризуют отношением массы вводимых в раствор компонентов ко всей массе раствора в процентах. Повышение концентрации ведёт к росту производительности процесса. Однако при определённой концентрации электролиты на основе солей становятся насыщенными. В растворе появляются твёрдые частицы, что приводит к нестабильности процесса и появлению примесей в покрытии. В промышленности используют электролиты с концентрацией от 5 до 50 %. Конкретное значение рекомендуемой концентрации электролита зависит от его состава и температуры.

*Температура электролита.* Повышение температуры раствора позволяет применять более концентрированные электролиты. При этом одновременно увеличивается электропроводность раствора и уменьшается пассивация анода. Все эти факторы позволяют использовать более высокие плотности тока и повысить производительность электрохимической обработки. Однако чрезмерное повышение температуры приводит к снижению скорости катодного осаждения материала. На практике применяют электролиты с температурой от 18 до 60 °С.

Существенное влияние на качество покрытия оказывает *водородный показатель ( $pH$ )*, которым является число, характеризующее концентрацию ионов водорода в электролите. Детальное рассмотрение влияния водородного показателя на процесс электролиза, в том числе и при нанесении покрытий, сделано в разделе 5.3.

К механическим характеристикам режима нанесения покрытий относят межэлектродный зазор и параметры устройств, служащих для перемешивания электролита, его фильтрации и покачивания катода.

Наибольшее влияние на технико-экономические показатели проведения электролиза оказывают электрические параметры. К последним относят вид тока, напряжение на электродах  $U$ , (В); силу тока в цепи  $I$ , (А); плотности тока катодную  $\rho_{i_k}$  и анодную  $\rho_{i_a}$  (А/м<sup>2</sup>).

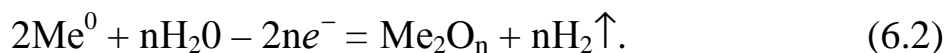
В современной гальванотехнике обработку ведут при большой *плотности тока*, которую вычисляют по формуле  $\rho_i = I/S$  (А/м<sup>2</sup>), где  $S$  – площадь покрываемой поверхности заготовки. Повышение плотности тока до определённых значений способствуют получению мелкозернистой структуры покрытия. Превышение оптимальных значений плотности тока  $\rho_i$  приводит к образованию покрытий со значительной шероховатостью и даже к осаждению металла на поверхности в виде порошка. Последнее свойство широко используют для получения электролизом порошков металлов, необходимых при производстве металлокерамических изделий.

В технологиях нанесения гальванических покрытий используют плотность тока в пределах  $\rho_i = 10 \dots 10^4$  А/м<sup>2</sup>. Для каждого типа покрытия существует свой оптимальный диапазон плотности тока. Так, при покрытии металлов оловом плотность тока выбирают в пределах  $\rho_i = 70 \dots 300$  А/м<sup>2</sup>, при золочении поверхности изделия  $\rho_i = 10 \dots 30$  А/м<sup>2</sup>, при хромировании назначают  $\rho_i = 10^3 \dots 10^4$  А/м<sup>2</sup>.

## 6.2. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДИРОВАНИЕМ АНОДА

В основе создания покрытий этой группы лежит образование на аноде пассивирующей оксидной плёнки. Сам процесс получил название электрохимического оксидирования.

При электрохимическом оксидировании покрываемая заготовка является анодом. Формирование оксидного слоя на аноде (заготовке) происходит в соответствии со следующей электрохимической реакцией:



Оксидные покрытия (плёнки) подразделяют на пористые и беспористые.

*Беспористые оксидные плёнки* имеют малые толщины, предельные значения которых составляют 0,5...2,0 мкм. Оксидные беспористые покрытия наносят на алюминий и его сплавы, а также на Ti, W, Ta, Nb и Zr. Эти покрытия защищают металл от коррозии, повышают его поверхностную твёрдость, улучшают антикоррозионные свойства. Беспористые оксидные покрытия относят к декоративному и диэлектрическому видам покрытий. Их широко используют для создания диэлектрического слоя в полупроводниковых конденсаторах.

Образование беспористых плёнок на алюминии требует применения особых электролитов. Этот процесс возможен лишь в растворах солей слабых кислот: борной, фосфорной, угольной. Образующаяся плёнка напоминает эмалевое покрытие. Она непрозрачна, имеет светло-серый цвет, не имеет пор и по твёрдости приближается к хрому.

Вследствие незначительности толщины и сравнительно низких механической прочности и антикоррозионной стойкости этих плёнок их часто комбинируют с другими видами покрытий.

*Пористое оксидирование* алюминиевых сплавов, широко известное как *анодирование*, является самым распространённым видом обработки поверхностей материалов этой группы. Заготовка в этом случае является анодом, на котором в процессе обработки и образуется труднорастворимая плёнка оксида алюминия  $Al_2O_3$  (рис. 6.1). Толщина плёнки составляет десятки и сотни микрометров.

Пористые анодные плёнки на алюминии используют для защитно-декоративных целей как подслой для нанесения лакокрасочных и некоторых видов гальванических покрытий, а также для электроизоляции,

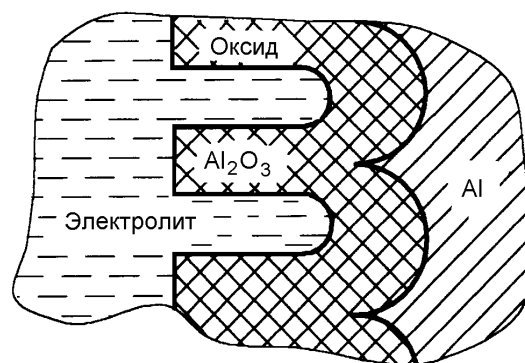


Рис. 6.1. Пористая плёнка на алюминии



повышения поверхностной твёрдости, износостойкости, снижения трения.

Оксидирование поверхностей стальных заготовок характеризуется образованием пористого оксидного покрытия. Такое покрытие выполняет лишь декоративно-защитную функцию. Толщина оксидного покрытия на стали не превышает 10 нм, в связи с чем такие плёнки не могут обеспечить надёжную защиту поверхности от коррозии. Поэтому оксидные покрытия на стали применяют в тех случаях, когда изделие работает в лёгких условиях.

### **6.3. ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Нанесение покрытия — это сложный технологический процесс, включающий четыре этапа, состоящих в свою очередь из ряда операций. К этапам нанесения покрытия относят: подготовку поверхности к нанесению покрытия, непосредственное нанесение покрытия, дополнительную обработку нанесённого покрытия и его контроль [20].

#### **6.3.1. Подготовка поверхности к нанесению покрытия**

От качества подготовки поверхности к покрытию зависит важнейшее его свойство — адгезионная сцепляемость покрытия с основой. Плохая подготовка поверхности к покрытию в процессе эксплуатации изделия часто приводит к отслоению покрытия от основы.

Подготовка изделия к покрытию заключается в создании на покрываемой поверхности определённой шероховатости, удалении имеющихся на ней загрязнений и активации поверхности.

*Шероховатость поверхности под покрытие.* Для повышения сцепляемости покрытия с поверхностью заготовки и уменьшения последующей трудоёмкости его обработки необходимо на поверхности заготовки иметь шероховатость по параметру  $R_z$  не более 0,63...0,8 мкм. При хромировании эти значения должны быть на порядок меньше, поскольку выравнивающая способность электролитов при хромиро-

вании весьма низкая. В связи с этим после нанесения покрытия хромом шероховатость поверхности резко возрастает.

***Загрязнения и методы очистки поверхности.*** К основным видам загрязнений, которые могут быть на поверхности заготовки, относят:

— механические загрязнения, то есть загрязнения, которые химически не связаны с материалом изделия, а просто пристали к поверхности. Такими загрязнениями являются пыль, ветошь, абразивные зерна;

— оксидные плёнки, которые подлежат удалению, так как препятствуют химическому взаимодействию покрытия и материала основы;

— органические загрязнения в виде масла, смазки, воска. Этот вид загрязнений относят к основным, поскольку органические загрязнения приводят к ухудшению адгезионного сцепления покрытия с основой;

— адсорбированные газы, которыми являются осевшие на поверхность заготовки молекулы газов воздуха, главным образом, азота и кислорода;

— растворы солей, к которым относятся легко растворимые в воде соли различных металлов. Эти соли легко удаляются промыванием.

Поскольку различные виды загрязнений удаляются различными способами, то полная подготовка поверхности под покрытие включает ряд последовательных технологических операций. К методам очистки загрязнений поверхности относят: методы механической обработки, термическую обработку, обезжиривание и травление. В некоторых случаях для подготовки поверхности к нанесению покрытия достаточно лишь одного метода удаления загрязнений, в других же случаях применяют все методы, выстраиваемые в строго определённой последовательности. В зависимости от объёма загрязнения отдельные этапы очистки могут повторяться несколько раз. Например,

стальные болты, которые хранились в смазочных материалах, могут проходить неоднократное обезжиривание.

***Способы механической очистки поверхности.*** Механическая обработка поверхности применяется для очистки металла от окалины, ржавчины, оксидных плёнок, литейной корки, старого лакокрасочного материала. Чаще всего этот метод применяется для очистки крупногабаритных изделий и объектов средних размеров с поперечным сечением, обеспечивающим детали высокие прочностные характеристики. При механической очистке загрязнения часто удаляются вместе с верхним слоем металла.

Подготовка поверхности механическими методами может осуществляться абразивной обработкой (пескоструйная, гидropескоструйная, дробеструйная и другие виды абразивной обработки), шлифованием, полированием, крацеванием.

***Абразивная очистка поверхности.*** Осуществляется этот способ обработки в специальных аппаратах барабанного или камерного типов. Рабочие барабаны (камеры) изготавливают из чугуна или сплавов высокой твёрдости. В качестве абразивного материала используют кварцевый песок, корунды, стальную или чугунную дробь, которую часто называют «металлическим песком», и ряд других абразивных материалов.

Под высоким давлением сжатый воздух (либо жидкость) с абразивным материалом выдувается из сопла, направленного на обрабатываемую поверхность. Частицы абразива, ударяясь о металл, очищают его. Обработанная таким методом поверхность металла характеризуется чистотой и равномерной шероховатостью.

***Пескоструйная обработка*** — способ абразивной подготовки поверхности, применимый практически для всех видов покрытий, которые не требуют полированной поверхности. Пескоструйная обработка с использованием сухого кварцевого песка сейчас уже не популярна, так как отличается большой вредностью для оператора, который её проводит. Вместо обычной пескоструйной обработки в настоящее время широко используется обработка стальной или чугунной

дробью, абразивными порошками, применяется также гидropескоструйная очистка.

*Обработка стальной или чугунной дробью (металлическим песком)* получила очень широкое распространение, так как является одним из самых эффективных методов очистки поверхностей заготовок. «Металлический песок» в отличие от кварцевого песка почти не образует пыли. Расход его значительно меньше, а эффективность механического воздействия также достаточно высока. После очистки поверхность деталей становится матовой, покрытой большим количеством кратеров, способствующих прочному сцеплению покрытия с основным металлом.

Для реализации этого метода используется стальная или чугунная дробь с размером частиц от 0,15 до 1,5 мм. «Металлическим песком» обрабатывают практически все металлы (кроме алюминия и его сплавов). Размер частиц и силу потока воздуха, выдуваемого металлическую дробь из сопла, устанавливают в зависимости от толщины стенки металлического изделия.

Металлическая дробь должна изготавливаться из того же материала, что и очищаемая поверхность; возможно использование и других материалов с электрохимическими характеристиками, близкими к характеристикам обрабатываемой поверхности. При выполнении этого требования исключается развитие подплёночной коррозии, причиной которой могут быть частицы дроби, оставшиеся на окрашенной поверхности после очистки.

*Шлифование* — это способ подготовки поверхности перед нанесением защитного покрытия, для реализации которого используются абразивные ленты, бруски и вращающиеся шлифовальные круги.

Шлифование проводят для придания металлу блеска, а также для удаления неровностей. Черновым шлифованием можно удалить с поверхности толстый слой окалина, наплывы металла, заусенцы, бугры, раковины. Реализуются этот способ на специальных станках либо вручную при помощи наждачной бумаги.

Абразивом служат крупные фракции электрокорунда ( $Al_2O_3$ ), карбида кремния (карборунда SiC), наждака (30...35 %  $Fe_2O_3$  и 60...70 %  $Al_2O_3$ ). Размер зерна находится в диапазоне 250...1200 мкм.

Декоративное (тонкое) шлифование проводится специальными эластичными кругами, которые состоят из основы (эластичной части круга) и абразивного материала. В качестве абразива используют мелкие фракции кварца, корунда, наждака. Их наносят на основу при помощи связующих веществ (жидкого стекла, клеев). Основу изготавливают из брезента, кожи, войлока, хлопчатобумажной ткани, фетра и других материалов, которые дальше прессуют, склеивают и прошивают. Эластичный круг зачастую состоит из нескольких слоёв неметаллического материала. Зерно абразивного материала для декоративного шлифования при подготовке поверхности к покрытию по размерам не превышает 75...200 мкм.

*Крацевание.* Крацеванием называют механическую обработку поверхности изделий металлическими щётками. Этим способом хорошо удаляется с поверхности заготовки разрыхлённая окалина и шлак. Процесс крацевания применяют также для улучшения качества покрытий большой толщины.

Щётки для крацевания состоят из деревянной или металлической втулки, в которую воткнуто несколько рядов подвижных пучков проволоки. Их различают по типам, размерам и материалам рабочей (ворсовой) части. Основными показателями качества щётки являются материал и диаметр ворсинок, свободная длина ворса, плотность рабочей части, ширина и диаметр щётки. Щётки изготавливают из тонкой латунной, стальной или медной проволоки диаметром 0,05...0,10 мм для чистовой обработки и 0,3...0,6 мм — для черновой обработки. При обработке поверхностей под нанесение мягких гальванических покрытий используют волосяные, капроновые или травяные щётки.

Крацевание обычно выполняют на станках или с помощью ручного пневматического или электрического инструмента. Щётки насаживаются на шпиндель станка или используемого для этого ручного электроинструмента. При работе им придаётся вращательное движение. Иногда крацевание производят ручными щётками.

Окружная скорость щёток находится в пределах от 10 до 60 м/с. При обработке металлов мягкими щётками с неметаллическим ворсом

окружная скорость вращения щёток принимается в пределах 30...40 м/с; при обработке металлов тонкими проволочными щётками с металлическим ворсом — 20...35 м/с; при очистке поверхности от окалины, ржавчины и других дефектов широкими проволочными щётками с диаметром ворса более 0,4 мм — 15...25 м/с; при зачистке сварных швов, литья с применением тонких дисковых щёток с ворсом, сплетённым в жгут, — 30...45 м/с.

В процессе крацевания вращающиеся щётки должны касаться заготовки только кончиками проволоки, так как сильный прижим щётки к заготовке увеличивает съём металла и изгибает проволоку.

Крацевание жёсткими щётками позволяет получить матовую поверхность изделия, а при обработке мягкими щётками формируется блестящая или полублестящая поверхность. Матовая поверхность характеризуется неровностями с размерами сравнимыми с длиной волны видимого излучения, вследствие чего происходит хаотичное (диффузное) рассеивание света. Это приводит к тусклому цвету поверхности и выравниванию слабого блеска по всем направлениям. Процесс получения поверхностей таких свойств получил название матирования.

Крацевание является эффективным способом предупреждения выпуска недоброкачественной продукции. Если гальваническое покрытие имеет невидимые пузыри или непрочное сцеплено с основным металлом или промежуточным подслоем, то под действием проволочной щётки происходит отслаивание такого покрытия. Скрытый дефект, таким образом, сразу выявляется.

*Матирование поверхности* заготовки осуществляют кроме обработки металлическими щётками и другими способами, в том числе травлением и дробеструйной обработкой. Целью матирования при подготовке поверхности к нанесению покрытия является создание формы и размеров шероховатости поверхности, обеспечивающих прочное сцепление покрытия с основой.

Если поверхность ровная, то для матирования используют простой круг с маленьким ворсом или без него. Изделия, которые имеют

сложную форму, матируют с помощью специальных кругов, которые изготавливают из полимерных материалов (нейлона, капрона) или морской травы (сизаль, фибер). Для матирования металлов могут быть использованы пасты на основе парафина (стеарина), солидола и абразивного материала — маршаллита, кирпичной пыли, наждака.

Кроме шлифовальных кругов в качестве инструментов для матирования могут использоваться шлифовальные ленты. Ленты применяют в виде бесконечных ремней с нанесённым абразивным материалом. Применяют также тканевые ленты, склеенные между собой полосы шлифовальной шкурки на бумажной или матерчатой основе.

***Обезжиривание поверхности.*** Обезжиривание выполняют химическими, электрохимическими, ультразвуковыми и термическими методами.

*Химический способ удаления жиров* основывается на взаимодействии с ними органических растворителей или растворов щелочей. Химическое обезжиривание, как правило, предшествует электрохимическому обезжириванию. В основном его применяют при наличии на заготовке толстой жировой плёнки.

Обезжиривание в органических растворителях применяется для очистки поверхности заготовки от минеральных масел, полировальных паст, остатков консервационной смазки. Органические обезжириватели токсичны, использовать их можно только при наличии специального оборудования и при строгом соблюдении правил техники безопасности. Пожароопасные растворители (бензин, керосин, бензол, толуол, ксилол, уайт-спирит) применяют крайне редко. Их заменяют негорючими хлорированными углеводородами: трихлорэтиленом, тетрахлорэтиленом, четырёххлористым водородом, фреоном.

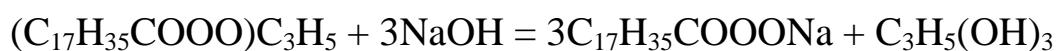
Наиболее универсальными обезжиривающими веществами являются фторосодержащие углеводороды, например, фреон Ф–113. Обезжиривание этими растворителями проводят на оборудовании, исключая попадание паров фреона в атмосферу.

Обезжиривание органическими растворителями осуществляют погружением, протиркой, струйным методом и обрызгиванием

заготовок. При обработке методом погружения заготовки обезжиривают последовательно в двух — трёх ваннах.

После обезжиривания в органических растворителях на поверхности заготовки всё же остается очень тонкая плёнка жиров, которая требует удаления в других растворах или удаления электрохимическим методом.

Очистку поверхностей заготовок от жиров органического и животного происхождения осуществляют в растворах щелочей. Жиры животного и растительного происхождения являются омыляемыми, так как, вступая во взаимодействие со щелочными растворами, образуют растворимые в воде мыла. Например, реакция взаимодействия стеарина с гидроксидом натрия



приводит к образованию растворимой натриевой соли стеариновой кислоты, которая образует с водой коллоидный раствор.

В целом химическое обезжиривание заключается в том, что под воздействием щёлочи жиры омыляются и переходят в раствор, а минеральные масла в присутствии специальных поверхностно-активных веществ — эмульгаторов — образуют эмульсию.

Растворы для химического обезжиривания обычно содержат щёлочи, фосфаты, силикаты, мыла, различные синтетические моющие вещества — поверхностно-активные вещества, эмульгаторы — органические соединения, кальцинированную соду.

Химическое обезжиривание производят при температуре 70...90 °С, при которой омыление и процесс эмульгирования протекают более интенсивно. Продолжительность обезжиривания зависит от степени загрязнённости заготовок и составляет примерно от 3-х до 20-и минут. Увеличение температуры и перемешивание раствора ускоряют удаление масла с поверхности.

*Электрохимическое обезжиривание* является эффективным способом очистки поверхности и применяется главным образом для удаления тонких жировых плёнок, которые остаются после других видов обезжиривания и которые трудно удалить другими способами.



При электрохимическом обезжиривании используют те же растворы, что и при химическом обезжиривании, но концентрации веществ берутся меньшими.

Электрохимическое обезжиривание в щелочных растворах проводится при помощи постоянного, а иногда и переменного тока. При постоянном токе обезжиривание осуществляется и на катоде, и на аноде. В процессе электролиза на поверхности заготовки наблюдается интенсивное выделение пузырьков газа, облегчающих отрыв капелек масла от поверхности заготовки, чем значительно ускоряется обезжиривание.

Скорость обезжиривания заготовок на аноде меньше, чем на катоде. Это объясняется тем, что в прианодном пространстве не происходит защелачивание электролита, вследствие чего процесс омыления растительных и животных жиров у анода происходит медленнее. Кроме того, объём выделяющегося при электролизе кислорода меньше объёма водорода, а пузырьки кислорода больше пузырьков водорода и меньше задерживают на поверхности капелек масла. Поэтому удаление масла с поверхности заготовки происходит менее интенсивно. Однако процесс катодного обезжиривания сопровождается наводороживанием стальных заготовок, вследствие чего при продолжительном обезжиривании на катоде закалённые или тонкостенные стальные заготовки могут становиться хрупкими. Поэтому катодное обезжиривание заготовок, которые должны обладать упругими свойствами, например, пружины, не допускается.

Недостатком химического обезжиривания является низкая рассеивающая способность применяемых электролитов, вследствие чего очистка сложнопрофильных заготовок затруднительна.

**Ультразвуковая очистка заготовок.** Качество обезжиривания заготовок и скорость очистки можно значительно повысить ультразвуковой обработкой. Обезжиривание заготовок с помощью ультразвука осуществляется в ванне с органическими растворителями или со слабощелочными растворами моющих средств.

Сущность метода ультразвуковой очистки заключается в следующем. При распространении ультразвуковой волны возникают области резко повышенного давления, чередующиеся с областями пониженного давления. При достаточной интенсивности колебаний в местах пониженного давления происходят разрывы жидкости, которые с силой захлопываются при прохождении через пучность. При этом развиваются огромные силы. Это явление называется кавитацией. Огромные механические усилия, развивающиеся при прохождении кавитации, не только удаляют с поверхности жировые загрязнения, но и могут разрушить также плёнки оксидов, например, удалять окалину со стальных заготовок. Таким образом, при ультразвуковой обработке поверхность заготовки не только обезжиривается, но и протравливается.

Частота ультразвуковых колебаний, при которых достигается наибольший эффект кавитации, составляет около 20 кГц. Для обработки сложных мелких заготовок, имеющих узкие зазоры или щели, частоту повышают до 200...500 кГц.

*Химическое и электрохимическое травление.* Эти виды травления поверхности заготовки применяются в основном для удаления ржавчины, окалины и других продуктов коррозии с поверхности многих металлов.

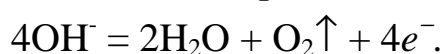
Области использования химического травления и процессы, происходящие при этом на поверхности заготовки, раскрыты в разделе 3.1.

*Электрохимическое травление* — травление поверхностей заготовки в электролите с пропусканием через электролит электрического тока. Этот вид очистки поверхности чаще всего применяют для анодного либо катодного травления углеродистых и легированных сталей. Электрохимическое травление может проводиться в растворах солей железа или щелочных металлов, соляной, серной кислот и их смесях.

При анодном травлении удаление с поверхности заготовки оксидов происходит вследствие электрохимического растворения анода и механического отрыва оксидов пузырьками выделяющегося водорода.

В качестве анода используется обрабатываемое изделие, а катод изготавливают из свинца. В результате анодного травления заготовка получает совершенно чистую от оксидов и слегка шероховатую поверхность, что способствует хорошему сцеплению нанесённого на эту поверхность покрытия с основным металлом. Анодное травление применяется при очистке заготовок простой формы.

Сначала при анодном травлении происходит удаление оксидной плёнки, а затем идёт образование на поверхности заготовки пассивной плёнки. При этом преобладает электрохимический процесс окисления ионов  $\text{OH}^-$  и выделения газообразного кислорода:



При катодном травлении, когда обрабатываемое изделие становится катодом, на его поверхности происходит восстановление ионов водорода:



Выделяющиеся пузырьки водорода разрыхляют плёнку оксидов и отрывают её от поверхности заготовки. Электролитом при катодном травлении служат растворы кислот или солей, обладающие хорошей электропроводностью. Аноды при катодном травлении изготавливают из свинца или кремнистого чугуна.

Катодное травление применяется главным образом для заготовок из углеродистой стали, подвергнутых термообработке и закалке в масле. Никелевые и хромовые заготовки плохо поддаются катодному травлению. При катодном травлении не происходит перетравливания поверхности.

**Активирование поверхности.** Поверхность, на которую наносится покрытие, должна быть активирована. В результате активации на поверхности создаётся такой энергетический потенциал, который способствует улучшению адгезионной сцепляемости основы с покрытием.

Активирование поверхности осуществляется удалением с подготовленной к нанесению покрытия поверхности тончайшего слоя оксидов, которые могли образоваться в промежутках между

заключительными операциями, подготавливающими заготовку к нанесению покрытия. При активировании одновременно происходит лёгкое перетравливание верхнего слоя металла и выявление его кристаллической структуры. Это благоприятствует прочному сцеплению покрытия с основой.

Активирование осуществляют непосредственно перед загрузкой заготовок в ванны для нанесения покрытия. Если заготовки поступают в гальванический цех непосредственно после механической обработки и на их поверхностях имеется только тонкая оксидная плёнка, то активирование может производиться без предварительного травления заготовок.

Активирование может осуществляться химическим и электрохимическим методами. Электрохимическое активирование реализуют только на аноде.

Если возможность быстрого нанесения покрытия после активирования отсутствует, то после активирования выполняют операцию *пассивации* поверхности. На поверхности формируется специальная тонкая оксидная плёнка. Когда заготовка пойдёт под покрытие, то сначала делают механическую обработку (доводку, полировку, обеспечивающую снятие оксидной плёнки). После этого повторяют операции обезжиривания, травления и затем активации (декапирования) поверхности.

**Промывка.** В технологическом процессе подготовки и нанесения электрохимических покрытий промывка, как правило, предусматривается после каждой технологической операции, относящейся к удалению загрязнений на поверхности заготовки. Недостаточная промывка заготовок может быть причиной плохого сцепления покрытия с основным материалом, появления пятен и других видов брака. Промывка осуществляется путём погружения заготовок в промывочные ванны со стоячей или проточной водой или при помощи струи воды.

Промывочная вода может быть холодной (температура не нормируется), тёплой (49...59 °С) и горячей (60...90 °С). Тёплая вода

применяется после операций обезжиривания, травления лёгких металлов и сплавов, снятия шлама, после химического оксидирования чёрных металлов. Горячая вода используется перед сушкой заготовок.

***Система операций подготовки поверхности к нанесению покрытия.***

ГОСТ 9.305-84 «Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов нанесения покрытий» определяет общий перечень подготовительных операций к нанесению покрытий и устанавливает последовательность нанесения покрытий на основные конструкционные материалы: стали, медь и медные сплавы, алюминий и его сплавы, цинковые и титановые сплавы.

Перечень основных подготовительных операций и их последовательность приведены на рисунке 6.2. Выбор конкретной схемы подготовки поверхности к нанесению покрытия осуществляется с учётом марки основного металла, наличия и характеристики загрязнений, вида механической обработки поверхности. В схеме не указаны операции промывки, которые в соответствии с ГОСТ 9.305-84 должны проводиться практически после каждой указанной на рисунке 6.2 технологической операции.

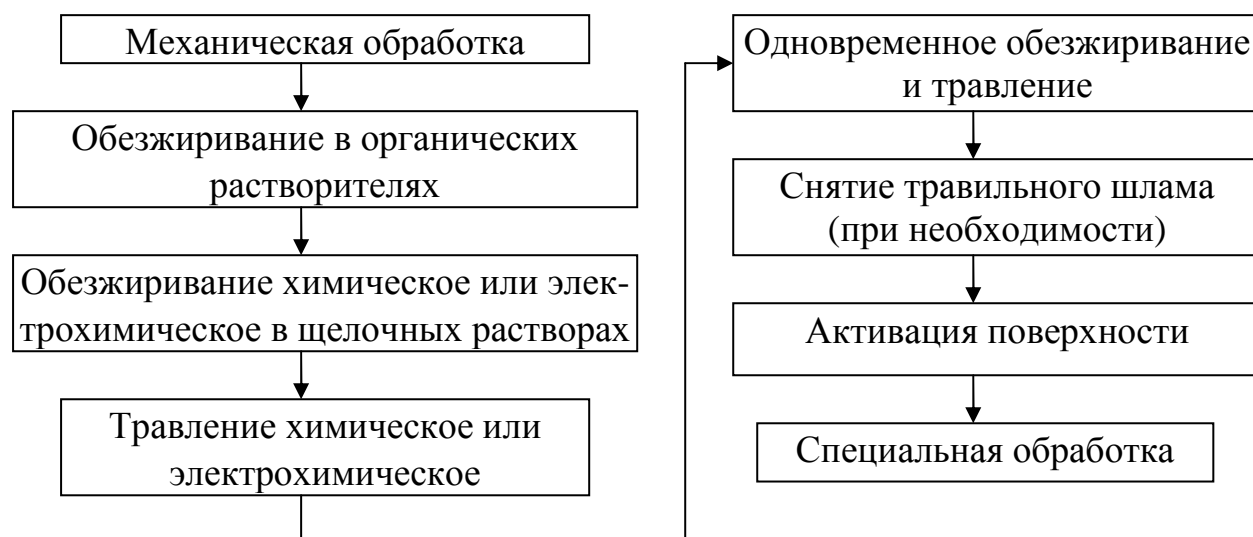


Рис. 6.2. Обобщенная схема этапов подготовки поверхности заготовки к нанесению покрытия

### 6.3.2. Дополнительная обработка покрытия

После нанесения покрытия на поверхность заготовки, как правило, проводится её дополнительная обработка. Эта обработка должна устранить или, по крайней мере, снизить отрицательные последствия процесса нанесения покрытия на работоспособность изделия. К таким отрицательным последствиям относят:

- насыщение поверхности заготовки и покрытия водородом (наводороживание поверхности);
- пористость покрытия;
- возникновение в покрытии внутренних напряжений;
- недостаточную адгезионную сцепляемость покрытия с основой;
- повышение шероховатости поверхности с покрытием вследствие отрицательной выравнивающей способности электролита.

Основными методами обработки покрытий, направленными на повышение их функциональной стойкости, являются: термическая обработка, обезводороживание, механическая обработка, гидрофобизирование, наполнение в воде, наполнение в растворе хроматов, нанесение лакокрасочного покрытия, оксидирование, оплавление, пропитка (лаком, клеем, эмульсией), тонирование, фосфатирование, химическое окрашивание, хроматирование, электрохимическое окрашивание и консервация.

*Снятие внутренних напряжений.* В процессе электроосаждения в металлических осадках возникают внутренние напряжения первого, второго и третьего родов: напряжения первого рода, уравниваемые в областях, соизмеримых с размерами заготовки; напряжения второго рода, уравниваемые в объёмах, имеющих порядок величины зерна кристалла; напряжения третьего рода, уравниваемые в объёмах, имеющих порядок элементарной кристаллической ячейки. Наибольшее влияние на прочность сцепления покрытия с основным металлом оказывают напряжения первого рода, определение которых осуществляется при контроле качества покрытия.

При электрокристаллизации такие металлы, как никель, железо, кобальт, родий, палладий, хром, марганец, стремятся к сжатию. В связи с этим в покрытиях возникают напряжения растяжения. Цинк, кадмий, свинец при электроосаждении расширяются, вызывая в покрытиях напряжения сжатия.

Наибольшие величины внутренних напряжений отмечены в осадках хрома, они достигают 10 ГПа. В осадках кобальта внутренние напряжения составляют 100...400 МПа, меди — 10...50 МПа, никеля и железа — 50...400 МПа, кадмия — 0,5...1,5 МПа.

Внутренние напряжения снижают, подбирая основу покрытия, близкие коэффициенты линейного расширения покрытия и основы, применяя многослойные покрытия с переходными слоями. Для снижения остаточных внутренних напряжений в покрытии и для упрочнения покрытия делают термообработку.

*Упрочняющая обработка покрытия.* Этот метод обработки увеличивает прочность покрытия, снижает пористость, выравнивает микро- и макроструктуры.

Для упрочнения покрытия используют высокотемпературные методы, в том числе спекание, пропитку, оплавление, пластическое деформирование, диффузионное насыщение. Пластическая обработка покрытия осуществляется накаткой наружной поверхности роликами или шариками или раскаткой внутренних отверстий. Поры при этом закрываются и прекращается доступ воздуха к поверхности основного материала.

*Механическая обработка.* Цели механической обработки состоят в придании заготовке после нанесения покрытия окончательных размеров и заданной по чертежу шероховатости поверхности. Для этого используют шлифование и полирование покрытия. Режимы обработки определяются свойствами материала покрытия, его толщиной и заданными параметрами шероховатости.

*Удаление газовых включений из покрытия.* Насыщение газами ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ) происходит в процессе подготовки поверхности к нанесению покрытия и непосредственно при выполнении операции. Удаление

газов из покрытия и основного металла необходимо для восстановления исходных физико-механических свойств основного металла и улучшения свойств покрытия. Особо в ряду газовых включений выделяют насыщение поверхности водородом, поскольку наличие водорода приводит не только к возможному отслоению покрытия, но и к водородному охрупчиванию материала.

Эффективным методом удаления газовых включений является термическая обработка заготовки. Основными её параметрами являются температура и продолжительность процесса. Так, при нанесении покрытий из Zn, Cd, Cr температура последующей термообработки находится в пределах 140...230 °С при продолжительности обработки 2...3 часа.

Скорость удаления водорода из покрытия при термообработке не одинакова во времени: вначале происходит быстрое выделение водорода, но примерно через два часа наступает сильное замедление процесса. Для полного удаления водорода требуется значительное время нагрева. Поскольку в течение трёх часов выделяется основное количество водорода, а оставшаяся часть практически не влияет на механические свойства основного материала, то увеличивать продолжительность обезводороживания свыше 3-х часов нет необходимости.

*Пропитка и консервация покрытия.* Если изделие имеет поры, то в процессе работы и при вылеживании оно поглощает влагу и корродирует. Кроме того, в местах разрыва покрытия с основой могут идти электрохимические реакции, приводящие к коррозии. Устранение структурной или случайной пористости покрытий путём заполнения пор уплотняющими составами является эффективным методом повышения защитной способности поверхности.

Консервацию проводят таким образом, что сначала с поверхности удаляется влага, поверхность высушивается, а потом её пропитывают слоем смазки или покрывают слоем смазки или воска.

Наиболее эффективные результаты повышения коррозионной стойкости изделий с хромовыми покрытиями показали пропитки пассивирующими растворами на основе нитратов, хроматов и фосфатов,



полимеризующихся материалов — льняного масла и клея БФ-2, смазками АМС-3.

### 6.3.3. Контроль качества нанесения покрытия

Объектами контроля качества нанесённого покрытия являются:

- внешний вид;
- толщина покрытия;
- остаточные внутренние напряжения в покрытии;
- твёрдость и пористость покрытия;
- прочность сцепления покрытия с основой;
- шероховатость поверхности покрытия

и ряд других защитных и функциональных свойств, в частности, износостойкость, трибологические, коррозионно-защитные свойства.

Нормы контроля гальванических покрытий установлены ГОСТ 9.302-88 «Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля». В соответствии с этим стандартом все методы контроля подразделяют на разрушающие и неразрушающие.

*Контроль внешнего вида покрытия.* Требования, предъявляемые к внешнему виду покрытий, обычно определяются соответствующими техническими условиями к изделию. Внешний вид покрытия обычно оценивается осмотром невооружённым глазом. При осмотре выявляются непокрытые места на отдельных участках поверхности, наличие губчатых отложений, пригаров, трещин, тёмных чёрных полос и пятен.

*Методы определения толщины гальванических покрытий.* Для определения толщины покрытия применяют физические неразрушающие и разрушающие методы и химические методы. Последние во всех вариантах являются разрушающими.

В зависимости от используемого метода в качестве результата получают данные о средней или местной толщине покрытия. Перед определением толщины покрытия (это относится и к контролю пористости, защитных и функциональных свойств покрытий) испытуемую

деталь выдерживают для выравнивания её температуры с температурой помещения, в котором проводят контроль, и тщательно обезжиривают этиловым спиртом или пастой из окиси магния, промывают дистиллированной водой и сушат фильтровальной бумагой.

К физическим неразрушающим методам относят магнитные и радиационные методы, весовой метод, оптический метод и метод вихревых токов. Практическое применение получили в основном магнитные методы. Эти методы применяют при условии, что значение шероховатости поверхности  $Ra$  основного металла и покрытия меньше толщины покрытия. Наиболее простым среди магнитных методов является магнитоотрывной метод. Действие этого метода основано на изменении зависящей от толщины покрытия силы отрыва магнита или электромагнита от ферромагнитной основы.

К разрушающим физическим методам контроля толщины покрытия относят гравиметрический, аналитический, профилометрический, металлографический и кулонометрический методы. Гравиметрический метод основан на взвешивании заготовки на аналитических весах до и после нанесения покрытия либо до и после растворения покрытия или основного материала в соответствующем растворе. Погрешность измерения этим методом находится в пределах  $\pm 10\%$ . Аналитический метод предусматривает определение толщины покрытия по массе растворённого металла, которую могут определить химическим анализом раствора.

Металлографический метод. Метод основан на определении толщины покрытия на поперечном шлифе при 500...1000-кратном увеличении с помощью металлографического микроскопа при толщине покрытия менее 20 мкм и 100...200-кратном увеличении для покрытий толщиной более 20 мкм. Этот метод достаточно трудоёмок и используется при арбитражах и структурных исследованиях покрытий.

Химические методы определения толщины покрытия. К методам данной группы относят методы струи, капли и снятия покрытия.

Метод струи основан на растворении покрытия раствором, вытекающим на поверхность заготовки в виде струи. Расчёт толщины покрытия производят по времени, затраченному на снятие покрытия или по объёму раствора, израсходованному на растворение покрытия. Окончание растворения покрытия устанавливают визуально или с помощью прибора, регистрирующего изменение потенциала или тока в момент полного растворения покрытия.

Метод капли основан на растворении покрытия каплями раствора, наносимыми на поверхность и выдерживаемыми на покрытии в течение определённого промежутка времени. Расчёт толщины покрытия производят по числу капель, затрачиваемых на растворение покрытия. Методы струи и капли дают погрешность измерения толщины  $\pm (15-30) \%$ .

*Пористость гальванических покрытий*, как правило, контролируется периодически для оценки качества подготовки и точности режима процесса электроосаждения. Для определения пористости применяют метод паст и метод наложения фильтровальной бумаги.

Метод паст основан на химическом взаимодействии основного металла в местах пор и других несплошностей покрытий с веществами, входящими в состав пасты. В результате такого взаимодействия образуются окрашенные соединения, по которым и выявляются поры. Метод применим для определения пористости металлических покрытий на стали, алюминии, цинке, меди и их сплавах, а также нахождения степени пористости неорганических покрытий на алюминии и его сплавах.

Метод наложения фильтровальной бумаги основан на том же принципе взаимодействия основного металла и веществ фильтровальной бумаги, пропитанной специальными растворами. После снятия бумаги с отпечатками пор её просушивают и определяют число пор, приходящихся на единицу площади поверхности, на каждом участке покрытия. Метод может быть применён для определения пористости катодных покрытий на стали, меди и медных сплавах.

*Определение прочности сцепления покрытия с основным металлом.* Методы контроля этой группы основаны на различии физико-механических свойств покрытия и основного металла. В данной группе методов контроля используют как качественные, так и количественные методы. К качественным методам относят методы полирования, крацевания, нанесения сетки царапин, изгиба, нагрева, метод навивки (для контроля покрытий на проволоке). В группе количественных методов выделяют методы опиловки, отрыва полоски и некоторые другие. Количественные методы требуют изготовления образцов, применения специального оборудования и оснастки.

При контроле методом полирования заготовку с покрытием полируют в течение 15–60 секунд с помощью хромовой, крокусной или другой пасты при окружной скорости круга 20...30 м/с. Прочность сцепления считается достаточной, если на поверхности покрытия не образуется вздутий и не происходит отслаивание покрытия. Используют данный метод при толщине покрытия до 30 мкм.

Метод крацевания характеризуется тем, что покрытие толщиной до 20 мкм обрабатывают в течение 15...60 секунд с помощью стальных или латунных щёток при определённом режиме обработки. Отсутствие вздутий на поверхности или отслаивания свидетельствует о достаточной прочности сцепления.

Для контроля прочности сцепления покрытия с основным металлом методом нанесения сетки царапин на поверхности покрытия стальным остриём наносят четыре – шесть параллельных линий глубиной до основного металла и столько же линий, перпендикулярно им. При этом не должно происходить отслаивания покрытия.

Для испытания прочности покрытий на листовых материалах используют метод изгиба. Заготовку при испытании изгибают под углом 90° в обе стороны до излома. В месте излома не должно наблюдаться отслаивание покрытия.

Метод нагрева. Для контроля прочности сцепления заготовку нагревают в течение 30...60 минут и охлаждают на воздухе. После этого на поверхности заготовки не должно наблюдаться вздутия или

отслаивания покрытия. Температуру нагрева выбирают в зависимости от марки основного металла в границах от 120 °С (для магния и его сплавов) до 355 °С (для сталей и чугунов).

Оценку прочности сцепления основы с покрытием разрушающим методом контроля выполняют методом опиловки. Его используют для покрытий толщиной более 5 мкм. Контроль проводят на образцах, вырезанных из детали, перпендикулярно к поверхности покрытия. Образец зажимают в тисках и опиливают по срезу напильником с мелкой насечкой. Опиловку производят в направлении от основного металла к покрытию под углом 45°. После контроля не должно быть отслаивания покрытия.

При проверке прочности сцепления покрытия с основой применяют и другие методы контроля, например, метод отрыва покрытия от поверхности заготовки. В основу этого метода положено измерение силы отрыва покрытия 2, нанесённого на торец цилиндрического образца 1 (рис. 6.3, а).

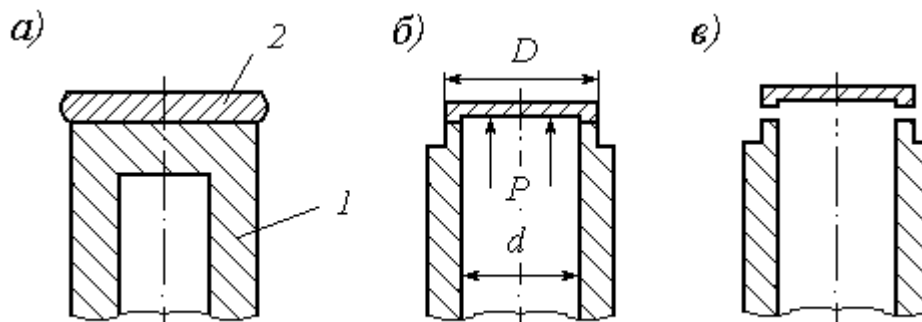


Рис. 6.3. Этапы контроля прочности сцепления покрытия с основой методом отрыва покрытия

Образец с нанесённым покрытием подвергается механической обработке для создания площадки сцепления, определяемой наружным  $D$  и внутренним  $d$  диаметрами (рис. 6.3, б). С помощью механического устройства или гидравлического пресса создаётся постепенно возрастающее усилие на внутреннюю поверхность покрытия, параллельно оси образца. При достижении усилием значения  $P$  происходит отрыв покрытия от основы (рис. 6.3, в). Прочность сцепления  $\sigma$  (Па) покрытия с основой рассчитывают по формуле

$$\sigma = P/S = \frac{4P}{\pi(D^2 - d^2)}, \quad (6.3)$$

где  $P$  — усилие отрыва, Н;  $S$  — площадь поверхности отрыва покрытия от основного металла, м<sup>2</sup>.

*Контроль покрытия на наличие внутренних напряжений.* В соответствии с ГОСТ 9.302-88 в основе метода определения внутренних напряжений в металлических электрохимических покрытиях лежит изменение длины образца при осаждении покрытия и вычисление на основе полученных данных внутренних напряжений первого рода.

Контроль проводят в электролитических ваннах на плоских образцах размером (250 × 110 × 0,5-0,1) мм или на проволочных образцах (при контроле покрытия пружин). Перед испытанием образец обезжиривают, активируют его поверхность в растворе серной кислоты и промывают в проточной воде. К образцу прикладывают растягивающее усилие, соответствующее напряжению 4...10 МПа, и защищают покрытием органического стекла все поверхности, не подлежащие покрытию.

Подготовленный таким образом образец погружают в электролит и включают электрический ток. Нанесение покрытия производится с двух сторон образца. В процессе нанесения покрытия в связи с возникновением внутренних напряжений образец изменяет свою длину. Если заранее известна скорость осаждения покрытия, то изменение длины образца отсчитывают после достижения заданных толщин покрытия, например, 2, 3, 5, 10 мкм и т. д. Если скорость осаждения покрытия неизвестна, то изменение длины образца отсчитывают в зависимости от продолжительности осаждения покрытия через определённые промежутки времени. Затем по полученным данным определяют скорость осаждения покрытия по средней толщине покрытия или по разнице массы образца до и после покрытия. После этого строят график зависимости изменения длины образца от продолжительности процесса, проводят его математическую обработку и на основе полученной зависимости определяют внутренние напряжения  $\sigma_{вн}$  в МПа для плоского образца по формуле

$$\sigma_{вн} = \frac{E_o b + 2E_p h}{2\ell_o h \dots (1 - \mu)} \cdot \Delta\ell, \quad (6.4)$$

где  $E_o$  — модуль упругости при растяжении металла образца, МПа;  $E_p$  — модуль упругости при растяжении материала покрытия, МПа;  $b$  — толщина образца, мм;  $h$  — толщина покрытия, мм;  $\ell_o$  — длина покрываемой части образца, мм;  $\Delta\ell$  — укорочение или удлинение образца при заданной толщине покрытия, мм;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Если при осаждении покрытия образец укорачивается, то в покрытии возникают напряжения растяжения. Если образец удлиняется, в покрытии возникают напряжения сжатия. Соответственно этому результаты по формулам обозначают знаком «+» или «-».

Для измерения внутренних напряжений применяют и другие методы, в основе которых лежат измерения величины деформации катода — образца, возникающей в процессе нанесения на него покрытия. Наиболее широкое распространение получил метод изгиба тонкого плоского катода. При реализации этого метода одну сторону катода — образца изолируют непроводящим химически стойким лаком. Металл осаждают на вторую сторону катода, что приводит к деформации — изгибу пластины под действием внутренних напряжений.

Измерения производят в электрохимической ячейке. У торцовых стенок ячейки размещают анод и катод в виде пластинок толщиной 0,1...0,3 мм, перекрывающих всё сечение электролита, чтобы обеспечить равномерное распределение тока. Верхний конец катода (вне электролита) жёстко закрепляется в неподвижном контактном устройстве. Нижний конец катода может перемещаться.

При электролизе ведут наблюдение за смещением конца катода с помощью измерительного микроскопа. Величину внутренних напряжений определяют по формуле

$$\sigma_{вн} = E \frac{b_1^2 \Delta\ell}{b_2 \ell^2}, \quad (6.5)$$

где  $\sigma_{вн}$  — внутреннее напряжение в покрытии, МПа;  $E$  — модуль упругости металла катода, МПа;  $b_1$  — толщина катода, мм;  $b_2$  — толщина покрытия, мм;  $\ell$  — длина рабочей части катода, мм;  $\Delta\ell$  — смещение конца катода, мм.

Измерение деформации катода может производиться также с помощью проволочных тензодатчиков, наклеиваемых на нерабочую сторону катода. Деформация катода, возникающая под влиянием внутренних напряжений осаждаемого при электролизе покрытия, изменяет электрическое сопротивление тензодатчиков. Эти изменения регистрируются с помощью электрических мостов тензометрических схем. Показания приборов затем пересчитывают на величину внутренних напряжений.

#### **6.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Технологический процесс нанесения покрытия включает в себя операции по подготовке поверхности к покрытию, непосредственно нанесение покрытия и последующую его обработку. В связи с этим выделяют три группы оборудования.

Первая группа оборудования используется для механической подготовки поверхности к покрытию и для механической обработки нанесённого покрытия. С этой целью используют шлифовальные и полировальные станки, а также оборудование для галтовки, вибрационной и струйной абразивной или дробеструйной обработки.

Вторая группа включает оборудование для подготовки поверхности заготовок к нанесению покрытия в растворах путём травления, обезжиривания, пассивации и других видов химической и электрохимической обработки. Эти операции выполняют в стационарных ваннах, на автоматических установках для обезжиривания, в моечных агрегатах (одно-, двух-, трёхкамерных), моечно-сушильных установках, на машинах для травления заготовок на подвесках. Для очистки точных заготовок от загрязнений механического типа используют



оборудование ультразвуковой очистки, работающее в полуавтоматическом режиме на частотах 3000...10000 Гц.

К третьей группе относят оборудование для непосредственного нанесения покрытий. Основным видом оборудования в этой группе являются стационарные и переносные электрохимические ванны.

*Стационарные ванны* чаще всего представляют собой прямоугольные или круглые резервуары из листовой стали толщиной 4...5 мм. Рабочий объём стационарных ванн находится в пределах от 60 до 2000 л, а их размеры колеблются от 500 × 400 × 500 мм до 2500 × 900 × 1000 мм. Ванны снабжают вытяжными устройствами для удаления вредных испарений, подогрева (или охлаждения) и перемешивания электролита.

Для нанесения покрытий на небольшие заготовки в условиях крупносерийного и массового производств получили распространение переносные барабанные ванны и ванны колокольного типа.

*Барабанные ванны* предназначены для нанесения гальванических покрытий в массовом



Рис. 6.4. Внешний вид барабанной ванны

производстве на мелкие детали в насыпном виде. В таких ваннах проводят гальваническую обработку мелких металлических изделий, например, шпилек, болтов, гвоздей, металлической фурнитуры. Внешний вид одного из типов ванн представлен на рис. 6.4.

Основной частью барабанных ванн является перфорированный многогранный барабан, имеющий привод вращения. Барабан изготавливают из непроводящих ток материалов или из углеродистой стали, футерованной коррозионно-стойкими

материалами, например, полипропиленом, винипластом, тефлоном. Заготовки помещают в барабан, приводимый при нанесении покрытия во вращение вокруг горизонтальной оси. Благодаря вращению барабана мелкие детали непрерывно пересыпаются, что обеспечивает равномерность покрытия на изделии. К достоинствам этих ванн относят также простоту загрузки и выгрузки заготовок.

Подвод тока к покрываемым заготовкам осуществляется через специальные контактные щётки, расположенные с внутренней стороны барабана. Анодные пластины подвешивают на штанги, расположенные в ванне снаружи барабана.

Для расширения технологических возможностей путём одновременной обработки разных изделий барабаны делают с одной или несколькими камерами. В одном комплексе с барабаном может быть смонтирована также ванна для промывки. Ванны изготавливают с габаритными размерами от 550 × 600 × 700 мм до 1300 × 620 × 800 мм. Объём загружаемого электролита находится в диапазоне от 150 до 400 литров. В рабочую камеру барабанных ванн загружают от 12 до 60 кг заготовок.

*Колокольные ванны.* Область использования колокольных ванн аналогична области применения барабанных ванн. Контейнером для размещения заготовок является вращающийся вокруг вертикальной или наклонной оси колокол, изготавливаемый в виде усечённого конуса. Колокол устанавливают на станине, оборудованной электроприводом для вращения и поворотным устройством.

Колокольные ванны могут быть изготовлены с наливным или погружаемым колоколом. Наливной колокол при каждой загрузке заготовок наполняется электролитом. В отличие от наливного в колокольной ванне с погружаемым колоколом электролит находится в ванне. В ванну опускается перфорированный колокол с заготовками, и через перфорацию электролит наполняет колокол. Это значительно сокращает потери электролита. Преимущества наливного колокола состоят также в надёжности его конструкции и компактности установки, что позволяет эффективно использовать площади гальванических

цехов. Колокольные ванны характеризуются простотой загрузки и выгрузки заготовок. Внешний вид колокольных ванн представлен на рисунке 6.5.



Рис. 6.5. Внешний вид колокольных ванн

Рабочий объём ванн этой конструкции составляет от 5 до 15 литров. Для нанесения покрытий на крупных заготовках используют колокольные стационарные ванны с рабочим объёмом от 50 до 120 литров. Основными недостатками данного оборудования являются небольшая их вместимость, небольшая общая площадь поверхности покрываемых заготовок, сложность обновления электролита. Данные недостатки обуславливают низкую производительность процесса.

*Автоматические линии.* В условиях крупносерийного и массового производств нанесение покрытий производят на автоматических линиях. Заготовки для нанесения покрытий размещают в контейнере, который автоматически перемещают от одной технологической установки (оборудования) к другой без его разгрузки. Установленное вдоль автоматической линии оборудование обеспечивает последовательно подготовку поверхностей заготовок к покрытию, нанесение покрытия и его последующую химическую, электрохимическую и термическую обработку. Контейнер с заготовками, пройдя все позиции автоматической линии, возвращается в исходное положение, где его заменяют новым с очередной партией заготовок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров С. Е. Технологии химического осаждения из газовой фазы: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. — 216 с.
2. Артамонов Б. А., Волков Ю. С., Дрожалова В. И. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. пособие / Под ред. В. П. Смоленцева (в 2-х томах). Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента. — М.: Высшая школа, 1983. — 247 с.
3. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х томах / Под ред. М. А. Шлугера. — М.: Машиностроение, 1985. — Т. 1. 1985. — 240 с.
4. Елисеев Ю. С., Саушкин Б. П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 437 с.
5. Житников В. П., Зайцев А. Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка. — М.: Машиностроение, 2008. — 413 с.
6. Коваленко В. С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. — Киев: Издательское объединение «Вища школа», 1975. — 236 с.
7. Лившиц А. Л., Кравец А. Т., Рогачев И. С., Сосненко А. Б. Электроимпульсная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1967. — 295 с.
8. Мирзоев Р. А. Электрохимическая обработка металлов. Анодные процессы: учеб. пособие. — Л.: ЛПИ, 1988. — 64 с.
9. Немилов Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. — 164 с.
10. Немилов Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов: учебник. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. — 160 с.
11. Носенко В. А., Даниленко М. В. Физико-химические методы обработки материалов: учеб. пособие. — Старый Оскол: ТНТ, 2012. — 196 с.
12. Орлов В. Ф., Чугунов Б. И. Электрохимическое формообразование. — М.: Машиностроение, 1990. — 240 с.
13. Пашков А. Е. Физико-технические методы обработки: учеб. пособие. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. — 200 с.
14. Поляков З. И., Исаков В. М., Исаков Д. В., Шамин В. Ю. Электрофизические и электрохимические методы обработки: учеб. пособие. — Челябинск: ЮУрГУ, 2006. — 89 с.

15. Румянцев Е. М., Давыдов А. Д. Технология электрохимической обработки металлов: учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1984. — 159 с.

16. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др.; под общ. ред. В. А. Волосатова. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. — 719 с.

17. Техника и технология нанесения покрытий / В. Я. Фролов, В. С. Клубникин, Г. К. Петров, Б. А. Юшин: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 387 с.

18. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении : учеб. пособие / В. Ф. Безъязычный, М. Л. Кузьменко, В. Н. Крылов и др., под общей ред. В. Ф. Безъязычного. 2-е изд., доп. — М.: Машиностроение, 2007. — 539 с.

19. Технология машиностроения: В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения: учеб. пособ. для вузов / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. Л. Мурашкин и др.; под ред. С. Л. Мурашкина. — М.: Высш. шк., 2003. — 278 с.

20. Технология электрохимических покрытий: учебник / М. А. Дасоян, И. Я. Пальмская, Е. В. Сахарова. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. — 301 с.