

Владимирский государственный университет

Л. В. БЕЛЯЕВ Н. С. ДОВБЫШ А. В. ЖДАНОВ

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ
ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ**

Ученое пособие

Владимир 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Л. В. БЕЛЯЕВ Н. С. ДОВБЫШ А. В. ЖДАНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Ученое пособие

Электронное издание



Владимир 2022

ISBN 978-5-9984-1349-0

© ВлГУ, 2022

© Беляев Л. В., Довбыш Н. С., Жданов А. В., 2022

УДК 621.9:621.375.8

ББК 34.58

Рецензенты:

Доктор технических наук
генеральный директор ООО «НТЦ Промышленные технологии»
А. В. Морозов

Доктор технических наук, профессор
профессор кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
А. А. Кобзев

Беляев, Л. В. Технология обработки концентрированными потоками энергии [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л. В. Беляев, Н. С. Довбыш, А. В. Жданов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2022. – 106 с. – ISBN 978-5-9984-1349-0. – Электрон. дан. (3,92 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены основные технологические методы обработки на основе концентрированных потоков энергии, включая электрохимические, электроэрозионные, лазерные, ультразвуковые, электронно-лучевые, гидроабразивные и комбинированные. Приведены основные типовые операции указанных методов и технологические характеристики, оценены преимущества и недостатки.

Разработано в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования и предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 28.03.05 – Наноинженерия и 27.03.05 – Инноватика.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 30. Ил. 63. Библиогр.: 40 назв.

ISBN 978-5-9984-1349-0

© ВлГУ, 2022

© Беляев Л. В., Довбыш Н. С.,
Жданов А. В., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ.....	7
Глава 2. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННЫЕ НА НЕПОСРЕДСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	13
2.1. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	13
2.1.1. Механизм и закономерности формообразования	13
2.1.2. Типовые технологические операции электрохимической обработки	20
2.1.3. Оборудование для электрохимического маркирования.....	22
2.1.4. Оборудование для электрохимического удаления заусенцев	24
2.1.5. Оборудование для электрохимического объемного копирования.....	26
2.1.6. Оборудование для электрохимического прошивания отверстий	29
2.1.7. Оборудование для электрохимического полирования.....	31
2.2. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА	32
2.2.1. Процесс электроэрозионной обработки.....	32
2.2.2. Технологические схемы электроэрозионной обработки	36
2.2.3. Оборудование для процесса электроэрозионного прошивания.....	38
2.2.4. Оборудование для процесса электроэрозионного шлифования	40
2.3. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ ОБРАБОТКА.....	45
2.3.1. Примеры практического использования электроконтактной обработки	47
2.3.1.1. Электроконтактное разрезание	47
2.3.2. Оборудование для электроконтактного разрезания	47
2.3.3. Оборудование для электроконтактного шлифования	49
2.3.4. Оборудование для электроэрозионной обработки короткой дугой...	51

2.4. АНОДНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	52
2.4.1. Анодно-абразивная обработка	53
2.4.2. Оборудование для проведения анодно-механического/абразивного шлифования	56
2.4.3. Оборудование для удаления заусенцев и скругления острых кромок.....	58

Глава 3. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	60
3.1. ЛУЧЕВЫЕ ВИДЫ ОБРАБОТКИ	60
3.1.1. Светолучевая (лазерная) обработка.....	60
3.1.2. Оборудование для лазерной резки	64
3.1.3. Оборудование для проведения операции лазерного сверления.....	67
3.1.4. Оборудование для лазерной сварки	69
3.1.5. Оборудование для электронно-лучевой обработки.....	72
3.2. ПЛАЗМЕННЫЕ ВИДЫ ОБРАБОТКИ	74
3.2.1. Технологические возможности плазменной обработки.....	74
3.2.2. Технологические схемы плазменной обработки	76
3.2.3. Оборудование для плазменной сварки	79
3.2.4. Оборудование для плазменной наплавки	81
3.2.5. Оборудование для плазменного напыления.....	84
3.3. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА.....	85
3.3.1. Технологические возможности ультразвуковой обработки	87
3.3.2. Оборудование для проведения ультразвуковой обработки.....	88
3.4. ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА	91
3.4.1. Общие сведения о гидроабразивной обработке.....	91
3.4.2. Технологические возможности гидроабразивной обработки	93
3.4.3. Сферы применения гидроабразивной обработки	95
3.4.4. Оборудование для гидроабразивной обработки	97
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ	 100
 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	 101

ВВЕДЕНИЕ

Современная технология механической обработки конструкционных материалов достигла значительных результатов, а выпускаемые металло-режущие станки – высокой степени совершенства и высокой производительности, что позволяет с успехом решать разнообразные и сложные задачи. Однако стремительный прогресс авиационной, ракетной, атомной и электронной техники, инструментального производства и приборостроения вызвал необходимость в применении материалов с очень высокой твердостью (вольфрам, титанокарбидные твердые сплавы, алмазы, магнитные сплавы, закаленные стали), хрупкостью (керамика, кварц, стекло, ферриты), вязкостью (нержавеющие и жаропрочные стали), механическая обработка которых может быть осуществлена с большим трудом. Особые трудности возникают при фасонной обработке таких материалов, когда требуется получить пазы, узкие щели, полости и глухие отверстия сложной формы. Острая необходимость эффективно обрабатывать детали сложной формы из материалов труднообрабатываемых резанием предопределила возникновение ряда новых методов. К ним относятся электрофизические и электрохимические методы обработки на основе концентрированных потоков энергии.

Концентрированные потоки энергии различной физической природы электронные и ионные пучки, световое (лазерное) излучение, плазменные струи и дуги, электродуговые, микродуговые и электроимпульсные воздействия являются универсальным технологическим инструментом. Воздействием таких потоков можно выполнять различные технологические операции без механического силового воздействия инструмента на заготовку и непосредственного контакта между инструментом и заготовкой исключительно за счет использования специфических для каждого вида подобных воздействий физических и химических явлений.

Следовательно, параметры и сама возможность выполнения таких операций определяется, не механическими характеристиками заготовки (твердостью, прочностью, пластичностью, ползучестью), а ее физико-химическими свойствами (тепло- и электропроводностью, температурой и

скрытой теплотой плавления и испарения, химическим составом, структурой и др.).

В результате выполнение технологических операций с помощью воздействия концентрированных потоков энергий предоставляет следующие принципиально новые возможности:

- ✓ возможность обработки особо твердых материалов как металлического, так и неметаллического типа, пространственных структур (например, композитных), жаропрочных и труднообрабатываемых металлов и сплавов и т. п.;

- ✓ осуществление локальных и дозированных воздействий, позволяющих получать, например, миниатюрные отверстия,резы малой толщины и различной конфигурации, сварочные швы требуемой формы и размера, производить соединение окончательно обработанных компонентов без последующей финишной обработки и др.;

- ✓ выполнение принципиально новых операций, таких как создание масок (трафаретов) и обработка с их использованием, напыление и наплавку покрытий, в том числе многослойных, создание пространственных изделий, сварка с принципиально новыми конфигурациями и свойствами соединяемых компонентов и сварочных швов (например, герметизация заполненных емкостей и др.).

Изучение студентами материала, представленного в учебном пособии, поможет сформировать теоретическую базу для выполнения курсовых, лабораторных и практических работ, получить навыки использования технологий на основе концентрированных потоков энергии при проектировании технологических процессов производства изделий. Учебное пособие может представлять интерес как для студентов высших учебных заведений, так и инженерно-практических работников, изучающих новые технологии производства изделий.

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Производственный процесс в машиностроении определяет совокупность всех этапов, которые проходят полуфабрикаты на пути превращения в готовую машину. Он включает в себя получение заготовок, различные виды их обработки, сборку и испытание машин. Производственный процесс охватывает работу всех отделов и цехов завода основных, вспомогательных и обслуживающих. В основе его построения приняты исходные положения, предусматривающие наименьшие затраты труда и максимальное его обеспечение при рациональном использовании средств производства и непрерывном совершенствовании их [1].

Рациональное построение производственного процесса обеспечивается путем его разделения на три основные составные части: технологический процесс, организацию его в конкретных производственных условиях и создание необходимых схем управления им.

В отличие от производственного, в технологический процесс входят только те действия, которые необходимо осуществить над исходными материалами и полуфабрикатами, полученными извне, для изготовления выпускаемой заводом продукции.

Проектирование технологического процесса делится на два основных этапа:

1) создание маршрутного технологического процесса, содержащего рациональную последовательность операций, необходимую для изготовления данной детали, сборки узла или машины в целом;

2) разработка операционных технологических процессов, содержащих необходимые сведения для осуществления каждой операции всего технологического цикла производства машин – заготовительного процесса и последующей обработки деталей, сборки узлов и машины в целом, контроля и испытания на всех этапах ее изготовления.

Заготовка посредством изменения формы, размеров, шероховатости поверхности и свойств материала превращается в заданную конструкцией машины деталь. Это осуществляется в результате выполнения маршрутного технологического процесса, который представляет собой рациональную последовательность операций, обеспечивающих необходимые действия над заготовкой для получения детали определенного качества.

Технологическая операция является законченной частью технологического процесса; основным ее признаком является постоянство рабочего места. Ее выполняют согласно операционному технологическому процессу, где указывают необходимые для выполнения операции переходы с режимами резания для каждого [2].

В качестве исходных данных для проектирования используют операционный эскиз, содержащий описание конструктивно-технологических свойств обрабатываемой заготовки, в том числе описание формы и взаимного расположения элементов деталей, требований точности и шероховатости поверхности, а также физико-химических свойств.

Проектирование операционного технологического процесса включает следующие этапы:

- ✓ выбор физико-химического метода обработки;
- ✓ выбор технологических баз и последовательности обработки;
- ✓ выбор оборудования, приспособлений и инструмента;
- ✓ определение состава проходов, переходов.

Изготовление машин ведется по производственному циклу, включающему три основных технологических передела; получение заготовки – обработка ее – сборка и испытание машины.

Под обработкой понимают необходимое изменение свойств, формы, размеров и качества поверхности заготовки для получения заданных конструктором параметров детали.

При обработке резанием могут быть использованы различные виды энергетического воздействия на материал срезаемого слоя заготовки; механическое, тепловое, электрическое, химическое.

Механическая обработка резанием является наиболее распространенным способом, ее осуществляют путем воздействия на заготовку лезвийного или абразивного инструмента.

К электрическим относят способы обработки, использующие электрическую энергию непосредственно для технологических целей путем подвода ее в зону резания без промежуточного превращения в другие виды энергии. Преобразование электрической энергии в другой вид энергии (тепловую, химическую и др.) происходит непосредственно в обрабатываемом материале.

В соответствии с этим электрический способ обработки разделяют на следующие методы:

- ✓ электротермические, использующие преимущественно тепловое действие электрического тока;
- ✓ электрохимические, использующие его химическое действие;
- ✓ электроэрозионные, использующие эрозионное действие тока;
- ✓ электромеханические, использующие его механическое действие.

Химическими называют способы обработки, использующие химическую энергию непосредственно для технологических целей, в этом случае обработку, т. е. снятие определенного слоя металла, осуществляют в химически активной среде. Сюда относят, например, метод химического фрезерования.

Лучевые методы обработки основаны на использовании для съема материала воздействия сфокусированного луча с высокой плотностью энергии; удаление материала происходит путем испарения вследствие преобразования лучевой энергии непосредственно в тепло.

Электронно-ионные методы обработки имеют особое значение при обработке резанием деталей приборов; при этом методе применяют электронные и ионные лучи для изготовления интегральных схем и полупроводниковых приборов. В настоящее время освоены ионно-плазменные и плазмохимические методы обработки.

Комбинированные методы обработки резанием используют для снятия заданного слоя металла одновременным воздействием несколькими различными по своей физической сущности явлений или совмещением различных способов подвода энергии. Комбинированные методы значительно повышают производительность и точность обработки, увеличивают стойкость инструмента по сравнению с отдельными составляющими их методами. Помимо этого, в ряде случаев освоение комбинированных методов обработки позволяет достигнуть новых технических эффектов, определяющих значительное увеличение прочностных, износостойких и других эксплуатационных параметров деталей.

Примерами комбинированного метода обработки являются способы обработки, основанные на термомеханическом воздействии, резание с подогревом заготовок; способы обработки с одновременным механическим и химическим воздействием на срезаемый слой, например, механическая обработка с подачей в зону резания активных смазочно-охлаждающих жидкостей.

Процесс резания может быть непрерывным и прерывистым.

Прерывистый процесс осуществляется путем периодического воздействия инструмента на заготовку, т. е. происходит по циклу: врезание, резание, выход и отдых режущего клина инструмента.

Обработку резанием делят на стационарную и нестационарную.

Стационарное резание – когда съём материала с заготовки происходит при неизменных условиях резания.

Нестационарные процессы резания (механические, электрические, химические и др.) осуществляются при использовании станков с программным управлением и адаптивными системами управления.

При физико-химическом методе обработки формообразование детали происходит путем непосредственного контакта рабочих поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом. В последние годы чаще стали применять бесконтактные методы обработки с высокоэнергетическими концентрированными физико-химическими процессами (плазмой, электронно-лучевым и лазерным, электрическим разрядом).

В наименование метода обработки иногда вводят понятие «размерный», имея в виду, что этот метод обеспечивает стабильное, многократно повторяемое получение деталей в пределах заданных на данный операционный технологический процесс точности формы и размеров, а также взаимные положения поверхностей.

Так, такие виды обработки, как ультразвуковая или электрохимическая, могут применяться как размерный метод для получения полости заданной формы, размеров, точности и взаимного положения поверхностей и как безразмерный метод для матового полирования, снятия острых углов и заусенцев как наружных, так и внутренних поверхностей в труднодоступных местах детали.

Операция в общем случае определяется четырьмя признаками:

1. технологическим назначением;
2. схемой формообразования;
3. методом обработки;
4. применяемым инструментом.

Однако для определения в практике используют признаки. Поэтому для конкретных производственных условий их дополняют недостающим признаком, например:

- ✓ технологическим назначением (резьбофрезерование);
- ✓ схемой формообразования (сверление со встречным вращением заготовки и инструмента и подачей инструмента);

- ✓ методом обработки (электроэрозионное прошивание);
- ✓ типом используемого инструмента (резьбонарезание метчиком).

Часто в наименование операции одновременно входят несколько недостающих признаков, например, фрезоточение (дополнение схемы формообразования и типа инструмента), плазменно-механическое точение резцом (метод обработки и тип инструмента).

Обрабатывающая система представляет собой конкретную реализацию данного способа обработки в применяемом оборудовании, инструмента и оснастки, действия которых конкретны, последовательны в пространстве и во времени и направлены на получение у детали заданной поверхности с необходимой точностью и качеством.

Операционные технологические процессы обработки обеспечивают заданное маршрутным технологическим процессом изготовления детали изменение формы, размеров, шероховатости или свойств заготовки; многие из них осуществляются путем обработки резанием, т. е. путем образования новых поверхностей на заготовке посредством снятия с нее определенного слоя.

Существует много физико-химических способов обработки резанием, осуществляющих удаление материала с заготовки посредством механического воздействия (механическая обработка), продуктов анодного растворения (электрохимическая обработка), электроэрозионного разрушения (электроэрозионная обработка) и других воздействий. Так, например, в приборостроении особое значение имеют электронно-ионные способы обработки, т. е. применение электронных и ионных лучей для изготовления интегральных схем и полупроводниковых приборов. Электронография делает возможным получение структур субмикроскопических размеров. К процессам обработки резанием следует относить все способы изготовления деталей снятием с заготовки определенного слоя; при этом материалы могут быть любых видов (труднообрабатываемые, например, неметаллические – стеклопластики).

Этот технологический передел производства машин определяется проектированием технологических процессов физико-химических методов обработки.

К высокоэффективным методам обработки относятся электрофизические и электрохимические методы обработки материалов.

Электрофизическими и электрохимическими методами обработки называют большую группу новых технологий, применяемых для удаления

материала с обрабатываемых поверхностей, его переноса, формообразования деталей или структурных преобразований, осуществляемых с помощью электрической энергии, вводимой непосредственно в зону обработки (группа I) либо с предварительным специальным преобразованием вне рабочей зоны в другие виды энергии – световую, акустическую, магнитную, тепловую (группа II).

Группа I охватывает методы электрохимической, анодно-механической, электроэрозионной электроконтактной обработки, нагрева в электролите и некоторые другие.

К группе II относятся ультразвуковые, светолучевые, плазменные, электроннолучевые, электровзрывные и некоторые другие методы, при осуществлении которых происходят специальные преобразования электрической энергии.

Промежуточное место занимают так называемые комбинированные методы, сочетающие элементы групп I и II.

Другим классификационным признаком, который делит указанные методы на два класса, является схожесть с другими процессами формообразования:

- ✓ методы, осуществляемые процессами, аналогичными обработке давлением (магнитно-импульсная, электрогидравлическая и т. д.).
- ✓ методы, осуществляемые процессами, аналогичными механической обработке резанием.

Известно разделение электрофизических методов на методы:

- ✓ обработки токопроводящих материалов (например, электроэрозионные);
- ✓ методы импульсного ударного механического воздействия на материал (например, ультразвуковые);
- ✓ лучевые методы (например, светолучевая обработка).

Контрольные вопросы

1. Назовите основные области применения высокоэффективных методов обработки.
2. Назовите основные классификационные признаки высокоэффективных методов обработки.
3. Приведите примеры высокоэффективных методов обработки, основанных на тепловом разрушении материала.
4. Приведите примеры высокоэффективных методов обработки, основанных на химическом разрушении материала.

Глава 2. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННЫЕ НА НЕПОСРЕДСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

2.1. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

2.1.1. Механизм и закономерности формообразования

Электрохимическая обработка (ЭХО) основана на электрохимическом (анодном) растворении металла заготовки при высоких плотностях электрического тока [3].

Механизм растворения металла при ЭХО основан на электролизе. Это процесс, при котором происходит окисление или восстановление поверхностей электродов (проводников электрического тока), соединенных с источником питания (ИП) и помещенных в токопроводящий раствор – электролит [4].

Один из электродов (заготовка) присоединен к положительному полюсу ИП и является анодом, а второй (инструмент) – к отрицательному полюсу последний является катодом. В электролитах молекулы вещества распадаются на электрически заряженные частицы – ионы, каждый из которых переносит один или несколько электрических зарядов.

Число положительных и отрицательных зарядов, переносимых ионами, одинаково, и поэтому в целом электролит электрически нейтрален.

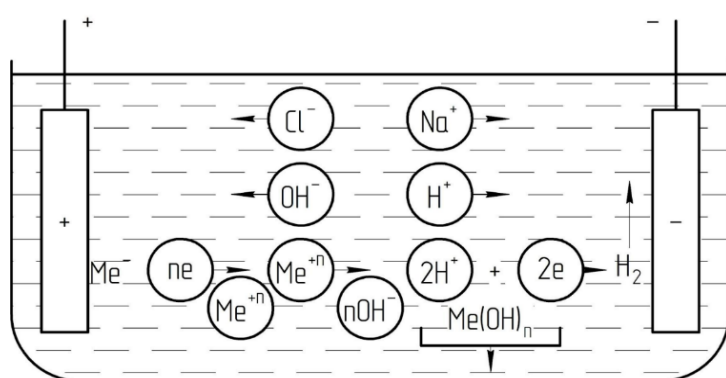
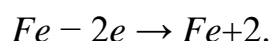


Рис. 1. Схема механизма электролиза

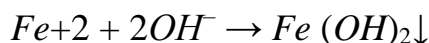
Например, молекула хлористого натрия, растворяясь в воде, распадается на катион натрия Na^+ и анион хлора Cl^- , кроме того, вода содержит ионы водорода H^+ и гидроокиси OH^- . Если к электродам, погруженным в этот рас-

твор, приложить разность потенциалов, то анионы гидроокиси OH^- и хлора Cl^- будут двигаться к аноду, а катионы водорода H^+ и натрия Na^+ – в сторону катода. Электрическая цепь (ИП – электрод – электролит – электрод – ИП) при этом замкнется и ИП будет перемещать электроны по внешней цепи (рис. 1).

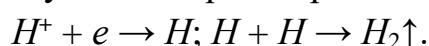
Ионы металла не будут переходить в раствор. Атомы Fe , отдавая электроны, будут образовывать ионы железа:



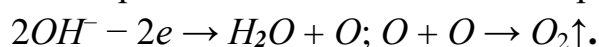
Образующийся ион металла Me связывается с ионом гидроксидной группы OH^- , образуя гидрат окиси металла $Me(OH)_n$, который плохо растворяется в воде и выпадает в осадок, например, для железа:



Ионы водорода H^+ разряжаются на катоде, образуя атомы водорода, которые в виде пузырьков уходят из раствора:



При этом на аноде происходит выделение газообразного кислорода:



При ЭХО применяют такие электролиты, катионы которых (Na^+ , H^+ и др.) не осаждаются на поверхности катода, чем обеспечивается очень важное достоинство ЭХО – неизменность формы электрода-инструмента в процессе всего периода его эксплуатации [5].

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

$$M = KI\tau,$$

где K – электрохимический эквивалент вещества (табл. 1), мг/А·с;

I – сила тока, проходящего через электролит;

τ – время электролиза, с.

Таблица 1

Расчетные значения электрохимических эквивалентов некоторых сплавов

Материал	K , мг/(А·с)
Сталь45	0,223
Сталь12Х18Н9Т	0,165
Жаропрочные сплавы	0,26÷0,29
Титановые сплавы	0,158÷0,162
Алюминиевые сплавы	0,092÷0,093

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

В зависимости от способов выполнения ЭХО все операции электрохимического растворения подразделяют на две различные группы, каждая из которых имеют свои закономерности [6]:

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

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

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

Принципиальная схема электрохимической обработки в стационарном электролите (рис. 2) для наиболее типичной операции – электролитического полирования [7]. Электрический ток, проходя через электролит 3 и электроды 8 и 5, вызывает растворение поверхности анода 5 в электролите и образование продуктов растворения 6 (рис. 2, а), которые, задерживаясь в углублениях шероховатости поверхности, изолируют последние от прохождения тока, сосредоточивая его силовые линии на незащищенных участках поверхности анода. Происходит быстрое растворение выступов, и поверхность анода сглаживается.

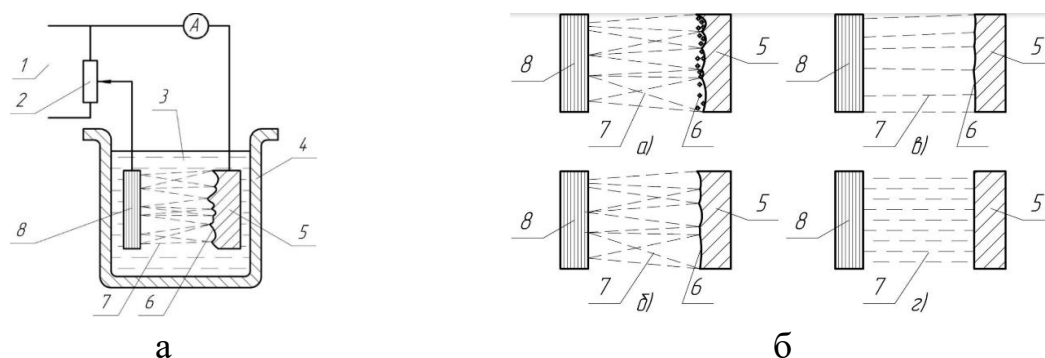


Рис. 2. Схема электрохимической обработки в стационарном электролите: а – емкость с электролитом; б – схемы процесса осаждения продуктов растворения

Электрополирование имеет многообразное применение. Наилучшее качество поверхности достигается при электрополировании чистовых и однородных металлов и сплавов. Полирование турбинных лопаток из легированных и труднообрабатываемых сплавов удаляет поверхностно-

напряженные слои металла после механической обработки, повышает коррозионную стойкость и уменьшает шероховатость поверхности, уменьшая трудоемкости операции. Полирование эвольвенты зубчатых колес улучшает прирабатываемость поверхностей, удаляет дефектный поверхностный слой, снижает трудоемкость операции. Наружное и внутреннее полирование труб из легированных сталей и специальных сплавов улучшает качество обработанной поверхности и снижает трудоемкость операции.

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

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

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

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

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

Принципиальная схема электрохимической обработки в проточном электролите изображена на рис. 3.

Ток, проходя между катодом-инструментом 3 и анодом-заготовкой 1, вызывает растворение поверхности анода, в результате чего в нем воспро-

изводится профиль катода-инструмента в виде углубления 4 негативной формы.

В начале процесса отдельные участки катода 3 располагаются значительно ближе к заготовке-аноду 1, и через них за счет меньшего сопротивления электролита 2 проходит ток большей величины.

В результате находящиеся здесь участки заготовки подвергаются анодному разрушению быстрее.

Электрический ток проходит и на других участках, но за счет меньшей плотности тока на этих участках скорость их анодного растворения менее интенсивная. В конце обработки, когда анод приобретает отображенную форму катода, плотность тока выравнивается по всей поверхности. В реальных условиях процесс значительно усложняется, что приводит к неравномерному съему металла. Поэтому рабочая часть электрода-катода представляет собой, в свою очередь, несколько откорректированный профиль обрабатываемого элемента заготовки. Точность копирования электрода-инструмента на заготовке зависит от скорости растворения участков заготовки, отстоящих на различных расстояниях от электрода-инструмента. Рассмотрим получение углубления в плоской заготовке 2 электродом-инструментом 1, имеющим выступ ab .

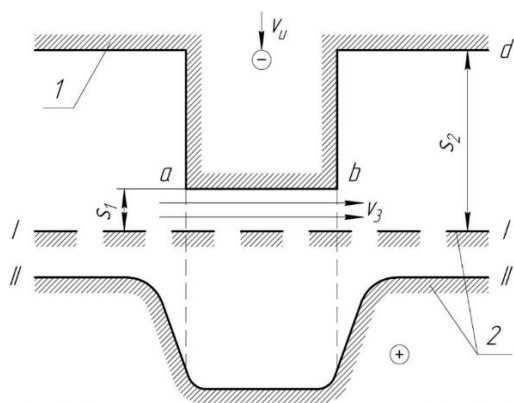


Рис. 3. Схема ЭХО в проточном электролите

В начале процесса граница заготовки занимает положение I-I.

На расстоянии s_1 от нее расположен выступ ab электрода-инструмента, который перемещается к заготовке с такой скоростью $V_и$, чтобы сохранялся постоянный зазор S_1 . Через межэлектродный зазор прокачивают электролит со скоростью $V_э$.

Если приближенно принять выход по току, удельную проводимость электролита и напряжение одинаковыми по всей длине межэлектродного промежутка, то скорости анодного растворения материала под участком ab и cd будут обратно пропорциональны величине межэлектродных зазоров на этих участках: $V_{ab} / V_{cd} = S_2 / S_1$.

По мере растворения металла заготовки и перемещения электрода-инструмента зазор S_2 уменьшается, но остается справедливым условие $S_2 > S_1$, т.е. съем металла под выступом идет быстрее. Через некоторое время в

плоской заготовке будет получено углубление с границей II–II. Форма электрода-инструмента отобразилась на аноде, и достигнута размерная обработка.

При ЭХО скорость анодного растворения и точность обработки тем выше, чем меньше межэлектродный зазор. Однако с уменьшением зазора усложняется процесс его регулирования, возрастает сопротивление протеканию электролита, может произойти пробой, вызывающий повреждение обрабатываемой поверхности. Из-за увеличения газонаполнения при малых зазорах снижается скорость анодного растворения. Следует выбирать такой размер зазора, при котором достигаются оптимальные скорость съема металла и точность формообразования.

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

При ЭХО используется три способа регулирования межэлектродных зазоров (рис. 4).

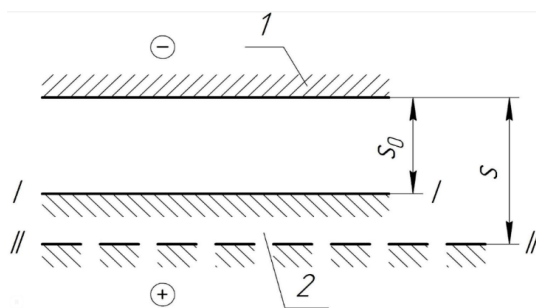


Рис. 4. Межэлектродные зазоры

1. При работе с неподвижными электродами зазор постоянно возрастает, скорость анодного растворения снижается. Режим изменяется в течение обработки заготовки, т.е. является нестационарным. В начале процесса анодного растворения электрод-инструмент 1 находится относительно заготовки 2 на расстоянии S_0 . Через некоторое время τ граница обрабатываемой поверхности заготовки, занимавшая положение I–I, переместится в положение II–II, а зазор возрастет на толщину растворенного слоя.

2. При постоянной скорости подачи инструмента режим обработки с течением времени становится близким к стационарному режиму. Рассмотр-

рим схему прошивания при скорости подачи $V_{и} = const$. Если выбранная скорость подачи меньше, чем скорость растворения металла, то зазор постепенно увеличивается. Это приводит к снижению скорости удаления материала. Через некоторое время скорость подачи инструмента и скорость растворения материала заготовки выравниваются, и режим становится стационарным. При превышении скорости подачи электрода-инструмента над скоростью растворения металла также происходит саморегулирование зазора и устанавливается стационарный режим с постоянным установившимся зазором.

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

В момент включения рабочего тока зазор S равен расчетной величине. Далее, в зависимости от схемы перемещения электрода-инструмента между циклами его подвода и отвода зазор либо возрастает, либо остается постоянным. Время между циклами измеряется секундами, поэтому изменение зазора во времени незначительно и его можно принимать равным расчетному зазору, а режим считать стационарным. Современное оборудование для ЭХО, как правило, имеет адаптивную систему управления, одной из функций которого является регулирование скорости подачи без ощупывания инструментом обрабатываемой поверхности.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные химические явления, протекающие при резании материалов.
2. Перечислите основные электромагнитные явления, протекающие при резании материалов.
3. Опишите методику построения комбинированных способов обработки.
4. Перечислите основные классы комбинированных методов обработки материалов.
5. Перечислите основные типы комбинированных методов обработки материалов.

2.1.2. Типовые технологические операции электрохимической обработки

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

Достоинствами ЭХО являются:

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

Недостатками ЭХО являются:

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

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

- ✓ электрохимическое маркирование;
- ✓ электрохимическое удаление заусенцев;
- ✓ электрохимическое объемное копирование;
- ✓ электрохимическое прошивание отверстий и каналов сложной формы;

- ✓ электрохимическое разрезание;
- ✓ электрохимическое полирование.

Электрохимическое маркирование деталей выполняется в основном по схеме с неподвижными электродами (рис. 5). Информация (цифры, буквы, рисунки) переносится на деталь копированием профиля на электродах или избирательным растворением металла в прорезях диэлектрического трафарета [8].

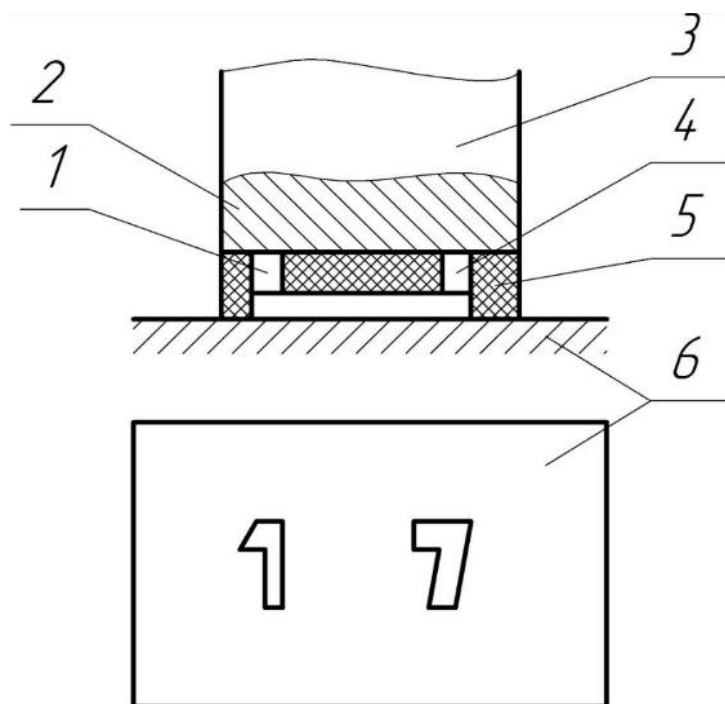


Рис. 5. Общая схема процесса электрохимического маркирования

Схема копирования знаков, с помощью которых на деталь наносят цифры. Знаки 1, 4 на инструменте выполнены в зеркальном отображении и закреплены на торцевой части корпуса 3. Пространство между ними заполнено диэлектриком 2, который предохраняет материал детали от растворения на участках между знаками. Зазор между рабочей частью наносимых знаков

1, 4 и заготовкой 6 поддерживается диэлектрическими прокладками 5. Если глубина нанесения информации невелика ($0,01 \div 0,02$ мм), то электролит в межэлектродный промежуток наносят тампоном; при необходимости получить углубления до $0,3 \div 0,4$ мм между инструментом и деталью прокачивают электролит. За счет анодного растворения металла под знаками образуются углубления, повторяющие отображение профиля знаков, как показано в нижней части.

Поскольку процесс идет при малой скорости движения электролита или без всякой прокачки, продукты обработки оседают в углублении, образуя контрастное изображение.

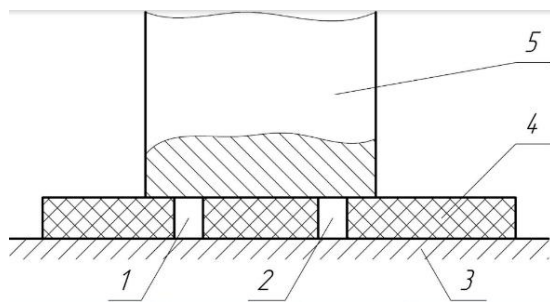


Рис. 6. Использование диэлектрического трафарета

При использовании диэлектрических трафаретов наносимая информация имеет форму просечек 1, 2 (рис. 6). Трафарет 4 накладывают на деталь 3 и прижимают электродом-инструментом 5.

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

Для мелкого маркирования без прокачки электролита диэлектрические прокладки выполняют так, чтобы межэлектродный зазор составлял $0,02 \div 0,15$ мм, при этом рабочее напряжение от источника питания в зависимости от материала детали может составлять от 3 до 16 вольт. Время маркирования подбирают экспериментально, обычно оно составляет несколько секунд [9].

Для мелкого маркирования без прокачки электролита диэлектрические прокладки выполняют так, чтобы межэлектродный зазор составлял $0,02 \div 0,15$ мм, при этом рабочее напряжение от источника питания в зависимости от материала детали может составлять от 3 до 16 вольт. Время маркирования подбирают экспериментально, обычно оно составляет несколько секунд [9].

2.1.3. Оборудование для электрохимического маркирования

При необходимости нанесения графического изображения на металлические поверхности изделий на постоянный срок используется специализированное оборудование. К такому оборудованию относятся стационарные и портативные гравировальные установки со специальными маркирующими головками. Примером такого оборудования является устройство ЕС100 фирмы «Лазер-мастер», изображенное на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид устройства для электрохимического маркирования модели EC100 [10]

К основным преимуществам данной модели следует отнести возможность нанесения светлой или темной маркировки, небольшой вес и компактный объём. Технические характеристики устройства представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики устройства для электрохимического маркирования EC100

Напряжение, В	220
Мощность, ВА	50÷160
Рабочая температура,	1÷40
Вес, кг	3
Габариты, мм	200x160x90

На рынке существует довольно широкий выбор оборудования для электрохимической маркировки, поэтому выбор не ограничивается лишь приведенным в примере приспособлением.

Электрохимическое удаление заусенцев по схеме, изображенной на рис. 8, с неподвижными электродами можно выполнять в труднодоступных местах, например, в сообщающихся каналах топливо-распределительной аппаратуры. После механической обработки на кромках отверстий образуются заусенцы 4, которые в процессе эксплуатации

детали могут оторваться и попасть в жиклеры, сопла форсунок. Их необходимо устранить, а кромки скруглить.

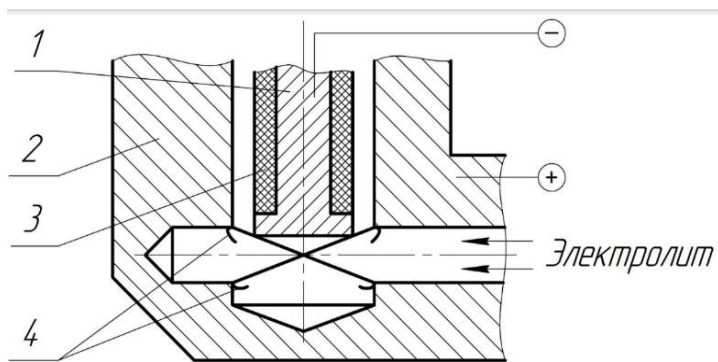


Рис. 8. Процесс удаления заусенцев внутри детали

Для выполнения такой операции в одно из отверстий заготовки 2 вводят электрод-инструмент 1, наружная боковая поверхность которого покрыта изоляцией 3. Процесс растворения заусенцев и

округления кромок занимает доли минуты. При этом снижаются высотные параметры шероховатости поверхности, в результате чего дополнительно уменьшаются гидравлические потери.

2.1.4. Оборудование для электрохимического удаления заусенцев

На рис. 9 представлен станок Sk-ECM450D для проведения электрохимического удаления заусенцев с изделий, отечественной фирмы Semat. Станок способен удалять заусенцы и скруглять острые кромки в деталях из конструкционных, жаропрочных, закаленных, магнитных сталей и сплавов, алюминиевых и титановых сплавов.



Рис. 9. Внешний вид станка модели Sk-ECM450D для электрохимического удаления заусенцев [11]

Основные технические характеристики данного оборудования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики станка модели Sk-ECM450D

Время обработки, с	5÷600
Потребляемая мощность (не более), кВт	20
Максимальный размер детали, мм	500x600x550
Размер рабочей поверхности стола, мм	500x600
Диапазон тока, А	1÷450
Диапазон напряжений, В	6÷30
Используемые электролиты	10÷15% <i>NaCl</i> , <i>NaNO₃</i> и др.

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

Общая схема метода обработки объёмным копированием изображена на рис. 10.

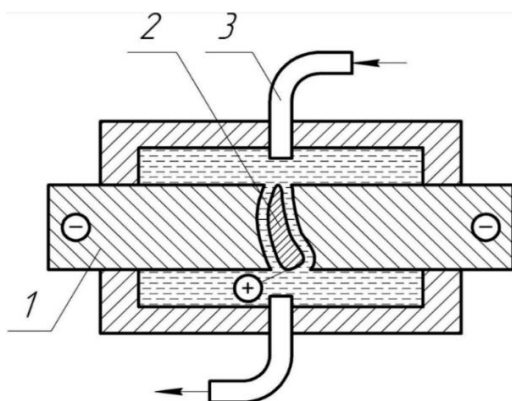


Рис. 10. Схема обработки объёмным копированием прокачивают 10%-ный раствор поваренной соли, подаваемый через штуцер 3. Режим формообразования: напряжение на электродах 8÷11 вольт, плотность тока 15÷20 А/см², скорость подачи 0,3÷0,4 мм/мин. Металл с за-

Заготовку 2 помещают между двумя латунными копиями – электродами 1 – соответствующей формы на расстоянии 0,3÷0,5 мм от них. Через образовавшийся зазор под давлением около 1 МПа

готовки удаляется со скоростью подачи при шероховатости обработанной поверхности $Ra = 1,25 \div 2,5$ мкм.

Исходя из особенностей электрохимического формообразования, полагают, что максимальный припуск, удаляемый с обрабатываемой поверхности, должен быть не более двойной величины минимального припуска. Так, если в среднем с любой точки снимают по 0,8 мм, то минимальный сьем в любой части заготовки должен быть не менее 0,4 мм.

В процессе электрохимического формообразования одновременно выявляются дефекты обрабатываемой поверхности, в частности, микротрещины. Таким образом, при обработке осуществляется не только формообразование, но и контроль качества, что особенно важно для ответственных деталей, например, турбинных лопаток. Практика показывает, что электрохимические методы формообразования в $4 \div 10$ раз производительнее механической обработки. Электрохимический метод обработки особенно эффективен при обработке заготовок из жаропрочных и титановых сплавов.

2.1.5. Оборудование для электрохимического объемного копирования



Подобная методика обработки может быть осуществлена на специализированном оборудовании, например, на электрохимическом копировально-прошивочном станке SFE-5000M. Внешний вид станка изображен на рис. 11.

Технические характеристики станка приведены в табл. 4.

Рис. 11. Внешний вид электрохимического копировально-прошивочного станка SFE-12000M [12]

Технические характеристики электрохимического копировально-прошивочного станка модели SFE-12000M

Площадь обработки (макс), см ²	120
Достижимая точность обработки, мм	0,005
Шероховатость после обработки, Ra	0,16÷3,2
Применяемый электролит	12%-ный раствор NaNO ₃
Напряжение, В	380
Частота, Гц	50
Потребляемая мощность, кВт	40
Габариты станка, мм	2100x1700x2100

Электрохимическое прошивание отверстий и каналов сложной формы выполняют в корпусных деталях из труднообрабатываемых сталей и сплавов по различным схемам (рис. 12).

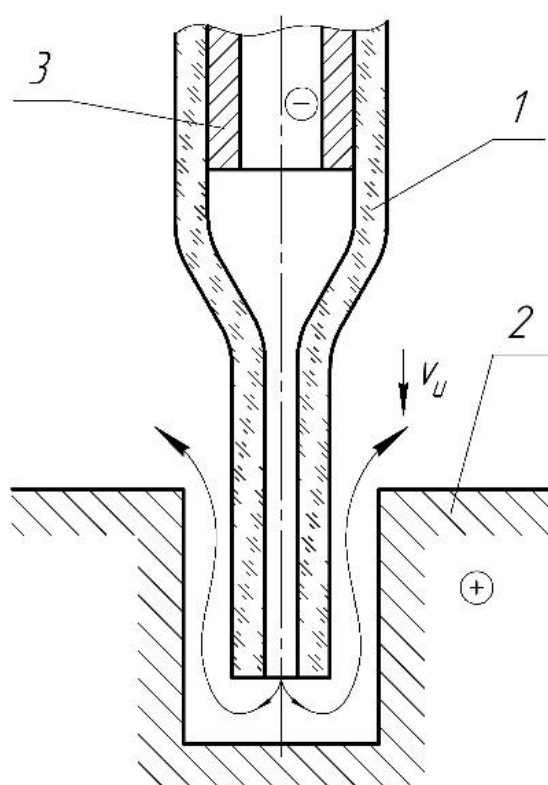


Рис. 12. Схема прошивания отверстия с использованием полого электрода-инструмента

Для получения отверстий диаметром от 0,3 до 1,5 мм используют метод электрохимического струйного прошивания.

Электрод-инструмент, корпус которого 1 изготовлен из электроизоляционного материала, например, стекла, имеет внутри металлическую катодную втулку 3. При прокачивании электролита под давлением через катодную втулку 3 и корпус 2 они сообщают поступательное перемещение со скоростью $V_{и}$ и в заготовке 2 получают цилиндрическое отверстие.

Формообразование сквозных и глухих отверстий любого профиля (рис. 13).

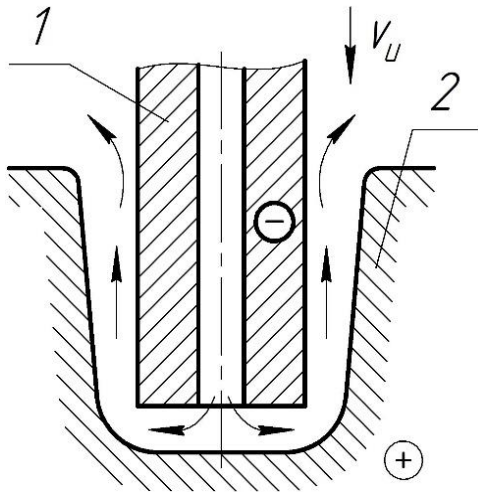


Рис. 13. Формообразование глухих отверстий

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

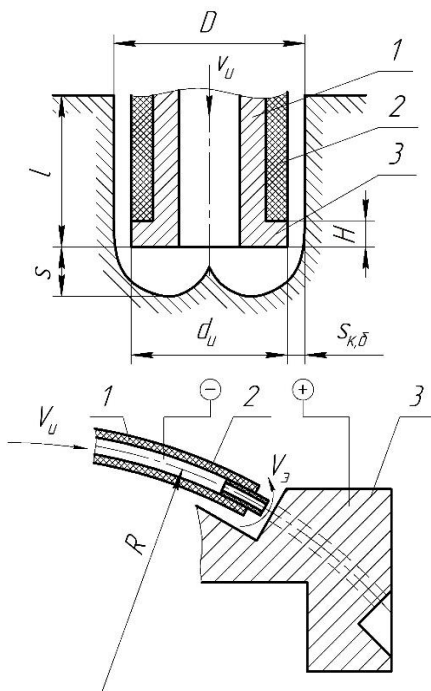


Рис. 14. Обработка изделия электрода-инструмента

Электрохимическое прошивание отверстий электродом-инструментом 1 (рис. 14), рабочая часть которого имеет токопроводящий поясик высотой H , а остальная часть покрыта электроизоляционным слоем 2, обеспечивает постоянную величину бокового зазора по всей высоте отверстия, а, следовательно, последний имеет цилиндрическую форму. Сообщение электроду вращательного движения V_z повышает точность прошиваемого отверстия и качество обработанной поверхности. При выполнении каналов для смазки в корпусных деталях, колечатых валах ЭХО позволяет соединить любые участки детали отверстием произвольного сечения с криволинейной осью.

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

2.1.6. Оборудование для электрохимического прошивания отверстий

Технологические операции прошивания отверстий возможно осуществить на широком спектре оборудования. Примером используемого в сфере электрохимической обработки оборудования является коммерческая модель станка SEMAT серии Sk-ECM. Внешний вид станка показан на рис. 15.



Рис. 15. Внешний вид электрохимического станка SEMAT серии Sk-ECM [13]

На данном станке возможно проводить операции по размерному формообразованию изделий из токопроводящих материалов. Формирование обработанной поверхности достигается обратным копированием размеров и формы электрода-инструмента при анодном растворении заготовки. Возможно изготовление оформляющих поверхностей штамповой, прессовой и литьевой оснастки. Присутствует возможность

ремонта и восстановления инструмента.

Технические характеристики станка указаны в табл. 5. В зависимости от модельного ряда указаны диапазоны возможных значений.

Таблица 5

Технические характеристики станка SEMAT серии Sk-ECM

Максимальный постоянный ток, А	450÷2700
Максимальный импульсный ток, А	1300÷8100
Максимальная площадь обработки, см ²	20x120
Размеры рабочей поверхности станка, мм	500x600
Объём бака для электролита, л	1000

Электрохимическое разрезание заготовок возможно производить по следующим схемам:

- ✓ электродом-инструментом в виде тонкого металлического диска;
- ✓ при использовании непрофилированного электрода-проволоки.

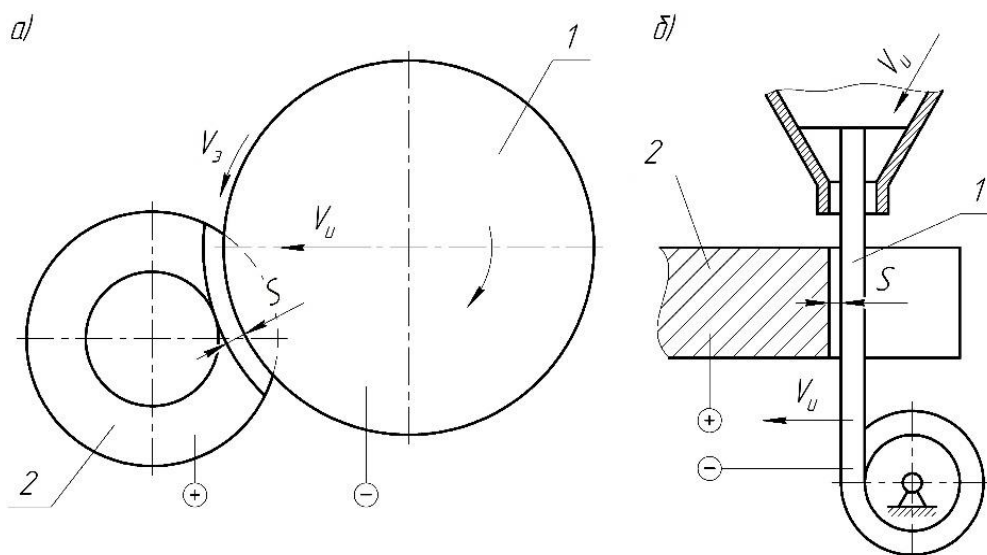


Рис. 16. Схемы проведения операции электрохимического разрезания

При разрезании по схеме (рис. 16а) металлическому диску сообщают вращение со скоростью $30 \div 40$ м/с, а электролит подают в зону разрезания поливом. Анодное растворение происходит без заметного усилия на заготовку, поэтому можно разрезать с высокой точностью и без деформаций тонкие ажурные детали. Скорость разрезания может достигать $0,2 \div 0,3$ мм/с при погрешности обработки не более 0,1 мм.

При использовании непрофилированного электрода-проволоки (рис. 16б) последнему сообщают постоянное перемещение со скоростью подачи V_u , а электролит прокачивают под давлением через зону разрезания. Скорость разрезания может достигать 0,2 мм/с, ширина паза $0,5 \div 5$ мм, толщина разрезаемого металла $0,1 \div 20$ мм, погрешность ширины паза не более 0,1 мм. Достоинством данного метода разрезания является не только отсутствие заусенцев, но и наличие округления на прорезанных краях радиусом до 0,5 мм.

Электрохимическое полирование может выполняться по двум вариантам:

- ✓ в стационарном электролите;
- ✓ в проточном электролите.

Полирование в проточном электролите осуществляется для обработки предварительно формообразованных поверхностей сложного профиля неподвижным катодом-инструментом. Последний устанавливают с малым зазором над обрабатываемыми поверхностями заготовки и, прокачивая электролит через рабочую зону, интенсифицируют процесс анодного растворения за счет высокой плотности тока и обеспечивают достаточно высокую размерную точность.

Этот метод получил название «анодно-гидравлическое размерное полирование» (АГРП).

2.1.7. Оборудование для электрохимического полирования

Осуществление полировки данным методом возможно на станке SEMAT серии Sk-EPP25, который изображен на рис. 17.



Рис. 17. Внешний вид станка для электролитно-плазменной полировки серии Sk-EPP25 [14]

Данная настольная установка предназначена для электролитно-плазменной полировки малогабаритных деталей из различных токопроводящих сплавов. Применяется в часовой, ювелирной промышленности, после 3D-печати в медицине и авиации.

Технические характеристики станка указаны в табл. 6.

Таблица 6

Технические характеристики станка серии Sk-EPP25

Рабочее напряжение, В	200÷350
Максимальный ток, А	25
Плотность тока, А/см ²	0,5÷0,8
Рабочая температура, °С	70÷90

Контрольные вопросы

1. На каком физическом явлении основана электрохимическая обработка?
2. Какие электролиты применяют при электрохимической обработке?
3. На какие группы принято разделять электрохимическую обработку?
4. Какие технологические операции характерны для электрохимической обработки в проточном электролите?
5. Какие технологические операции характерны для электрохимической обработки в стационарном электролите?

2.2. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

2.2.1. Процесс электроэрозионной обработки

В основе методов электроэрозионной обработки (ЭЭО) лежит использование энергии электрического разряда, возбуждаемого между электродом-инструментом и обрабатываемой заготовкой для удаления материала при формообразовании детали.

В настоящее время к электроэрозионной обработке относятся:

- ✓ электроискровая (конденсаторные генераторы)
- ✓ электроимпульсная, (независимые генераторы)
- ✓ электроконтактная.

При прохождении между двумя электродами импульсов электрического тока возникает разрушение электродов, т. е. электроэрозия. Разрушение электрода происходит путем образования лунки на его поверхности под воздействием единичного электрического разряда. Причина образования лунки – местный нагрев электродов до очень высокой температуры.

Механизм разрушения материала можно представить так. При сближении двух металлических электродов находящихся под напряжением, наступает момент, когда между участками электродов, находящихся на минимально расстоянии один от другого, создается электрическое поле высокой напряженности. Это приводит к пробое межэлектродного промежутка. В начале пробоя электроны, вырывающиеся из наиболее выступающих участков поверхности катода, устремляются к аноду. При столкновении электронов с молекулами газа (воздуха) происходит ионизация газа в межэлектродной среде и образуется узкий проводящий канал, по которому лавинообразно устремляется поток электронов. Лавина электронов

несет значительное количество энергии, которая высвобождается на материале электрода-анода в виде тепловой энергии и приводит к локальному расплавлению и частичному испарению электрода.

Возникновение и распределение электрических разрядов по поверхности определяется изменением минимального расстояния между взаимодействующими поверхностями электродов. Вследствие этого при обработке (в условиях воздействия на материал периодических импульсов определенной последовательности) на электроде-заготовке отражается форма электрода-инструмента.

Процесс эрозии значительно интенсифицируется в жидкости. Удаляемый из эрозионной лунки металл в жидкости застывает в виде мелкодиспергированных гранул шаровидной формы.

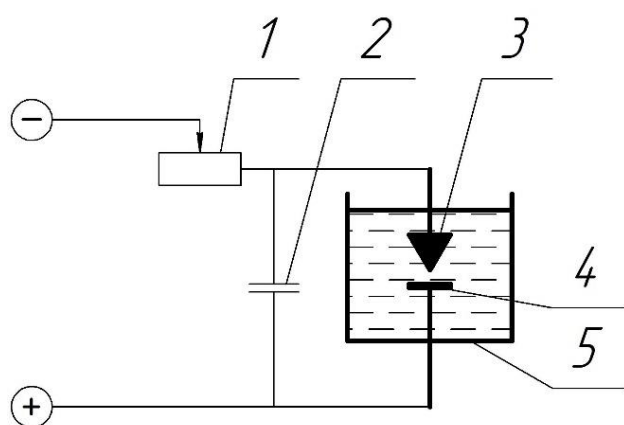


Рис. 18. Общая схема процесса электроэрозионной обработки

На рис. 18 изображена схема ЭЭО: 1 – переменное сопротивление; 2 – конденсатор; 3 – электрод; 4 – деталь; 5 – ванна с рабочей жидкостью.

При пробое жидкости образуется ионизированный канал проводимости, по которому проходит вся энергия импульса. При этом часть энергии выделяется в жидкости в виде ударной волны и кавитационного пузыря. Другая часть энергии выделяется на электродах в виде тепловой энергии вследствие прохождения тока через электроды [15].

Электроэрозионный процесс является электротермическим. Нагрев поверхности электродов создается в результате бомбардировки анода электронами и катода – положительными ионами. Вначале разряд обусловлен ионами жидкости, затем – ионизированными парами металла. Температура канала искры достигает 40000°C , температура на поверхности металла электрода 10000°C . При электроэрозионной обработке используются искровой и дуговой электрические разряды.

Электроэрозионный процесс является электротермическим. Нагрев поверхности электродов создается в результате бомбардировки анода электронами и катода – положительными ионами. Вначале разряд обусловлен ионами жидкости, затем – ионизированными парами металла. Температура канала искры достигает 40000°C , температура на поверхности металла электрода 10000°C . При электроэрозионной обработке используются искровой и дуговой электрические разряды.

При электроискровой обработке преобладает искровой разряд, когда диаметр канала значительно меньше, чем при дуговом разряде и возникает значительная концентрация энергии на электроде. Это приводит к тому,

что при электроискровой обработке преобладает испарительный механизм разрушения.

При электроимпульсной обработке преобладает дуговой разряд. При дуговом разряде резко снижается перегрев металла и переход его в паробразное состояние, так как температура канала дугового разряда меньше, чем при искровом разряде. Поэтому основным механизмом разрушения материала электрода при электроимпульсной обработке является удаление металла в капельножидком состоянии.

По мере сближения электрода-инструмента с заготовкой напряженность E электрического поля возрастает обратно пропорционально расстоянию между электродами:

$$E=U/S,$$

где U – разность потенциалов электрода-инструмента и заготовки; S – зазор между электродами.

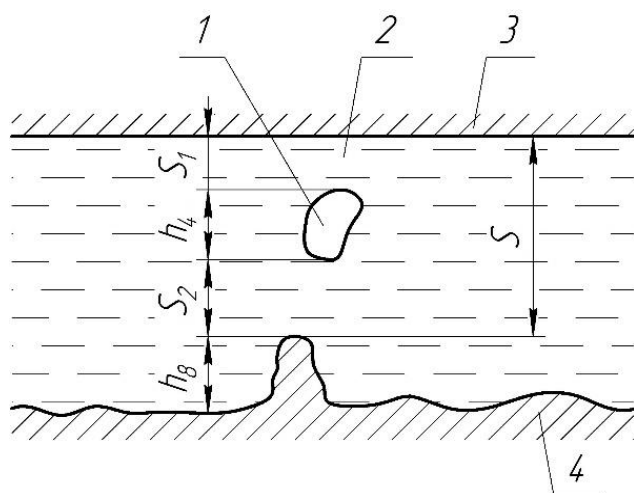


Рис. 19. Загрязнение рабочей жидкости частицей металла

Механизм падения мощности при загрязнении рабочей жидкости изображен на рис. 19. Цифрой 1 отмечены частицы металла; 2 – рабочая жидкость; 3 – электрод-инструмент; 4 – электрод-заготовка.

Наибольшая напряженность возникает на участке, где межэлектродный зазор минимален. Расположение этого участка зависит от местных выступов, неровностей на инструменте и заготовке, от наличия и размеров электропроводных частиц, находящихся в межэлектродном промежутке. Формирование расчетного зазора S между электродом-инструментом 3 и заготовкой 4, зависит от высоты h_g местного микро- или макровыступа на заготовке. Напряженность поля в районе выступа будет наибольшей, что повышает вероятность пробоа межэлектродного промежутка в этой точке. Кроме того, напряженность будет зависеть от наличия электропроводных частиц 1 в диэлектрике 2. Частица 1 с размером h_c уменьшает расчетный зазор до размера $S_1 + S_2$. Если не учитывать возможности присутствия в промежутке таких частиц,

наибольшая напряженность возникает на участке, где межэлектродный зазор минимален. Расположение этого участка зависит от местных выступов, неровностей на инструменте и заготовке, от наличия и размеров электропроводных частиц, находящихся в межэлектродном промежутке. Формирование расчетного зазора S между электродом-инструментом 3 и заготовкой 4, зависит от высоты h_g местного микро- или макровыступа на заготовке. Напряженность поля в районе выступа будет наибольшей, что повышает вероятность пробоа межэлектродного промежутка в этой точке. Кроме того, напряженность будет зависеть от наличия электропроводных частиц 1 в диэлектрике 2. Частица 1 с размером h_c уменьшает расчетный зазор до размера $S_1 + S_2$. Если не учитывать возможности присутствия в промежутке таких частиц,

то следовало бы в расчетах принять зазор равным S . Поскольку истинный зазор будет меньше, чем расстояние между электродами, то напряженность поля на участках, где имеются электропроводные частицы, окажется выше.

Если электроды сблизить до расстояния нескольких десятков микрометров, то в отдельных местах напряженность поля может достигнуть значения, при котором в месте наименьшего зазора возникает электрический разряд. В результате образуется углубление в форме сферической лунки радиусом R .

Образование лунок при ЭЭО схематично изображено на рис. 20.

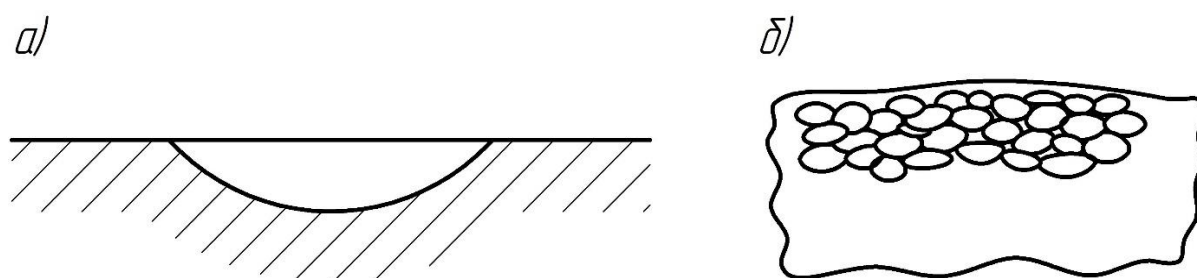


Рис. 20. Варианты образования лунок при ЭЭО

Степень электроэрозии электрода в определенных условиях зависит от полярности электродов. Так, при одинаковых материалах электродов в условиях действия коротких импульсов наблюдается большая эрозия электрода, подключенного к аноду. При воздействии же длительных импульсов большей эрозии подвержен катод. Поэтому при электроискровой обработке (импульсы малой длительности) оптимальная полярность включения электродов – прямая т. е. заготовка – анод, инструмент – катод. При электрической импульсной обработке полярность обратная: заготовка – катод, инструмент – анод.

Рабочие жидкости, применяемые при электроэрозионной обработке. Электроэрозионная обработка, как правило, ведется в рабочей жидкости, которая является диэлектрической средой.

Рабочая жидкость в процессе электроэрозионной обработки выполняет ряд функций:

- 1) захватывая частицы расплавленного металла и пары металла, выбрасываемые из лунки в процессе электрического разряда, жидкость способствует процессу диспергирования продуктов эрозии, образованию шаровидной формы гранул. Захват частиц жидкостью препятствует также осаждению продуктов эрозии одного электрода на противоположном;

2) рабочая жидкость удаляет продукты эрозии из зоны обработки, очищает межэлектродный промежуток и таким образом способствует стабильному протеканию процесса;

3) рабочая жидкость охлаждает электроды. Важным обстоятельством является также то, что рабочая жидкость резко увеличивает электрическую прочность межэлектродного зазора.

При электроимпульсной обработке наиболее часто применяют индустриальное и трансформаторное масла, при электроискровой – керосин и воду.

В процессе обработки рабочая жидкость загрязняется продуктами эрозии, повышается ее зольность и вязкость, что снижает производительность обработки. Установлено, что расход индустриального масла при электроимпульсной обработке составляет около $0,5 \div 0,85$ л/(кВт·ч). Обычно обработка ведется в среде спокойной рабочей жидкости. Но чтобы лучше выводить продукты эрозии и активизировать процесс, применяют прокачку рабочей жидкости. При малом давлении прокачки (до 50 кПа) и небольшие расходах жидкости износ электрода-инструмента уменьшается. При увеличении давления и расхода жидкости можно повысить производительность, но износ электрода при этом возрастает.

Отработавшая рабочая жидкость восстанавливается отстоем или фильтрацией. Отработавшее масло можно частично восстановить, добавив к нему керосин.

2.2.2. Технологические схемы электроэрозионной обработки

В настоящее время применяют несколько технологических схем электроэрозионной обработки: прошивание, электроэрозионное шлифование, разрезание профильным или непрофилированным инструментом, электроэрозионное упрочнение.

Наиболее часто полости обрабатываются по принципу прошивания с объемным копированием формы электрода-инструмента (рис. 21а). Этим способом изготавливают фасонные полости в штампах, пресс-формах, формах для литья; обрабатывают рабочие колеса турбин, компрессоров, турбинные и компрессорные лопатки, тонкостенные детали, решетки, сетки, глубокие отверстия. Этот способ используется также для клеймения и удаления сломанного инструмента.

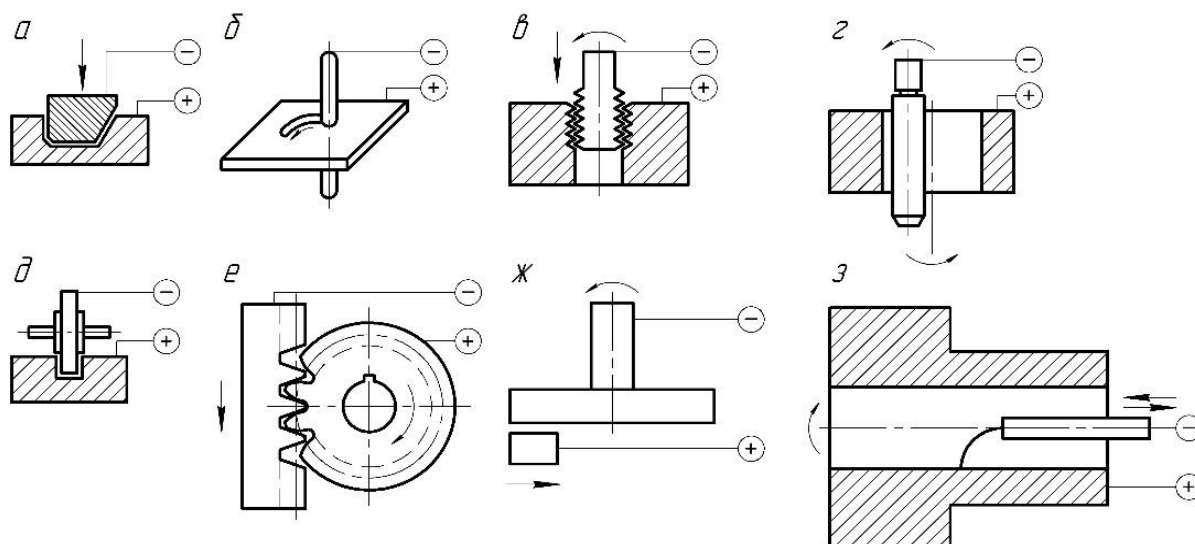


Рис. 21. Схемы формообразования деталей при электроэрозионной обработке

Для выполнения разрезных операций применяют не профилированный электрод-инструмент в виде проволоки (рис. 21б), которая постоянно возобновляется в зоне работы перемоткой с подающей катушки на приемную. Материалом для проволочных электродов является медь, латунь диаметром $0,1 \div 0,2$ мм, а для диаметров менее $0,08$ мм применяют вольфрамовую или молибденовую проволоку. Скорость перемотки зависит от диаметра проволоки, материала электрода и обрабатываемой детали и др. Например, оптимальная скорость перемотки медной проволоки диаметром $0,15$ мм при обработке твердого сплава толщиной 15 мм составляет $3 \div 4$ мм/мин. Производительность при обработки проволочным электродом определяется площадью поверхности, разрезаемой в единицу времени и достигает до 10 мм²/мин. Шероховатость обработанной поверхности достигает до $R_a = 0,32$ мкм при точности обработки нескольких микрометров.

Помимо движения подачи инструмент может получать и дополнительное движение для формообразования детали. Благодаря этим дополнительным движениям можно нарезать резьбу (рис. 21в), осуществлять внутреннее шлифование (рис. 21г), вырезать пазы (рис. 21д), нарезать зубья (рис. 21е), выполнять плоское шлифование (рис. 21ж), тонкое внутреннее шлифование (рис. 21з).

Электроэрозионное прошивание – удаление металла из полостей, углублений, отверстий, пазов, с наружных поверхностей.

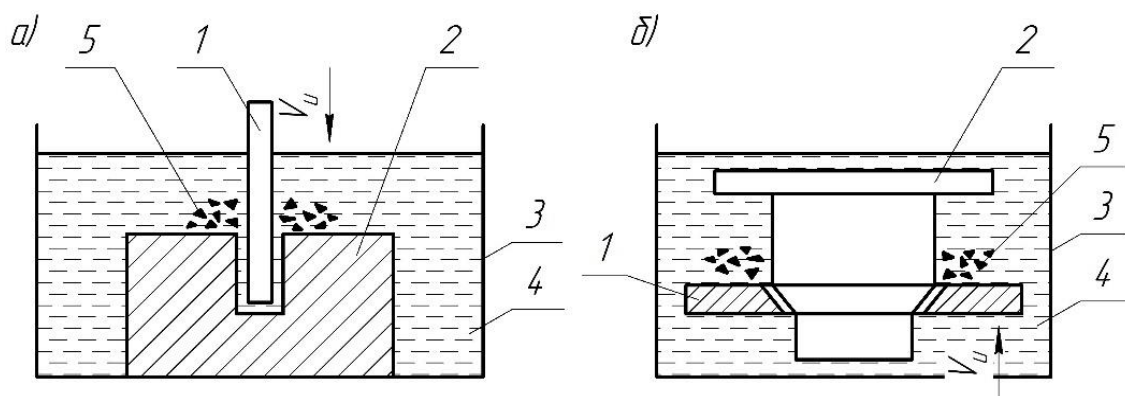


Рис. 22. Схемы изготовления углубления (а) и фасонного стержня (б): 1 – электрод; 2 – деталь; 3 – ванна; 4 – рабочая жидкость; 5 – продукты обработки.

Электрод-инструмент 1 поступательно перемещается к заготовке 2 со скоростью $V_{и}$. Оба электрода помещены в ванну 3, заполненную диэлектриком 4. Продукты обработки 5 выбрасываются в межэлектродный промежуток и оседают на дно ванны. Прошиванием можно получать поверхности как с прямой, так и с криволинейной осью.

Существует два варианта прошивания:

1. прямое копирование, когда электрод-инструмент находится над заготовкой (рис. 22а);
2. обратное копирование с расположением заготовки над электродом-инструментом (рис. 22б). Движение подачи здесь может осуществлять заготовка.

Второй вариант позволяет облегчить удаление продуктов обработки и за счет сокращения числа боковых разрядов через частицы расплавленного металла в межэлектродном промежутке повысить точность обработки детали. При изготовлении углублений разряды возникают не только на рабочей стороне электрода-инструмента, но и на его боковых поверхностях.

Поэтому кроме рабочего зазора, регулируемого скоростью подачи инструмента, формируется боковой зазор, зависящий от размера износа электрода-инструмента.

2.2.3. Оборудование для процесса электроэрозионного прошивания

Для осуществления процесса электроэрозионного прошивания используют широкий спектр доступного коммерческого оборудования. При-

мером может служить оборудование компании «АРТА», которая занимается производством электроэрозионных станков под узкий спектр технологических операций.

Наиболее простой и дешевой моделью является станок АРТА А30 – прецизионный 3-х осевой электроэрозионный координатно-прошивной станок. Оборудование показано на рис. 23.



Рис. 23. Внешний вид станка модели АРТА А30 [16]

Представленный комплекс имеет компактное исполнение с применением неподвижного предметного стола и кареток осей X, Y, установленных на стальной плите-станине. Станок в базовой комплектации включает систему ЧПУ АРТА-х.10, высокопроизводительный энергоэффективный генератор с рекуперацией энергии, гидроагрегат АРТА СВ60 Мини.

Технические характеристики приведены в табл. 7.

Таблица 7

Технические характеристики станка модели АРТА А30

Количество осей	3
Координатные перемещения, ZXY, мм	110x60x60
Максимальные размеры обрабатываемой детали, мм	150x150x80
Рабочая жидкость	Дистиллированная вода, углеводородные жидкости
Габариты станка, мм	1300x1000x1400
Электропитание, В	220
Максимальная потребляемая мощность, кВт	6
Минимальный диаметр (круглого) электрода, мм	0,02

Электроэрозионное шлифование. Схема процесса изображена на рис. 24. Металлический электрод-инструмент 1 в форме диска совершает вращательное и поступательное движение к заготовке 2 со скоростью V_u . заготовка может вращаться. Жидкость подают поливом из насадки 3. При не-

больших габаритах заготовок процесс может протекать в ванне с рабочей жидкостью. Шлифование может быть, как встречным, так и попутным.

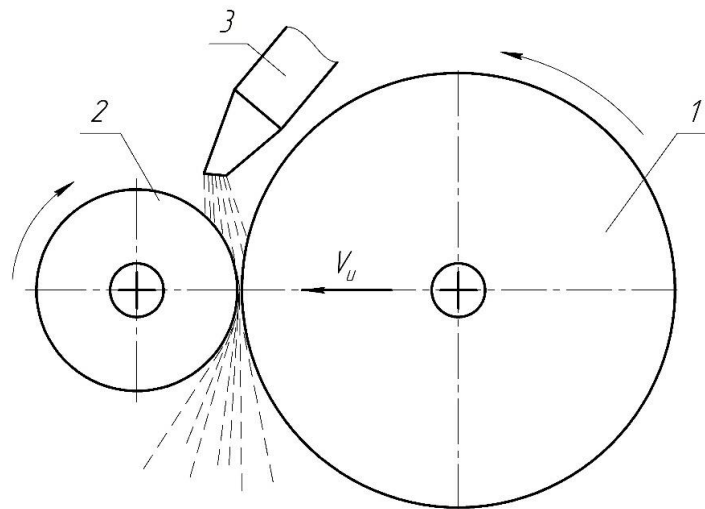


Рис. 24. Схема электроэрозионного шлифования

2.2.4. Оборудование для процесса электроэрозионного шлифования

Для осуществления процесса шлифования на электроэрозионном станке необходимо иметь встроенный инструментальный модуль с режущей проволокой, имеющий определенный ход и наклон инструмента. Таким функционалом обладает оборудование японской фирмы SODICK, к примеру, станки серии AQ. В частности, на рис. 25 изображен станок модели AQ535L, который способен, помимо операций шлифования, осуществлять операции по созданию отверстий, маркировке, вырезания.



Рис. 25. Внешний вид станка модели AQ535L [17]

Следует отметить, что модель AQ535L уже является устаревшей, так как фирма на данный момент выпускает модифицированные и обновленные станки серии AQ-Premium. Станки упомянутого модельного ряда способны обрабатывать куда более габаритные изделия, а функционал их намного шире, чем у предшественницы. Тем не менее, станок AQ535L считается эталонным и более выгодным к покупке для осуществления конкретных операций, таких как описываемая шлифовка поверхностей.

К основным техническим параметрам оборудования модели AQ535L следует относить данные, занесенные в табл. 8.

Таблица 8

Технические параметры станка модели AQ535L

Количество осей	3
Координатные перемещения, XYZ, мм	550x350x300
Максимальная высота обрабатываемой детали, мм	270
Размеры рабочего стола, мм	790x500
Габариты установки, мм	1970x2435x2355
Электропитание, В	380
Максимальная потребляемая мощность, кВт	5
Толщина проволоки, мм	0,1÷0,3

Разрезание профильным или непрофильным инструментом включает разделение заготовки на части – отрезание – и получение непрямолинейного контура – вырезание, которое выполняется только непрофильным электродом-инструментом.

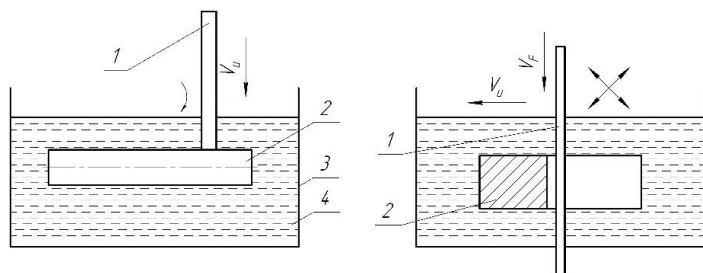


Рис. 26. Электроэрозионное разрезание профилированным (а) и непрофильным (б) электродом-инструментом

Профильный электрод-инструмент 1 при разрезании деталей (рис. 26а) может быть выполнен в форме диска или пластины. Его перемещают к заготовке 2 со скоростью V_u и в плоскости его вращения вдоль детали. Обработка выполняется в ванне

3 с диэлектрической жидкостью 4. Если разрезание выполняется пластиной с одним поступательным перемещением ее к заготовке, то это будет прошивание.

В случае использования непрофилированного электрода (рис. 26б) инструмент 1 выполняют в форме круглой проволоки диаметром $0,02 \div 0,3$ мм или стержня, которые могут перемещаться в различных направлениях со скоростью V_u в любой части заготовки 2. Для устранения влияния износа электрода-инструмента на точность прорезаемых пазов проволоку или стержень перемещают вдоль оси со скоростью V . Разрезание выполняют в ванне с диэлектрической жидкостью.

Электроэрозионное упрочнение, включающее легирование и наращивание поверхности, обычно осуществляют на воздухе. Частицы расплавленного металла инструмента на воздухе не успевают остыть и оседают на поверхности заготовки, образуя на ней слой сплава, насыщенного легирующими элементами электрода-инструмента (либо легирующим компонентом из состава рабочей среды). Кроме того, нанесенный на заготовку слой закален до высокой твердости и имеет за счет этого повышенную износостойкость.

Рассмотрим возможности применения электроэрозионных процессов в различных технологических схемах, осуществляемых этими методами.

Прошивание в электроискровом режиме профильным инструментом используют:

а) при прямом копировании:

- ✓ для изготовления ковочных штампов, пресс-форм небольших габаритов из твердых сплавов и сталей;
- ✓ для изготовления мелких сеток, волноводов, гребенок и других деталей радиоэлектронной промышленности;
- ✓ для прошивания отверстий и систем отверстий произвольного сечения в труднообрабатываемых материалах (наименьший диаметр круглого отверстия около 0,1 мм);
- ✓ для изготовления отверстий с криволинейной осью;
- ✓ для нарезания резьб на твердосплавных и закаленных стальных заготовках;
- ✓ при маркировании деталей;
- ✓ для изготовления соединительных каналов в корпусных деталях гидроаппаратуры;
- ✓ для удаления обломков сверл, метчиков и других инструментов;

б) при обратном копировании:

✓ для изготовления фасонных наружных поверхностей, имеющих ступенчатые переходы, препятствующие выходу металлорежущего инструмента;

✓ для изготовления фасонных ступенчатых внутренних поверхностей.

Прошивание в электроимпульсном режиме находит использование:

✓ при обработке ковочных штампов больших габаритов;

✓ для получения рабочего профиля крупногабаритных пресс-форм, например, в радиотехнической промышленности;

✓ для предварительной обработки объемных заготовок сложной формы, например лопаток турбин и компрессоров;

✓ для изготовления каналов сложного сечения с криволинейной образующей, например межлопаточных выемок в цельных колесах газовых турбин;

✓ для получения соединительных каналов в деталях гидроаппаратуры;

✓ для устранения дисбаланса у деталей из хрупких и твердых материалов, например магнитных сплавов.

Электроэрозионное шлифование в жидких средах используют:

✓ при изготовлении деталей из хрупких, вязких материалов и деталей, набранных из тонких листов (роторы электрических машин);

✓ для нарезания наружных резьб на деталях из твердых сплавов и закаленных сталей;

✓ для получения прецизионных отверстий;

✓ для заточки твердосплавного режущего инструмента;

✓ для профилирования и правки электропроводных абразивных и алмазных кругов.

Электроконтактное шлифование в воздушной среде позволяет удалять толстые слои металла при относительно высокой шероховатости поверхности. Оно широко используется для удаления местных дефектов и поверхностного дефектного слоя со слитков, поковок, проката.

Разрезание профильным электродом-инструментом в электроискровом режиме позволяет выполнять:

✓ пазы и щели малой ширины, например в цангах;

✓ профильные электроды-инструменты для прошивания;

✓ разрезание заготовок из вольфрама и других материалов.

Разрезанием непрофилированным электродом-инструментом получают:

- ✓ узкие сквозные или глухие щели;
- ✓ вырубные штампы небольших габаритов из твердых сплавов и закаленных сталей;
- ✓ рабочую часть резцов и других инструментов;
- ✓ щели в цангах для закрепления деталей малого диаметра (менее $2\div 3$ мм);
- ✓ таблетки из магнитных, вольфрамовых сплавов, при обработке которых требуется достичь минимального расхода материала;
- ✓ надписи, знаки, гравюры.

Электроконтактное разрезание диском или лентой в жидкости используется:

- ✓ для получения заготовок из труднообрабатываемых материалов (нержавеющих, жаропрочных, титановых, магнитных и других сплавов);
- ✓ для разрезания труб из конструкционных материалов;
- ✓ для прорезания узких пазов и отверстий в деталях.

Разрезание в воздушной среде находит широкое использование в металлургической промышленности для:

- ✓ разделения на части проката;
- ✓ отрезания литников с крупных литых заготовок.

Электроэрозионное упрочнение и легирование применяют:

- ✓ для упрочнения лезвий стального инструмента;
- ✓ с целью восстановления размеров изношенных деталей;
- ✓ для повышения износостойкости подвижных элементов конструкций;
- ✓ для нанесения на электрические контакты материалов с малым электрическим сопротивлением.

Для осуществления всех вышеперечисленных в равной степени подходят уже упомянутые технологические комплексы. В зависимости от требуемых параметров обработки необходимо тщательно подбирать возможные режимы обработки и оборудование их осуществляющее.

Контрольные вопросы

1. На каком физическом явлении основана электроэрозионная обработка?
2. Что такое обратная полярность подключения электродов при электроэрозионной обработке?
3. Что такое прямая полярность подключения электродов при электроэрозионной обработке?

4. Чем обусловлен выбор полярности электродов при электроэрозионной обработке?

5. Охарактеризуйте основные стадии единичного электроэрозионного разряда?

6. Перечислите основные технологические параметры электроэрозионной обработки.

7. Какие показатели влияют на точность при электроэрозионной обработке?

2.3. ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ ОБРАБОТКА

Сущность электроконтактной обработки (ЭКО) основана на электроэрозионном разрушении электрода-заготовки под воздействием электродуговых разрядов.

Принципиальная схема ЭКО изображена на рис. 27.

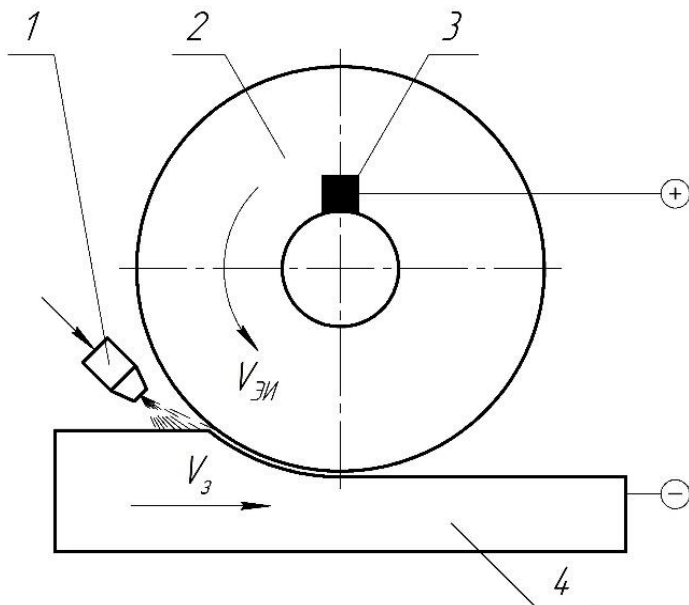


Рис. 27. Схема электроконтактной обработки

К электроду-инструменту 2 через щеточное устройство 3 и к заготовке 4 подведено напряжение постоянного тока. При этом электроду в виде диска сообщается вращение с большой окружной скоростью ($30 \div 50$ м/с), а заготовке движение подачи $V_З$. Процесс может протекать на воздухе, в рабочей жидкости (вода с антикоррозионными добавками),

либо с поливом зоны обработки. Поверхности электрода не являются идеально гладкими и имеют неровности. При вращении его выступы периодически приближаются к заготовке, вплоть до контакта. На определенном расстоянии между электродами происходит одиночный разряд, переходящий в дуговой разряд и вызывающий расплавление металла заготовки. Расплавленные частицы металла удаляются из зоны контакта быстровращающимся инструментом. При этом методе длительность и частота импульсов тока будет зависеть от качества рабочей поверхности электрода и частоты его вращения.

Вращающийся электрод сам регулирует параметры импульсов, поэтому не требуется специального генератора, как при ЭЭО, а используется постоянный или переменный ток низкого напряжения. Если процесс протекает в воздушной среде, то возникают более длительные дуговые разряды, чем при процессе в жидкости, т.к. после контакта между инструментом и заготовкой дуга может гореть довольно длительное время. При этом частицы расплавленного металла могут достигать обработанной поверхности и, внедряясь в него, значительно ухудшать качество этой поверхности. Поэтому ЭКО на воздухе выполняют на заготовительных операциях и таких черновых операциях, где не предъявляются требования к качеству поверхностей. Например, при отрезке литников и прибылей у отливок из высокопрочных сталей и сплавов [18].

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

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

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

В качестве рабочих жидкостей используют воду, 2÷3 % эмульсию; 2÷3%-ный раствор кальцинированной соды $CaCO_3$ и т.д. Материалами электродов-инструментов могут служить медь, чугун (при обработке плоскостей), сталь Ст3 (на операциях отрезки). ЭКО характеризуется высокой производительностью. Основным фактором, определяющим производительность ЭКО, является мощность, реализуемая в межэлектродном промежутке. С увеличением тока и напряжения растет скорость съема металла. Так при мощности установки 100 кВт съем металла составляет около 100 кг/г или 200000 мм³/мин. ЭКО применяют для разрезания, точения, снятия фасок в листовых заготовках под сварку, обдирки слитков, заточки режущих инструментов.

2.3.1. Примеры практического использования электроконтактной обработки

2.3.1.1. Электроконтактное разрезание

Электроконтактное разрезание ведется в следующих режимах (табл. 9):

Таблица 9

Режимы электроконтактного разрезания

Рабочий ток, А	1500÷10000
Рабочее напряжение, В	24÷31
Вид тока	Переменный
Скорость диска-электрода, м/сек	30÷100
Износ диска-электрода (% объема удаляемого металла)	До 5
Толщина диска-электрода, мм	2÷6
Диаметр диска-электрода, мм	750÷1000

Электроконтактное разрезание вращающимся диском или непрерывной лентой с подводом тока низкого напряжения к инструменту и заготовке. Эта обработка рекомендуется для резки труб, круглых и прямоугольных заготовок, профильного проката и других деталей из различных токопроводящих материалов. Производительность электроконтактного разрезания достигает 2000 мм²/с для стали и до 4000 мм²/с – для алюминиевых сплавов. Ширина реза в результате обработки на 1÷4 мм превышает толщину дискового электрода.

2.3.2. Оборудование для электроконтактного разрезания

Оборудованием для осуществления электроконтактного разрезания, в основном, служат станки с комбинированными способами взаимодействия с заготовкой. К примеру, станок модели 4А350 использует комбинированный процесс анодного растворения и электроэрозионного воздействия на обрабатываемую заготовку при движущемся относительно обрабатываемой поверхности электроде-инструменте. Рабочей средой в данном случае выступает электролит, который выделяет на аноде пассивирующую

пленку. Обычно это водный раствор жидкого стекла. Внешний вид станка приведен на рис. 28, а технические характеристики – в табл. 10.

Таблица 10

Технические характеристики станка модели 4А350

Максимальная высота обрабатываемой детали, мм	350
Размеры рабочего стола, мм	2000x800
Габариты установки, мм	3700x4600x3700
Электропитание, В	380
Максимальная потребляемая мощность, кВт	5,6
Объем бака для диэлектрика, л	500



а



б

Рис. 28. Внешний вид станка модели 4А350 [19]

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

Режимы электроконтактного шлифования указаны в табл. 11.

Таблица 11

Рабочий ток, А	600÷800
Рабочее напряжение, В	26÷28
Скорость вращения дискового инструмента, м/сек	30
Скорость вращения детали, м/сек	0,25
Средний снимаемый припуск, мм	2,5
Производительность обработки, мм ³ /мин	60 000

В силу того, что обработка деталей таким способом является довольно трудоемкой и узконаправленной операцией, используемые для её осуществления станки являются крупногабаритными и строго стационарными устройствами. Наиболее распространённый и зарекомендовавший себя в сфере обработки материалов является станок МЭ301, выпускавшийся Краснодарским станкостроительным заводом. Сейчас этот станок считается устаревшим и редко используется предприятиями, в силу того, что существуют многофункциональные зарубежные высокопроизводительные аналоги. Тем не менее, в качестве примера представляется целесообразным привести именно эту модель, в силу его специализации на работе с труднообрабатываемыми и крупногабаритными металлическими заготовками.

Электроконтактный станок МЭ-301 оснащён двустоечной каруселью с диаметром планшайбы 2,8 м. Обработка изделий осуществляется в ванне с рабочей жидкостью.

2.3.3. Оборудование для электроконтактного шлифования

Таким образом, примером оборудования для электроконтактного шлифования может быть станок МЭ301, изображенный на рис. 29.



Рис. 29. Внешний вид станка модели МЭ301

Технические характеристики станка по паспорту приведены в табл. 12.

Таблица 12

Технические характеристики станка модели МЭ301

Максимальный размер обрабатываемой детали, мм	1000x1500x600
Диаметр планшайбы, мм	2800
Габариты установки, мм	6500x8000
Электропитание, В	380
Объем бака для диэлектрика, л	2500

При обработке фасок под сварку на броневых листах из высокопрочной стали, вращающимся чугуном электродом с погружением заготовки и инструмента в воду производительность процесса достигала 70000 мм³/мин, при этом минутная подача в 2÷3 раза превышала производительность механической обработки.

Разновидностью ЭКО следует считать и новый метод электроэрозионной обработки короткой дугой (ЭЭОКД). Этот метод используется для удаления припуска с крупных заготовок из жаропрочных и титановых

сплавов энергией низковольтного квазистационарного дугового разряда постоянного тока. Обработка осуществляется вращающимся чугуном или медным электродом с поливом водой или с погружением заготовки в нее. ЭЭОКД отличается наиболее высокой производительностью среди всех электрофизических и электрохимических методов и достигает $2,5 \text{ см}^3/\text{с}$ при шероховатости $R_a = 25 \div 50 \text{ мкм}$ и глубине измененного слоя $0,1 \div 0,2 \text{ мм}$ для жаропрочного сплава. При полуступчатой обработке можно получить шероховатость $R_a = 2,5 \div 6,3 \text{ мкм}$ при производительности $0,5 \text{ см}^3/\text{с}$.

2.3.4. Оборудование для электроэрозионной обработки короткой дугой

Учитывая относительную новизну, а также высокую производительность метода по сравнению с остальными представленными в параграфе, оборудование для его осуществления является комплексным и дорогостоящим. Примером может служить линейка прецизионных координатно-прошивных станков фирмы «АРТА». Модели АРТА 1040 и e-Drill 10 позволяют выполнять операции по изготовлению сложновыполненных заходных отверстий, удаления припуска внутри отверстий и многих других сложных технологических задач.

На рис. 30, а продемонстрирована модель АРТА 1040, а модель e-Drill 10 изображена на рис.30, б.



а



б

Рис. 30. Внешние виды станков для электроэрозионной обработки короткой дугой: а – модель АРТА 1040; б – модель АРТА e-Drill 10 [20]

Технические характеристики обоих станков сведены в общую табл. 13.

Таблица 13

Технические характеристики станков АРТА моделей 1040 и e-Drill 10

АРТА 1040	АРТА e-Drill 10	
Количество осей	3	
Координатные перемещения, XY, мм	200x320	250x350
Максимальные размеры заготовки, мм	420x220x145	500x400x200
Рабочая среда	Дистиллированная вода, углеводородные жидкости	Проточная вода
Габариты, мм	1950x2000x2050	1400x700x1800
Диаметр электрода, мм	От 0,2 до 3	От 0,3
Электропитание, В	220	
Потребляемая мощность, кВт	6	Не более 3

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность электроконтактной обработки?
2. Какие рабочие жидкости применяются при электроконтактной обработке?
3. Какой эффект достигается за счет применения рабочих жидкостей?
4. Из каких материалов изготавливаются электроды-инструменты для электроконтактной обработки?
5. Укажите основные области применения электроконтактного метода обработки.
6. Укажите режимы обработки, характерные для электроконтактного шлифования.

2.4. АНОДНО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Анодно-механическая обработка (АМО) основана на комбинированном механическом, электроэрозионном и электрохимическом воздействии на материал снимаемого слоя. С увеличением удельной мощности подводимой в зону обработки, этот метод по характеру электрического воздействия приближается к электроэрозионному, а при снижении удельной мощности – к электрохимическому.

При всех способах анодно-абразивной обработки рабочие зазоры между токопроводящей связкой и деталью весьма малы ($0,01 \div 0,03$ мм), что обеспечивает высокие плотности тока и интенсивное электрохимическое и электроэрозионное воздействие. В процессе обработки выгорает связка и выкрашиваются изношенные абразивные зерна это способствует самозатачиванию кругов.

Преимущества АМО:

- ✓ высокая производительность на черновых режимах;
- ✓ высокое качество обработанной поверхности на чистовых режимах;
- ✓ возможность обрабатывать любые труднообрабатываемые металлы и сплавы;
- ✓ сравнительно легко удалять и утилизировать продукты обработки, варьировать режимы обработки в широких диапазонах.

Недостатки АМО:

- ✓ эксплуатационные неудобства использования жидкого стекла в качестве электролита;
- ✓ сравнительная сложность в эксплуатации;
- ✓ высокая стоимость оборудования.

2.4.1. Анодно-абразивная обработка

Съем металла при анодно-абразивной обработке обусловлен возникновением в зоне обработки следующих явлений:

- а) анодное растворение материала, приводящее к снятию части металла срезаемого слоя и образованию пленки;
- б) нагрев материала срезаемого слоя;
- в) электроэрозионное разрушение;
- г) механическое срезание металла абразивом, предварительно ослабленного анодным воздействием, тепловым и электроэрозионным процессами.

Работа по съёму металла при АМО осуществляется электрическим током в межэлектродном зазоре почти без силовой нагрузки на узлы анодно-механического станка в противоположность металлорежущим станкам, в которых эти узлы сильно нагружены.

Интенсивность съёма металла практически не зависит от механических свойств обрабатываемых металлов и инструмента (твёрдости, вязко-

сти, прочности), поэтому АМО целесообразно применять для изделий из высоколегированных сталей, твёрдых сплавов и т. п.

АМО различают по виду используемого для механического воздействия инструмента:

✓ инструменты из стали, чугуна, меди, латуни, графита. Обработка производится при напряжении $10 \div 12$ В с использованием в качестве электролита жидкого стекла (силиката натрия);

✓ связанный абразив (эта разновидность АМО называется анодно-абразивной). В качестве инструментов при этом используют абразивные или алмазные токопроводящие круги и абразивные бруски. Разновидностью этого процесса является схема анодно-механического шлифования неметаллической лентой.

✓ несвязанный абразив (эта разновидность АМО называется электрохимико-механическая). При этом методе обработки анодная пленка удаляется мелкодисперсным абразивом, находящимся во взвешенном состоянии в электролите.

Режущим инструментом при разрезке служит стальной диск толщиной $0,5 \div 6$ мм и диаметром до 1200 мм (рис. 31 а).

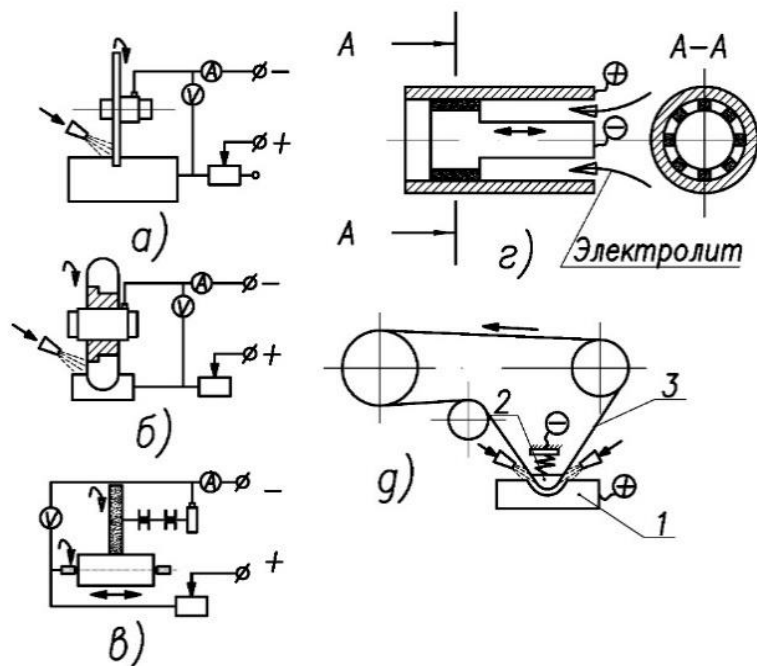


Рис. 31. Типовые схемы анодно-механической обработки: а) – разрезание; б) – обработка фасонной поверхности; в) – шлифование абразивным кругом; г) – хонингование; д) – шлифование лентой

Дисковый электрод-инструмент (катод) вращается со скоростью $10 \div 25$ м/с и подается на заготовку. В качестве электролита используется

водный раствор жидкого стекла. Съем металла с заготовки происходит за счет анодной пассивации, электротермических явлений и механического воздействия электрода-инструмента на заготовку. Дисковым электродом разрезают заготовки диаметром до 150 мм, а ленточным – до 600мм. Производительность разрезки 2000÷6000 мм²/мин.

При анодно-абразивном шлифовании (рис. 31в) абразивный круг вращается со скоростью 30÷40 м/с и является катодом, а обрабатываемая деталь – анодом. При шлифовании используются алмазные круги на металлической связке, круги из электрокорунда, карбида кремния, у которых поры заполнены расплавленным металлом или графитом. В качестве электролита при шлифовании сталей используют 5÷10 %-ный раствор азотно-кислого натрия с добавкой ингибиторов коррозии. Производительность анодно-абразивного шлифования гораздо выше, чем обычного шлифования и составляет 2000÷4000 мм³/мин. Достигается точность обработанной поверхности до 0,003мм, а шероховатость до $R_a = 0,16$ мкм; не возникает значительных структурных превращений и внутренних напряжений.

При электрохонинговании электронейтральные абразивные бруски размещаются на металлической оправке, являющейся катодом (рис. 31г).

Процесс анодно-механического шлифования неметаллической лентой (рис. 31д) осуществляется по схеме обычного ленточного шлифования. Деталь 1 является анодом и может совершать колебательные движения. Катодом 2 является медный или твердосплавный копир, прижимающий электронейтральную ленту 3 к детали. Обработка может осуществляться с подвижным или неподвижным катодом-инструментом.

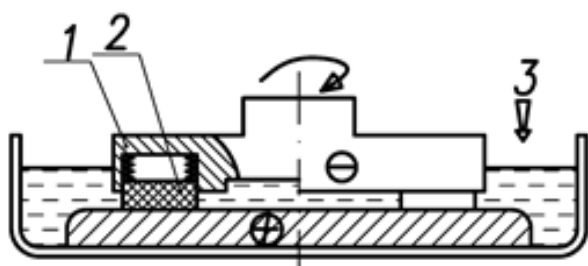


Рис. 32. Анодно-абразивное полирование

Для удаления пассивирующей пленки на заготовке в раствор вводят мелкозернистый абразив 3, шаржирующий эластичные неэлектропроводные притиры из поролона, резины, дерева и других мягких материалов. Абразивом служат шлифовальные порошки из электрокорунда, а также окись хрома. Обработку производят как на постоянном, так и на переменном напряжении от 6 до 18 В в растворах азотнокислого натрия. Данный процесс применяется для полирования ли-

При анодно-абразивном полировании (рис. 32) металлический электрод-инструмент 1 с неэлектропроводными притирами 2 устанавливаются над анодом-заготовкой.

Для удаления пассивирующей

стов из нержавеющей стали и других плоских поверхностей деталей. После полирования достигается шероховатость поверхности $R_a = 0,08 \div 0,04$ мкм.

2.4.2. Оборудование для проведения анодно-механического/абразивного шлифования

Операции анодно-механической и анодно-абразивной обработки поверхностей достаточно близки, в связи с чем они могут быть скомбинированы на базе одного станка. Ярким примером такого «базового» станка для операций анодной обработки является модель электрохимического шлифовального станка модели ОШ-625ЭФ3. К особенностям данного станка относится защита рабочей зоны специальной кабиной, очистка электролита от рабочих отходов с помощью центрифужного воздействия, перемещение рабочих органов на роликовых опорах. Алмазный круг при таком типе обработки практически не изнашивается за счёт электрохимических воздействий в зоне обработки.

Внешний вид станка модели ОШ-625ЭФ3 приведен на рис. 33.



Рис. 33. Внешний вид станка для электрохимического шлифования модели ОШ-625ЭФ3 [21]

Технические параметры характеристики станка для электрохимического шлифования модели ОШ-625ЭФ3 занесены в табл. 14.

Технические характеристики станка для электрохимического шлифования
модели ОШ-625ЭФ3

Скорость перемещения стола, мм	550
Размеры рабочего стола, мм	450x200
Габариты установки, мм	2500x2650x2360
Электропитание, В	380
Мощность главного привода, кВт	2,2
Точность позиционирования по координатам, мм	0,004

Удаление заусенцев и скруглений острых кромок на мелких деталях производят в галтовочных анодно-абразивных барабанах, рабочая камера которых имеет форму шестигранника (рис. 34). На перфорированных виниловых стенках барабана 1 снаружи закреплены металлические пластины-электроды 5. Смежные пластины включают на различные фазы (А, Б, С) вторичной обмотки трехфазного понижающего трансформатора. Барабан заполняют обрабатываемыми деталями 4 и фарфоровыми шариками 3 диаметром $3 \div 5$ мм. Электролит 2 вводится в барабан насосом и сливается через открытое отверстие в бак. В процессе галтования детали, являющиеся электродами со свободным потенциалом, подвергаются анодному растворению и абразивному воздействию. Рабочее напряжение на пластинах $8 \div 12$ В, ток до 300 А. Продолжительность процесса $1 \div 2$ часа.

Анодно-абразивная обработка используется для заточки твердосплавных режущих инструментов, для изготовления точных твердосплавных деталей с шероховатостью поверхности $R_a = 0,32$ мкм. Увеличения стойкости инструмента до 150%.

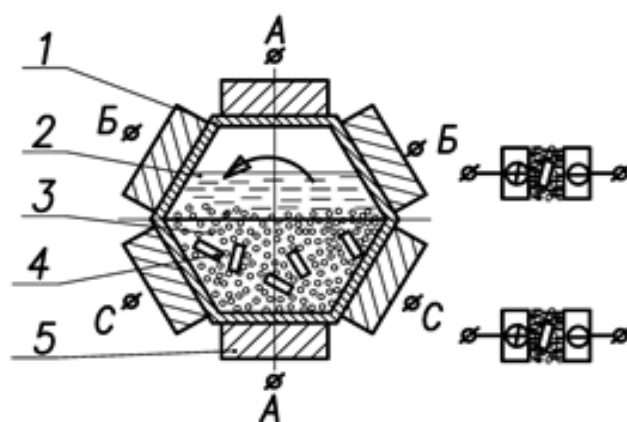


Рис. 34. Внешний вид галтовочного анодно-абразивного барабана для удаления заусенцев и скруглений кромок

2.4.3. Оборудование для удаления заусенцев и скругления острых кромок

Существуют целые фирмы, которые специализируются на производстве оборудования для химической обработки изделий. Они тщательно анализируют потребности рынка и активно подстраиваются под них, предлагая готовые решения в виде оборудования. Одной из таких фирм является немецкая компания EMAG, специализирующаяся на металлообрабатывающем оборудовании. Компания предоставляет широкий спектр технологических решений в сфере обработки металлов, в том числе и для процессов обработки кромок и удаления заусенцев любой сложности.

Линейка ECM (electro-chemical machining), в основе которой лежит специализация на электрохимической обработке идеально подходит для осуществления вышеперечисленных процессов. Возможность обработки внешних и внутренних полостей деталей, отверстий, труднодоступных узлов и сопряжений лежат в основе технологических возможностей станков линейки ECM.

Линейка представлена моделями PTS 2500, PT, PO 100 SF, PO 900 BF, CS, CL900. Отличия моделей заключается в габаритах обработки, необходимых значениях точности и необходимых технологических операциях.

На рис. 35 представлен станок модели PTS 2500. Заявлено, что в процессе обработки инструмент практически не изнашивается. Присутствует возможность использовать труднообрабатываемые сплавы и металлы. Возможность достичь высоких показателей качества поверхности, без заусенцев и изменения структуры материала.

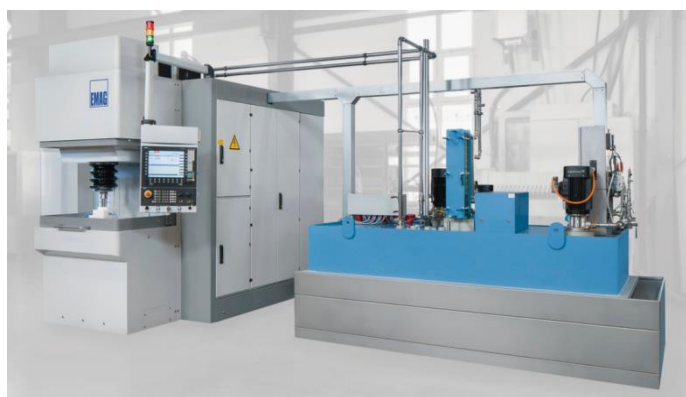


Рис. 35. Внешний вид станка ECM для снятия заусенцев методами ЭХО модели PTS 2500 [22]

Технические характеристики станка представлены в табл. 15.

Таблица 15

Технические характеристики станка ЕСМ для снятия заусенцев методами ЭХО модели PTS 2500

Габариты зажимаемых деталей, мм	800x550x515
Рабочая зона обработки, мм	1070x700
Габариты установки, мм	2100x3200x2900
Генераторы импульса мощностью, А	до 12000
Продолжительность импульса, мкс	50
Адаптивная система подготовки электролита	Имеется

Контрольные вопросы

1. В чем физическая сущность процесса анодно-механической обработки?
2. Укажите основные преимущества анодно-механической обработки.
3. Укажите основные недостатки анодно-механической обработки.
4. Какие электролиты применяются при анодно-механической обработке?
5. Какими явлениями обусловлен съем материала при анодно-механической обработке?
6. На какие группы подразделяется анодно-механическая обработка в зависимости от вида используемого инструмента?

Глава 3. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

3.1. ЛУЧЕВЫЕ ВИДЫ ОБРАБОТКИ

3.1.1. Светолучевая (лазерная) обработка

Лазер или оптический квантовый генератор (ОКГ) является источником получения световых лучей, характеризующихся высокой плотностью энергии и когерентностью, т.е. параллельностью испускаемых лучей. Лазерное излучение можно получать как в импульсном, так и непрерывном режиме. Существует три вида лазеров: твердотельные, газообразные и жидкостные. Для технологических целей используют лазеры на твердом теле и жидкостные. Каждый атом или молекула (частица) вещества может обладать различным, но вполне определенным значением энергии и находиться на ряде вполне определенных дискретных энергетических уровней. Если частица изменяет свое энергетическое состояние, то она переходит с одного уровня на другой. Для перехода на более высокий энергетический уровень частица должна поглотить квант света – фотон. При переходе на нижний энергетический уровень происходит испускание порции энергии или фотонов. Частота поглощаемого или излучаемого света определяется физическими константами активного вещества лазера. Широко используется кристаллический лазер на основе синтетического рубина в форме стержня, служащего резонатором, в котором возникает и формируется луч, испускаемый лазером.

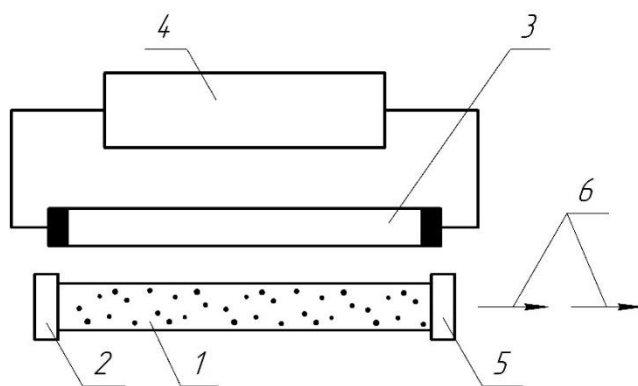


Рис. 36. Схема кристаллического лазера

На рис. 36 изображена простейшая схема кристаллического лазера.

Рубиновый стержень 1 оснащается импульсной лампой 3, наполненной ксеноном и вспыхивающей при импульсном разряде конденсатора источника

питания 4 (источника энергии накачки). По торцам стержня установлены

непрозрачная 2 (с коэффициентом отражения равным 1) и полупрозрачная (с коэффициентом отражения 0,5) пластины 5. Световой луч 6, возникающий в результате возбуждения атомов, выходит наружу через пластину 5.

На рис. 37 показан процесс образования лазерного луча.

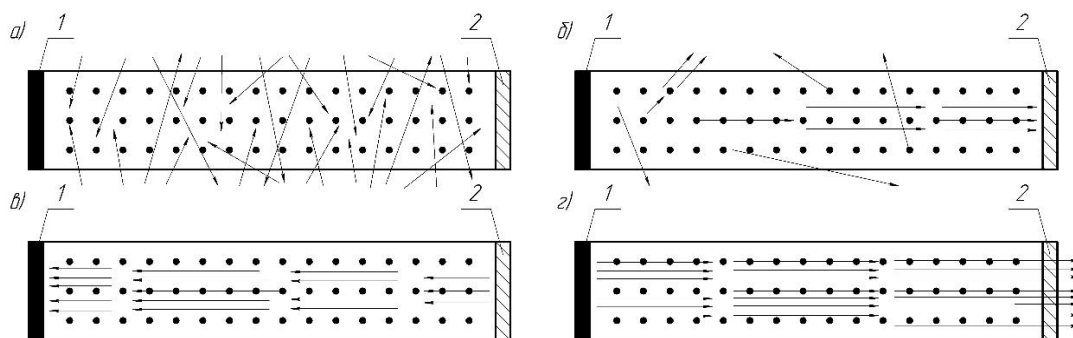


Рис. 37. Последовательный процесс образования лазерного луча

Атомы хрома (черные точки), содержащиеся в рубине, находятся в невозбужденном состоянии (рис. 37а). Под действием фотонов света от лампы атомы хрома переходят в возбужденное состояние. Часть излучаемой энергии рассеивается через стенки стержня и проявляется в форме люминесцентного свечения рубинового кристалла. Другая часть энергии, направленная параллельно оси стержня (рис. 37б), по пути своего движения вызывает цепную реакцию образования новых фотонов (рис. 37в). Фотоны, многократно отражаясь от пластин 1 и 2, лавинообразно нарастая при каждом отражении, в виде мощного светового луча вырывается из торца с полупрозрачным покрытием (рис. 37г).

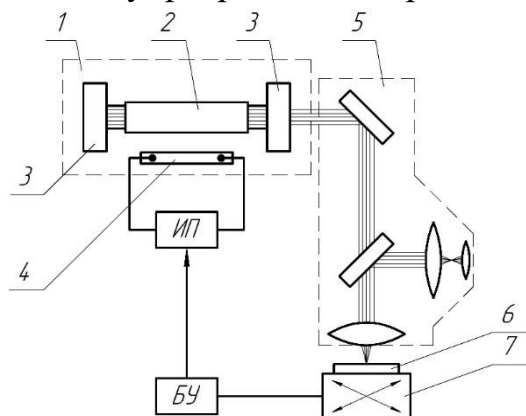


Рис. 38. Схема лазерной технологической установки

На рис. 38 изображена схема лазерной технологической установки.

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

ордатном столе 7; блок управления (БУ) который осуществляет навигацию координатного стола, и источник питания (ИП) лампы накачки. Рабо-

чим телом твердотельных лазеров служит рубин, представляющий собой кристалл корунда с примесью хрома, иттриево-алюминиевый гранат (ИАГ), являющийся также кристаллом корунда с примесью неодима, стекло с примесью неодима. Рабочими частицами являются примеси хрома или неодима. ОКГ на рубине и стекле работают в импульсном режиме, на ИАГ могут работать как в импульсном режиме, так и в непрерывном. Накачка ОКГ, работающих в импульсном режиме, осуществляется импульсными ксеноновыми лампами, которые питаются от батареи конденсаторов. Рабочее тело и лампу накачки помещают в отражателе с целью более полного и равномерного использования светового потока. При накачке не вся энергия, поглощенная рабочим телом, превращается в излучение. Значительная часть ее теряется на нагрев (для рубина около 50%). Для отвода тепла от рабочего тела в некоторых случаях предусматривают принудительное охлаждение воздухом, водой или жидким азотом. Рабочим телом газовых лазеров могут быть чистые газы: ксенон, криптон, гелий, азот или смеси газов, например, углекислого газа с азотом и гелием. Накачка осуществляется, как правило, электронами при прохождении электрического тока через газ. При столкновении электрона, движущегося с большой скоростью, с атомом или молекулой газа электрон передает энергию атому и переводит его на более высокий энергетический уровень [23].

Газовые лазеры могут работать как в импульсном режиме, так и в режиме непрерывного излучения. При взаимодействии с поверхностью среды лазерное излучение частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и переходит в тепло. Повышение температуры приводит к расплавлению материала, его испарению, вытеканию расплава из зоны облучения и образованию лунки. Этот процесс сопровождается изменением оптических и теплофизических свойств, тепловым расширением, а также фазовыми переходами. Высокие скорости нагревания (до 10^{10} °C/c) и охлаждения (до 10^8 °C/c) и большие градиенты температур могут приводить и к другим механизмам разрушения, например, к растрескиванию материала под влиянием термических напряжений, воспламенению и горению, термическому разложению материала. В ряде случаев эти факторы расширяют возможности лазерной обработки. Наибольшее применение в промышленности лазеры нашли при резке различных материалов, получении отверстий и сварке.

Лазерная резка обладает существенными преимуществами по сравнению с другими методами:

- ✓ обширным классом разрезаемых материалов;
- ✓ возможностью получать тонкие резы благодаря острой фокусировке лазерного луча;
- ✓ малой зоной термического влияния излучения;
- ✓ отсутствием механического контакта, что особенно важно при раскрое тонколистовых материалов;
- ✓ химической чистотой процесса резки;
- ✓ возможностью автоматизации процесса;
- ✓ возможностью резки по сложному контуру в двух и даже трех измерениях.

Лазерная резка происходит при относительном движении сфокусированного луча и обрабатываемой детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Резку производят, как правило, с поддувом газа в зону резания. Этот процесс получил название газолазерной резки. Газ выбирают в зависимости от обрабатываемого материала. При резке дерева, фанеры, бумаги, текстильных материалов, пластмасс в зону резания подается воздух или инертный газ. Газ охлаждает края реза и препятствует воспламенению материала, расширению реза, выдувает из зоны воздействия луча расплавленный материал и очищает зону резания. Это позволяет получать обработанные поверхности реза с малой шероховатостью и высокой точностью.

При резке металла в зону нагрева подается кислород. В результате экзотермической реакции окисления металла выделяется дополнительное тепло, что позволяет существенно повысить скорость резки. Ширина реза при обработке многих марок сталей толщиной 4 мм составляет от 0,8 до 1 мм на входе и от 2 до 4 мм на выходе. Скорость разрезания тонколистовой стали достигает 10 м/мин. Резка тонкостенного трубчатого стекла при изготовлении электровакуумных приборов производится при вращении заготовки. При этом на поверхности трубки создается узкий кольцевой источник тепла, вызывающий в стекле большие температурные градиенты и термоупругие напряжения, приводящие к образованию кольцевой трещины и сколу. В зависимости от скорости роста термических напряжений высота микронеровностей R_z поверхности раздела может составлять от 40 до 0,2 мкм.

Лазеры непрерывного излучения небольшой мощности применяются для нарезки резисторов путем удаления резистивного слоя в нужных местах с керамической подложки. Для этого излучение фокусируется на по-

верхности заготовки, которая вращается вокруг продольной оси и одновременно перемещается вдоль нее. Нарезка резисторов с помощью лазера позволяет уменьшить их габариты и совместить нарезку с контролем, прекращая практически мгновенно процесс при достижении заданного номинала. Скорость нарезки достигает 12 м/мин. Простота управления лучом в сочетании с современными средствами программного управления позволяют получитьрезы сложных конфигураций и делает лазерную резку весьма перспективной.

3.1.2. Оборудование для лазерной резки

На текущем этапе технологического развития существует весьма широкий выбор доступного для данного вида обработки оборудования. Фирмы-производители постоянно совершенствуют своё оборудование, добавляя новые возможности и улучшая старые характеристики. Таким образом, происходит постоянный процесс повышения качества конечного изделия, за счёт чего растут и требования заказчиков.

Ярким примером широкого ассортимента доступного оборудования является линейка лазерных станков для резки от компании «Bodor». Данная швейцарская компания специализируется на сборке и реализации лазерных станков под широкий спектр задач и технологических процессов.

В зависимости от требуемых условий компания может предложить станки для резки открытого типа (рис. 39), закрытого типа (рис. 40), станки для обработки валов и труб (рис. 41), а также множество других, специализированных решений в том числе мобильных и компактных устройств.

Лазерный станок открытого типа серии А оснащён оптоволоконным лазером с фиксированной рабочей поверхностью. Станина станка цельносварная фрезерованная. Станок способен обрабатывать углеродистые стали до 20 мм, медные сплавы до 6 мм, легированные стали до 10 мм, а также алюминий до 10 мм.

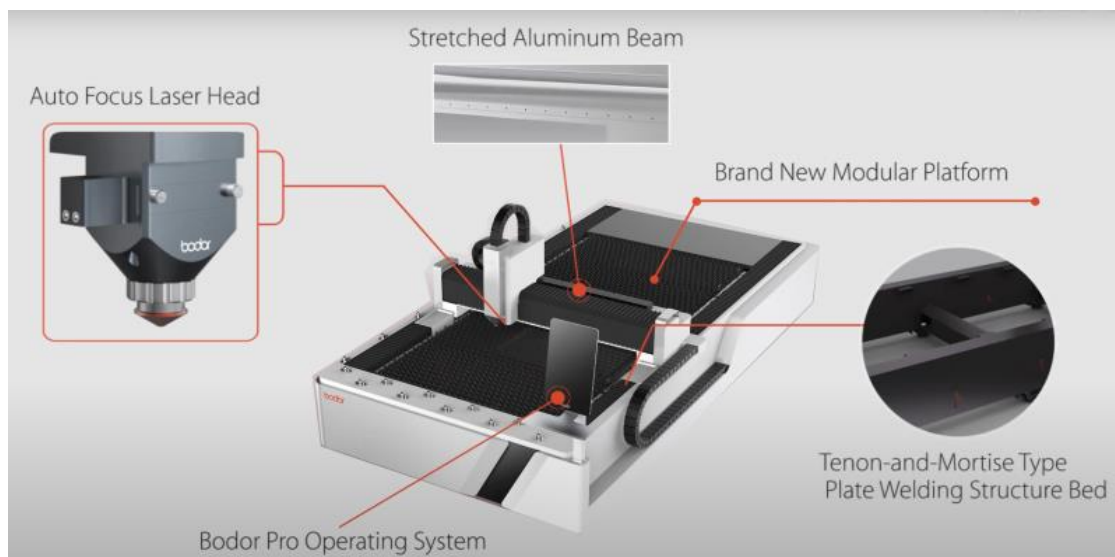


Рис. 39. Схема станка открытого типа серии А [24]

Станок серии А обладает техническими характеристиками, представленными в табл. 16.

Таблица 16

Технические характеристики станка серии А

Рабочая область, мм	6100x2500
Мощность лазера, Вт	3000
Точность позиционирования, мм	0,05
Максимальная скорость, м/мин	100

Станок закрытого типа серии С обладает защитной кабиной. Обусловлено это высокой мощностью оснащённого лазера – до 40 000 Вт. Кроме того, станок обладает двумя сменными столами разной размерности, что позволяет обрабатывать широкий спектр деталей.



Рис. 40. Внешний вид станка закрытого типа серии С

Станок серии С обладает техническими характеристиками, представленными в табл. 17.

Таблица 17

Технические характеристики станка серии С

Рабочая область, мм	12500x2600
Мощность лазера, Вт	1500÷40000
Точность позиционирования, мм	0,05
Максимальная скорость, м/мин	110

Станок серии К предназначен для резки цилиндрических объектов до 6,5 м. Возможен зажим объектов до 360 мм в диаметре для круглого сечения и до 254 мм квадратного.



Рис. 41. Станок для обработки валов серии К

Станок серии К обладает техническими характеристиками, представленными в табл. 18.

Таблица 18

Технические характеристики станка серии К

Рабочая область, мм	8649x1398x1811
Мощность лазера, Вт	1000÷3000
Точность позиционирования, мм	0,02
Максимальная скорость, м/мин	60

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

Форма образующегося отверстия зависит от расфокусировки лазерного луча и положения фокуса относительно обрабатываемой поверхности.

При сверлении отверстий в деталях малой толщины обычно используют одиночные импульсы большой энергии. Глубокие отверстия получают при использовании серии импульсов малой энергии ($0,1 \div 0,3$ Дж). В этом случае получают отверстия с меньшей конусностью и лучшего качества, точность при этом достигает $1 \div 5\%$ от диаметра. Освоено сверление отверстий диаметром $0,003 \div 1$ мм при отношении глубины к диаметру до 10. Производительность сверления $60 \div 240$ отверстий в минуту. Для повышения производительности и качества обработки применяют поддув кислородом, воздухом или инертным газом. Применение лазерного сверления позволило решить важные технологические задачи. Так, в отечественной промышленности полностью переведена на лазерную технологию обработка часовых камней. Решена проблема чернового профилирования алмазных волокон с последующей доводкой ультразвуковым методом. Бесконтактное удаление материала позволяет производить термодинамическую балансировку гироскопов.

3.1.3. Оборудование для проведения операции лазерного сверления

Для операций лазерного сверления редко используют однооперационные станки. При необходимости осуществления подобных операций используют комбинированные станки для лазерной обработки.

Одним из таких станков является оборудование компании «Лазеры и аппаратура» модели «МикроЛаб МЛП1-210б». Данный станок рассчитан на проведение операций резки, скрайбирования и сверления в поликоре, керамике и кристаллах. Станок показан на рис. 42.



Рис. 42. Внешний вид станка для лазерной обработки модели МикроЛаб МЛП1-2106 [25]

Станок модели МЛП1-2106 обладает техническими характеристиками, представленными в табл. 19.

Таблица 19

Технические характеристики станка модели МЛП1-2106

Рабочий ход, мм	200x200x100
Точность позиционирования, мкм	3
Длина волны излучения, мкм	10,6
Выходная мощность основного излучения, Вт	до 600
Минимальный диаметр сфокусированного пятна в зоне обработки, мкм	50

Лазерная сварка может быть точечной и шовной, встык, внахлест и т.д. Производительность точечной сварки около 60 операций в минуту, шовной – в зависимости от материала от 0,5 до 4 м/мин при глубине проплавления в несколько миллиметров. Детали свариваются при меньших плотностях мощности, так как при сварке необходимы только разогрев и плавление материала, без его испарения. Лазерное излучение позволяет сваривать материалы в вакуумной камере или в камере с атмосферой инертного газа, что исключает окисление сварного шва. При сварке материалов с большим коэффициентом отражения их покрывают тонкой пленкой хорошо поглощающего излучение материала, например графита.

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

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

3.1.4. Оборудование для лазерной сварки

Лазерная сварка как высокоэффективная альтернатива обычной электродной сварке нашла своё широкое распространение в тех отраслях, где необходима была высокая точность и обработка тугоплавких изделий. Так, под нужды промышленности было выведено особое оборудование, с помощью которого возможно было бы производить обработку лазерной сваркой.

Оборудование для лазерной сварки зачастую комбинируется с таким процессом как лазерная наплавка, который в той же мере используется для восстановления деталей и их исходного состояния. Например, у компании «Лазерные технологии и компоненты» существуют готовые решения для проведения операций лазерной сварки. Модельный ряд станков для лазерной сварки «МУЛ» состоит из установок, как мобильных, так и стационарных.



Рис. 43. Внешний вид станка для лазерной сварки модели МУЛ-3D [26]

На рис. 43 изображен станок модели «МУЛ-3D», на данный момент самая последняя модель в серии, которая оснащена интегрированной системой позиционирования лазерной головки.

Станок отличается компактностью и производительностью, стоящими в одном ряду с точностью позиционирования. С помощью данного оборудования возможно проводить вос-

становительные работы изделий, создания сварных соединений, швов. Благодаря высокой точности позиционирования возможна обработка и создание сложной геометрии изделий.

Станок модели МУЛ-3D обладает техническими характеристиками, представленными в табл. 20.

Таблица 20

Технические характеристики станка модели МУЛ-3D

Максимальная импульсная мощность, кВт	8
Максимальная мощность излучения, Вт	150
Длительность импульса, мкс	0,2÷20
Тип используемого волокна, мкм	кварц, 600÷800

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

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

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

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

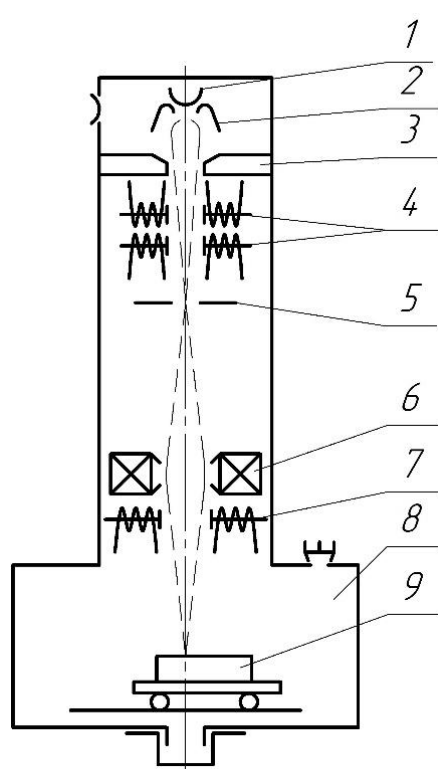


Рис. 44. Простейшая схема электронно-лучевой установки

Установки для обработки материалов сфокусированным пучком электронов состоят из трех основных устройств: электронной пушки, фокусирующей системы и рабочей камеры.

На рис. 44 изображена схема установки для электроннолучевой обработки.

Источником электронного луча является катод 1, представляющий вольфрамовую спираль, нагреваемую до температуры $2600 \div 2800$ °С. При этом происходит интенсивная термоэлектронная эмиссия с катода. Электроны, эмитируемые катодом электронной пушки, формируются в пучок электродом 2, который расположен непосредственно за катодом. На электрод 2 подается отрицательное (относительно катода) напряжение смещения и электроны ускоряются под действием разности потенциалов между катодом и

анодом 3. Затем с помощью воздействующих электрод 2 магнитных полей двух пар катушек 4 пучок электронов направляется в электронно-оптический центр магнитной фокусирующей системы 6. Между магнитными системами (4 и 6) установлена вольфрамовая диафрагма 5 с водяным охлаждением. Эта диафрагма служит для улавливания рассеянных электронов. Фокусное расстояние магнитной линзы 6 может изменяться при изменении тока, пропускаемого через обмотку, что используется для установки, как рабочего режима (рабочей точки), так и необходимого поперечного сечения луча в месте встречи его с поверхностью обрабатываемой заготовки 9. Ниже фокусирующей системы расположены отклоняющие катушки 7, служащие для автоматического перемещения луча по заданному направлению. Заготовка помещается в рабочую камеру 8, в которой создают разрежение [27].

Благодаря кратковременности действия электронных лучей и большой плотности потока излучения обрабатываемый материал плавится и испаряется столь быстро, что тепло не успевает распространиться в стороны от места падения луча (практически зона плавления не больше поперечного сечения луча в месте попадания его на заготовку). В направлении излучения луч электронов действует на значительно превышающую глубину, равную примерно 100 диаметрам луча.

Таким образом, электронным лучом можно резать материалы без образования дефектного слоя, практически без отходов и с высокой производительностью. Электронным лучом обрабатывают детали из вольфрама, титана, твердых сплавов, синтетических камней, осуществляется сварка и пайка. Ввиду малого диаметра пучка электронных лучей, локальности действия создаваемого ими тепла и отсутствия влияния износа инструмента можно получить при обработке высокую точность размеров и малую шероховатость поверхности.

Пучки электронов диаметром 5 мкм позволяют производить прецизионную обработку с точностью ± 1 мкм. Пучком электронов на доводочных режимах можно получать поверхности с высотой микронеровностей до 1 мкм. Пучком электронов легко управлять, воздействуя на отклоняющие катушки 4. Резку по контуру можно осуществлять, используя механические перемещения стола с обрабатываемой заготовкой.

Недостатки электронно-лучевой обработки:

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

3.1.5. Оборудование для электронно-лучевой обработки

Для проведения операций сварки, резки и плавки электронно-лучевым методом используются специализированные станки, оснащённые электронно-лучевой пушкой.

Примером такого оборудования является станок модели Focus MEBW-60 фирмы UED. На данном станке возможно осуществлять операции по сварке, сверлению, наплавке, легированию и микрогравировки поверхностей.

Внешний вид станка изображён на рис. 45. Технические характеристики станка представлены в табл. 21.

Таблица 21

Технические характеристики станка модели Focus МЕВW-60

Максимальная мощность пучка, кВт	2
Максимальный ток пучка, мА: – при 60 кВ; – при 50 кВ	33 40
Диаметр пучка, мкм	до 25
Максимальный угол отклонения пучка, °	±35



Рис. 45. Внешний вид установки для проведения электронно-лучевой сварки модели Focus МЕВW-60 [28]

Контрольные вопросы

1. Что такое «ЛАЗЕР»?
2. Перечислите основные виды лазеров.
3. Что служит рабочим телом в твердотельных лазерах?
4. Что служит рабочим телом в газовых лазерах?
5. Перечислите основные технологические операции, выполняемые с применением лазеров.
6. Укажите основные преимущества лазерной резки материалов.

3.2. ПЛАЗМЕННЫЕ ВИДЫ ОБРАБОТКИ

Плазму чаще всего получают при осуществлении электрофизических процессов: в электрическом дуговом разряде, высокочастотном электрическом поле, с помощью энергий лазерного излучения и т. д. Физические свойства плазмы и прежде всего высокие значения температуры, энтальпии и электропроводности привлекают к ней внимание как к уникальному явлению, позволяющему осуществлять ряд интересных физических и технических проектов.

Технологическое применение плазма нашла, прежде всего, в процессах, требующих высокотемпературного концентрированного нагрева (металлургия, сварочные процессы). В промышленности широко используется плазменная резка различных металлов и неметаллических материалов, плазменное нанесение покрытий из тугоплавких металлов оксидов, карбидов и нитридов. Как правило, для технологических целей используют так называемую «низкотемпературную» плазму с температурой $10^3 \div 10^5 \text{K}$, представляющую собой частично ионизированный газ.

3.2.1. Технологические возможности плазменной обработки

Плазмообразующий газ, используемый в плазмотроне, в значительной мере определяет технологические возможности плазменной струи, и его нужно выбирать в зависимости от цели процесса.

Например, плазменная резка фигурных заготовок из листа толщиной $40 \div 60$ мм из алюминиевого сплава ведется со скоростью $0,4 \div 2,0$ м/мин и дает повышение производительности по сравнению с механическими способами резки в $10 \div 30$ раз.

Для получения плазмы, используемой в технологических целях, разработан целый ряд специальных устройств (рис. 46), называемых плазмотронами или плазменными горелками. Наиболее распространены плазмотроны, в которых нагрев газа до необходимой температуры осуществляется электрическим дуговым разрядом. В последнее время начинают применяться также высокочастотные плазмотроны с так называемым «безэлектродным разрядом».

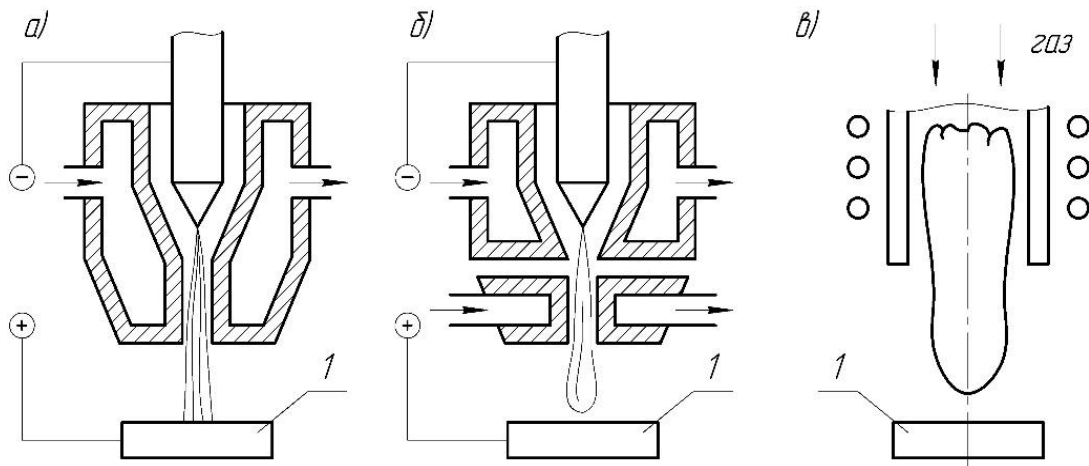


Рис. 46. Схемы плазмотронов

В связи с этим в практике плазменной технологии сложилось три основных принципиальных схемы плазмотронов. В двух схемах (а, б) для получения плазмы используется электрический дуговой разряд; в схеме, (в), нагрев газа и образование плазмы осуществляются за счет безэлектродного высокочастотного индукционного разряда.

Принципиально того же результата можно достигнуть и при сжигании горючих смесей в обычных горелках за счет энергии химических реакций, но эффективность таких устройств значительно ниже.

В дуговых плазмотронах плазма с требуемыми характеристиками может быть получена при различных видах взаимодействия дуги с плазмообразующим газом. Плазмообразующие газы также могут быть различными.

Стабилизация дуги в плазмотроне может осуществляться аксиальным потоком газа 1, создающим слой 2, ограничивающий столб дугового разряда (рис. 47а).

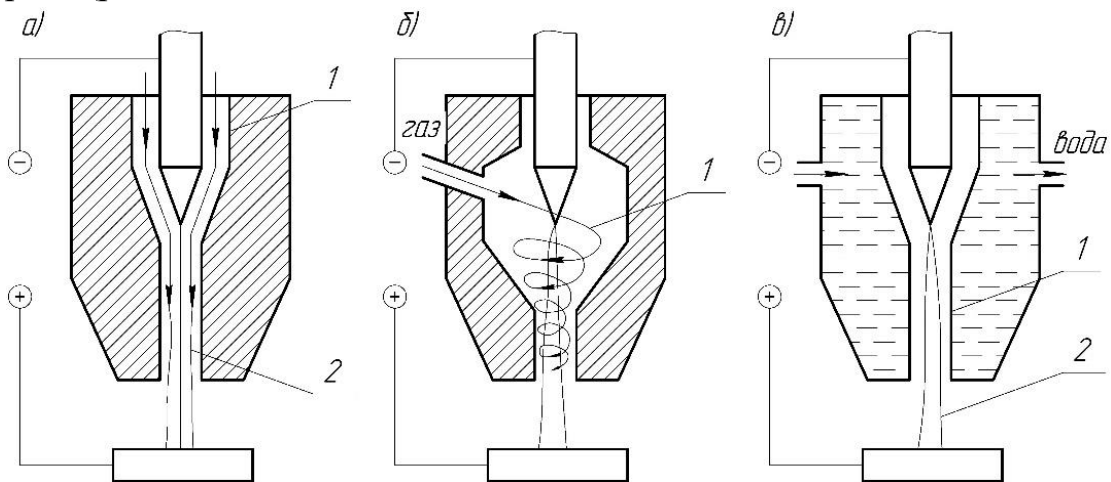


Рис. 47. Схемы стабилизации дуги в плазмотроне

При тангенциальной подаче газа в дуговую камеру плазмотрона стабилизация достигается за счет вихревого потока 1 плазмообразующего газа (рис. 47б).

Весьма эффективным способом стабилизации дугового разряда в плазмотроне и повышения его удельных энергетических характеристик является ограничение диаметра столба дугового разряда охлаждаемой стенкой. Обычно эта стенка выполняется в виде медного водоохлаждаемого сопла 1 сравнительно небольшого диаметра, ограничивающего наружный диаметр дуги 2 (рис. 47в). В реальных условиях в плазмотроне может применяться сразу несколько способов стабилизации столба дугового разряда.

Известны комбинированные схемы включения изделия в цепь плазмотрона (плазменная струя и токоведущее изделие) и комбинированные способы передачи энергии плазмообразующему газу (химическая энергия сгорания топлива и электрическая энергия дугового или высокочастотного разряда).

3.2.2. Технологические схемы плазменной обработки

Плазменный нагрев. Нагрев деталей и материалов до невысоких температур (ниже точки их плавления) с помощью плазменных горелок используется сравнительно редко, однако в последнее время все чаще применяется плазменно-механическая обработка металлов, где осуществляется такой нагрев. Сущность метода состоит в том, что при обработке, например, резанием высокопрочных металлов и сплавов перед резцом устанавливается плазмотрон, нагревающий; узкую зону обрабатываемого материала. Так как при нагреве прочность обрабатываемого материала снижается, а пластичность повышается, можно без ущерба для качества поверхности увеличить подачу и глубину резания. Плазменно-механическая обработка применяется при изготовлении деталей из жаропрочных сталей, сплавов на основе вольфрама и молибдена и других материалов, в которых при механической обработке при обычной температуре в поверхностных слоях образуются микротрещины (рис. 48).

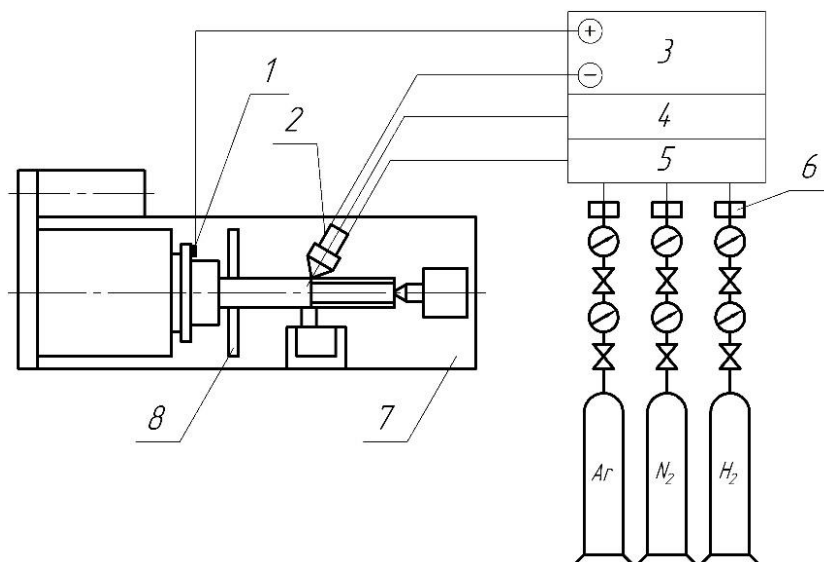


Рис. 48. Установка для плазменно-механической обработки

Установка для такой обработки монтируется на базе универсального токарного станка 7. На ней используются плазменные горелки 2 мощностью до 50 кВт при диаметре сопла 3 мм. Такие горелки дают возможность получить плотности мощности до 7 ГВт/м². Смесь аргона, азота и водорода (75 % Ar₂, 20 % N₂, 5 % H₂) подается в горелку через систему 5 подачи рабочего газа, систему клапанов, манометров и расходомеры 6. Дуга зажигается от высокочастотного устройства зажигания. Вначале зажигается вспомогательная дуга между катодом и включенным для этого в цепь в виде анода соплом горелки (используется открытая горелка). При подводе горелки к обрабатываемой поверхности загорается главная дуга подачей более высокого потенциала. Ток от источника питания 3 подводится к обрабатываемой заготовке при помощи скользящего контакта 1, расположенного на патроне токарного станка. Установка имеет систему охлаждения 4 горелки и теплоизоляцию 8 для защиты станка. Обработка резанием в условиях предварительного нагрева плазменной струей осуществляется твердосплавными или минералокерамическими резцами.

Плазменная горелка позволяет нагревать узкую зону заготовки, причем нагрев не вызывает окисления поверхности, и скорость нагрева до требуемой температуры может регулироваться в широких пределах, позволяющих сочетать режим работы плазмотрона с режимами резания.

Плазменную струю для предварительного подогрева используют также, обрабатывая коррозионно-кислотостойкую и жаропрочную стали, кобальтовые и никелевые сплавы. Установлено, что с повышением температуры нагрева силы резания значительно снижаются. При $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ они

на всех подачах уменьшаются в среднем на 24 % по сравнению с обработкой при нормальной температуре, а при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в среднем на 45 % . Результаты измерения сил резания в интервале скоростей резания $v = 25\div 100$ м/мин показали, что при повышенных температурах обрабатываемой поверхности скорость резания на силу резания не влияет. Исследования показали также, что с повышением температуры подогрева до $T = 630\text{ }^{\circ}\text{C}$ может до 45 % увеличиться объем материала, снимаемый в единицу времени (из-за увеличения скорости резания, подачи и глубины резания). Применение плазменного нагрева при обточке цилиндрических заготовок диаметром $100\div 350$ мм из жаропрочных никелевых сплавов, вольфрама и молибдена показало, что производительность обработки увеличивается в $6\div 8$ раз при уменьшении износа резцов в $5\div 6$ раз. Скорость съема металла при этом может достигать $3\div 4$ кг/мин.

Плазменный нагрев до более высоких температур может приводить к оплавлению шероховатостей механически обработанной поверхности, улучшая тем самым технологические показатели.

Плавление вещества. Плавка металлов и сплавов, а также неметаллических материалов с использованием плазменного нагрева получила широкое распространение.

Данный способ отличается высокой стабильностью, простотой и гибкостью технологического процесса. Плазменная плавка позволяет использовать самые различные среды и исходные материалы при минимальных потерях легирующих компонентов. Наиболее распространена схема печи для плавки в водоохлаждаемый кристаллизатор (рис. 49).

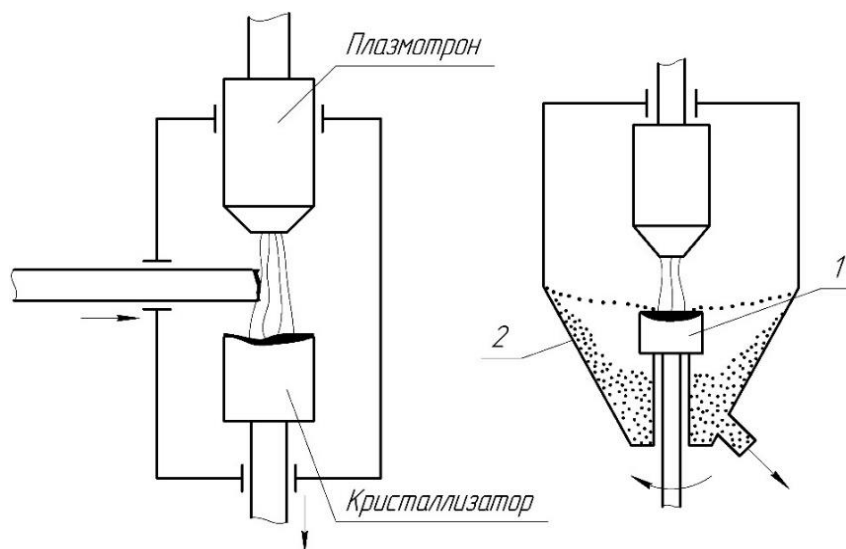


Рис. 49. Процесс плазменного плавления

В таких печах обычно выплавляют сложнелегированные сплавы, например, инструментальные стали. При этом благодаря небольшому содержанию в металле неметаллических включений в виде оксидов и кислорода его механические свойства (особенно пластичность) заметно повышаются. Плазменный нагрев используется также для плавки металла с последующим измельчением расплава и кристаллизацией его в виде маломерных капель. В дальнейшем этот материал применяют как исходный продукт порошковой металлургии, для наплавки и т. д. Измельчение металла чаще всего получают разбрызгиванием расплавленного металла при вращении тигля 1. Попадая на холодные стенки кристаллизатора 2, капли жидкого металла затвердевают и в виде гранул собираются на дне камеры, причем большая скорость охлаждения расплавленного металла позволяет получать неравновесные структуры со специфическими свойствами.

Сварка и наплавка. Сварка с использованием плазменных источников энергии применяется все шире, так как по сравнению с обычной свободно горячей электрической дугой удается получить большую глубину проплавления и меньшую ширину шва и соответственно более узкую зону термического влияния. Процесс идет с большей скоростью при улучшении качества сварного шва.

Плазменной сваркой за один проход сваривают детали толщиной до 20 мм, что дает возможность существенно повысить производительность процесса, уменьшить возникающие при сварке деформации и получить в конечном счете более работоспособное сварное соединение.

Микроплазменная сварка является разновидностью процесса плазменной сварки и характеризуется силой тока плазмы порядка $0,1 \div 10$ А. Толщина свариваемых заготовок обычно составляет $0,025 \div 1,0$ мм. Микроплазменную сварку применяют тогда, когда другими методами невозможно получить сварное соединение, например, тонколистовых материалов (фольга, сальфонно-мембранные узлы) или деталей радиоэлектронной техники.

3.2.3. Оборудование для плазменной сварки

Оборудование для проведения операции плазменной сварки можно условно разделить на мобильные и стационарные комплексы. К мобильным комплексам относятся такие установки, которые способны обрабатывать детали в труднодоступных местах или в случаях, когда необходим

выезд команды специалистов на объект заказчика. К стационарным установкам следует относить крупногабаритные комплексы, направленные на обработку большой партии заготовок крупных и средних размеров.

Примером мобильного оборудования может послужить универсальный аппарат плазменной сварки PMI фирмы SBI. Модель PMI 500TL (рис/50) является на данный момент флагманской мобильной установкой всей линейки PMI.



Рис. 50. Внешний вид аппарата плазменной сварки модели PMI 500TL [29]

Установка позволяет осуществлять операции плазменной точечной сварки, импульсной точечной сварки, аргодуговой и ручной сварки при постоянном токе. Технические характеристики аппарата плазменной сварки модели PMI 500TL представлены в табл. 22.

Таблица 22

Технические характеристики аппарата плазменной сварки модели PMI 500TL

Максимальное потребление мощности, кВт	20
Максимальный импульсный ток, А	500
Сварочный ток, А	380
Плазмообразующий газ	Ar
Защитный газ	Ar + He Ar + H
Диапазон установки сварочного тока при плазменной дуговой сварке, А	5÷500

Плазменная наплавка используется для нанесения на обрабатываемые заготовки поверхностных слоев (чаще всего из металлов или сплавов,

отличных по составу от материала подложки) с целью повышения эксплуатационных свойств деталей. Для наплавки обычно применяют материалы со специальными свойствами (высокой твердостью, повышенной износостойкостью, коррозионной и термостойкостью). Наплавка позволяет получать изделия из дешевых конструкционных материалов с рациональным распределением свойств по отдельным элементам. При этом значительно снижается расход дорогостоящих легирующих материалов. Толщина наплавленных за один проход слоев может достигать $4\div 5$ мм; возможна многослойная наплавка.

Наплавку проводят плазменными горелками косвенного действия (плазменной струей), что дает возможность регулировать глубину проплавления основного металла посредством изменения расстояния между горелкой и заготовкой. Чтобы обеспечить защиту ванны расплавленного металла от взаимодействия с атмосферными газами, в качестве плазмообразующих газов используют аргон и водород.

В станкоинструментальной промышленности наплавкой упрочняют отдельные детали станков. Использование наплавки позволяет экономить дефицитные и дорогостоящие инструментальные стали, например P18, P6M5, изготавливая инструменты из обычных углеродистых сталей с наплавкой рабочих лезвий. Масса наплавленной инструментальной стали обычно не превышает $4\div 5\%$ от общей массы инструмента, а стойкость инструмента повышается благодаря лучшим условиям теплоотвода от режущей кромки.

Плазменную наплавку применяют для нанесения на стальные подложки меди, бронзы, сплавов типа «стеллит» (запорная арматура паропроводов), хромоникелевых сплавов (клапаны двигателей внутреннего сгорания).

С помощью плазменной наплавки в ремонтных целях восстанавливают дорогостоящие узлы и детали (штампы, пресс-формы, валки и т. д.) металлообрабатывающего оборудования.

3.2.4. Оборудование для плазменной наплавки

Для осуществления плазменной наплавки подойдет техническое решение чешской компании KSK. Установка плазменно-порошковой наплавки модели PPC 250 GMR предназначена для проведения операции

наплавки на кольцах, клапанах, сёдлах запорной арматуры и стеклоформ. Модель является достаточно мобильной, также присутствует возможность установки кабинетной защиты оператора (рис. 51).



Рис. 51. Внешний вид установки плазменно-порошковой наплавки модели PPC 250 GMR [30]

Установка плазменно-порошковой наплавки модели PPC 250 GMR включает следующие составные модули:

- ✓ Систему позиционирования горелки;
- ✓ Позиционер;
- ✓ Шкаф управления;
- ✓ Источник плазмы;
- ✓ Блок охлаждения горелки;
- ✓ Систему подачи порошка;
- ✓ Плазменную горелку.

Технические характеристики установки представлены в табл. 23.

Таблица 23

Технические характеристики установки PPC 250 GMR

Максимальный диаметр деталей, мм	800
Потребляемая мощность, кВА	29
Размеры установки, мм	3500x2150x2860
Охлаждение плазмотронов	замкнутое, водой
Плазмообразующий газ	аргон
Фракционный состав порошков, мкм	50÷200

Плазменное напыление. Напыление отличается от наплавки тем, что напыляемый материал нагревается в плазмотроне и затем осаждается на подложку. При этом температура подложки при необходимости может меняться в широком диапазоне.

Существует две основные разновидности процесса (рис. 52):

а) напыление металла, подаваемого в плазмотрон в виде прутка или проволоки;

б) напыление материала, подаваемого в плазмотрон в виде порошка (оксиды, нитриды, карбиды и т. д.).

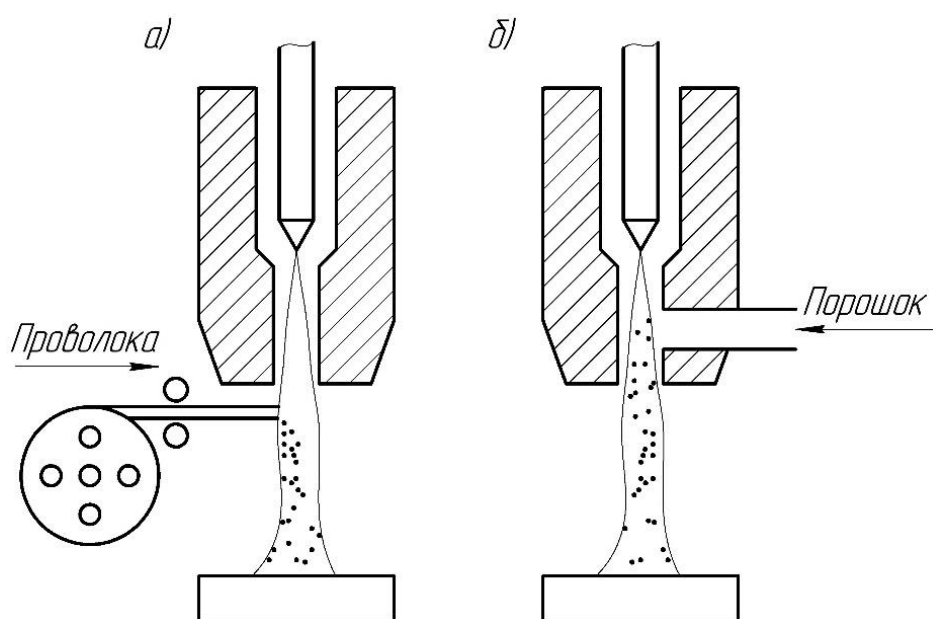


Рис. 52. Схема процесса плазменного напыления

Плазменным напылением обычно получают слои малой толщины (10^{-6} – 10^{-3} м), причем прочность сцепления напыленного материала с основным может быть различной. Можно даже получать так называемые корковые изделия, состоящие только из напыленного материала. Прочность сцепления покрытия с подложкой зависит как от механического сцепления напыляемых частиц с подложкой, так и от характера химического взаимодействия напыляемого материала с основным. Для увеличения прочности сцепления обычно стремятся повысить степень химического взаимодействия покрытия с подложкой, чего обычно достигают предварительным подогревом заготовки и созданием промежуточных химически активных слоев.

3.2.5. Оборудование для плазменного напыления

Примером оборудования для осуществления процесса плазменного напыления является установка плазменного напыления модели Met-PCC (PLAS) фирмы Metallisation [31] (рис. 53).



Рис. 53. Внешний вид установки плазменного напыления модели Met-PCC (PLAS)

Данная система позволяет использовать пистолеты мощностью до 50 кВ как с единственным источником питания, так и с добавлением энергетической ёмкости до 80 кВ. С фронтальной стороны устройства находится интуитивный графический пользовательский интерфейс, включающий интеграцию видео и фото элементов. Система обладает сенсорным дисплеем на базе ОС Windows. Кроме того, система оснащена PLC адаптером, который позволяет взаимодействовать с другими системами внутри одной сети.

Технические характеристики установки представлены в табл. 24.

Таблица 24

Технические характеристики установки модели Met-PCC(PLAS)

Рабочий газ	Ar
Максимальная впускная температура охлаждения дула распылителя, °С	16
Максимальное электропотребление, В	480
Вес, кг	100

Контрольные вопросы

1. В чем физическая сущность процесса плазменной обработки?
2. Дайте определение термина «степень ионизации плазмы».
3. Укажите основные технологические возможности плазменной обработки.
4. Приведите схемы стабилизации дуги в плазмотроне.
5. Дайте технологическую характеристику процессу плазменной сварки.
6. Укажите технологические особенности плазменного напыления.

3.3. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

Под ультразвуковой обработкой понимают обработку, в которой материал удаляется инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой. Обработка может происходить при частотах как ультразвукового, так и звукового диапазона. Однако, оптимальные режимы обеспечиваются при $16 \div 25$ кГц (нижняя граница ультразвукового диапазона). Поэтому метод и называют ультразвуковым.

Развивается метод в двух направлениях:

- 1) размерная ультразвуковая обработка материалов в среде абразивной суспензии;
- 2) наложение ультразвуковых колебаний на режущий инструмент при обычной обработке резанием.

Ультразвуковым методом успешно изготавливают детали из твердых и хрупких труднообрабатываемых материалов.

Причем, в отличие от предыдущих методов (электроэрозионных, электрохимических), его можно использовать как для токопроводящих, так и для изолирующих (не проводящих ток) материалов.

Механизм ультразвуковой размерной обработки. Под размерной ультразвуковой обработкой понимают управляемое разрушение обрабатываемого материала в результате импульсного ударного воздействия инструмента на материал в абразивной среде (рис. 54).

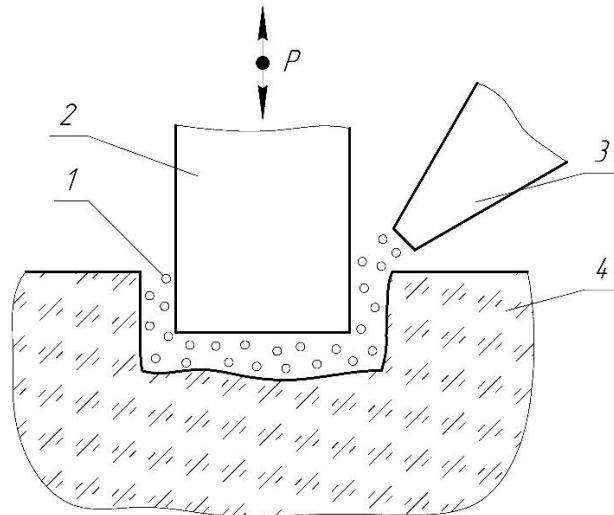


Рис. 54. Схема процесса ультразвуковой обработки

Механические колебания ультразвуковой частоты ($f = 16 \div 30$ кГц) и небольшой амплитуды ($A = 0,01 \div 0,06$ мм) сообщаются рабочему инструменту 2. В рабочую зону, т. е. в зазор между торцом инструмента и заготовкой 4, подается абразивная суспензия 3 – взвесь зерен 1 абразива в воде. Зерна абразива под действием ударов вибрирующего инструмента постепенно производят обработку (выкалывают частицы материала). Размер выкалываемых частиц небольшой, однако, количество ударов и зерен абразива велико (до $20 \div 100$ тыс./см³), что приводит к сравнительно интенсивному съему материала. В результате в заготовке копируется форма рабочего инструмента. Ультразвуковая размерная обработка представляет собой сложный физико-химический процесс, включающий разрушение (скалывание) обрабатываемой поверхности в результате высоких контактных напряжений, абразивное (царапающее) действие зерен, разрушение (дробление) абразивных зерен, разрушение в результате смачивающего, вымывающего и химического действия жидкости, несущей абразив. Исследованиями установлено, что в основном материал снимается вследствие прямого удара торца инструмента по зернам абразива, лежащим на обрабатываемой поверхности. При этом и выкалываются частицы материала. Если же удар приходится по взвешенному в суспензии зерну, то, хотя такое зерно и приобретает определенный импульс движения, частицы материала не выкалываются. Большое значение в разрушении материала имеет кавитация – образование и захлопывание полостей в жидкости под воздействием ультразвуковых колебаний [32].

3.3.1. Технологические возможности ультразвуковой обработки

На основе анализа обрабатываемости ультразвуковым методом материалы делят на 3 группы. Материалы каждой из них различаются критериями хрупкости t_x .

Первая группа – хрупкие материалы ($t_x > 2$) типа стекла, кварца, керамики, алмаза, кремния, феррита и т. д. При ультразвуковой обработке эти материалы практически не подвергаются пластической деформации. Они начинают разрушаться после стадии малых деформаций, более или менее точно подчиняющихся закону Гука. Для материалов этой группы применять ультразвуковую размерную обработку наиболее эффективно.

Вторая группа – твердые сплавы, закаленные, цементированные и азотированные стали, титановые сплавы и другие, для которых $t_x \approx 1 \div 2$. При обработке этих материалов наряду с упругими происходят и микропластические деформации, что ухудшает обрабатываемость. Поэтому использовать ультразвуковой метод для обработки материалов этой группы не всегда целесообразно.

Третья группа – пластичные материалы типа свинца, мягких сталей и других, для которых $t_x \leq 1$ – При ультразвуковой обработке они практически не разрушаются, так как почти вся работа абразива расходуется на микропластическую деформацию. Поэтому для материалов третьей группы ультразвуковая размерная обработка нецелесообразна.

В ультразвуковой размерной обработке различают два движения:

1. главное (движение резания) – продольные колебания инструмента с ультразвуковой частотой, сообщаемые энергией абразивным зернам;
2. вспомогательное – движение подачи.

Скорость (v , м/с) главного движения рассчитывается по формуле:

$$v = 4fA/1000,$$

где f – частота колебаний, Гц; A – амплитуда колебаний, мм.

Качество обработанной поверхности зависит от размера зерна абразива, амплитуды колебаний инструмента, шероховатости поверхности инструмента и др.

Точность обработки. При ультразвуковой обработке отверстие разбивается, т. е. его поперечные размеры получаются несколько больше со-

ответствующих размеров инструмента. Величина разбивки зависит от зернистости абразива. Так, при использовании абразива № 10 разбивка отверстия достигает $0,4 \div 0,5$ мм, а при использовании мелкозернистого абразива (№ 3) снижается до $0,03 \div 0,06$ мм. Для повышения точности обработки поперечные размеры инструмента следует корректировать с учетом применяемого абразива. При черновой обработке абразивом № 8÷№ 12 корректировка составляет $0,2 \div 0,3$ мм, а при чистовой обработке абразивом № 3÷№ 40 – $0,08 \div 0,1$ мм.

В процессе ультразвуковой обработки возникает конусность отверстия. Наибольшее влияние на нее оказывает зернистость абразива. При обработке отверстий глубиной $5 \div 10$ мм абразивом № 12 конусность находится в пределах $0,025 \div 0,04$ мм, более мелким абразивом – до $0,01$ мм. Наиболее высокой точности обработки ($\pm 0,005$ мм) можно достичь, используя микропорошки.

Ультразвуковая размерная обработка имеет следующие преимущества:

- 1) возможность использовать для изготовления деталей токопроводящие и токонепроводящие материалы;
- 2) высокая точность обработки (до $0,01 \div 0,02$ мм) при высоком качестве обработанной поверхности ($R_a = 0,32 \div 0,16$);
- 3) нет нагрева детали в зоне обработки и дефектного слоя на обработанной поверхности;
- 4) сравнительно высокая производительность при обработке твердых и хрупких материалов.

К основным недостаткам ультразвуковой обработки нужно отнести следующие:

- 1) сложность проектирования и изготовления ультразвукового инструмента, связанная с необходимостью проводить акустический расчет;
- 2) непригодность этого метода для обработки вязких труднообрабатываемых материалов.

3.3.2. Оборудование для проведения ультразвуковой обработки

Существует возможность внедрения в станки с ЧПУ ультразвуковых инструментальных головок совместно с генератором ультразвуковых волн.



Рис. 55. Внешний вид ультразвуковой головки и генератора ультразвуковых волн фирмы Ascrow [33]

Примером такого оборудования является продукт тайваньской фирмы Ascrow (рис. 55).

Особенностями ультразвуковой головки является возможность использования высокочастотной вибрации до 24000 тактов в секунду. А генератор позволяет

автоматически поддерживать требуемую частоту, а также работать в достаточно прецизионных технологических системах.

Технические параметры головки представлены в табл. 25.

Таблица 25

Технические параметры ультразвуковой головки Ascrow

Длина головки, мм	135÷165
Максимальная частота колебаний, Гц	24 000
Амплитуда, мкм	210
Рекомендованная скорость вращения, об/мин	6000

Для осуществления процессов ультразвуковой сварки подойдет устройство от фирмы AltraSonic. Представленная китайская компания специализируется на ультразвуковом оборудовании различного профиля. В линейку оборудования, которое оно предоставляет входит и аппарат для ультразвуковой сварки узкого спектра материалов.

Внешний вид устройства изображен на рис. 56. Оно представляет собой компактный модуль с фиксированными выходными значениями мощности, частоты и площади свариваемой области.



Рис. 56. Внешний вид ультразвукового сварочного аппарата фирмы AltraSonic [34]

К возможностям оборудования относится сварка таких материалов как медь, алюминий, золото, серебро, никель. Возможна сварка тонких пластин, брусков, проводов, труб. Технические характеристики представлены в табл. 26.

Таблица 26

Технические характеристики сварочного аппарата фирмы AltraSonic

Мощность, кВт	3÷5
Зона сварки, мм ²	135
Рабочее давление воздуха, МПа	0,05÷0,9
Частота, кГц	20
Напряжение питания, В	220/110

Ультразвуковые технологии применяются не только в процессе механической обработки изделий, но и в процессе физической очистки от промышленных загрязнений. Технология очистки в ультразвуковых ваннах известна достаточно давно, но с ростом потребностей производства растут и требования к таким установкам.

Так, на данный момент технологическим решением в области ультразвуковой очистки изделий можно считать установку модели МО-915 (рис. 57) от компании «Александра-Плюс».

Данный прибор способен производить очистку изделий при частоте до 60 кГц. Также, прибор оснащён тепло- и звукоизоляционными материалами.



Рис. 57. Внешний вид ультразвуковой ванны модели МО-915 [35]

Технические характеристики ванны представлены в табл. 27.

Таблица 27

Технические характеристики ванны модели МО-915

Пиковая мощность ультразвука, кВт	0,65
Мощность нагревателя, кВт	0,6
Рабочий объем ванны, л	14

Контрольные вопросы

1. В чем заключается физическая сущность процесса ультразвуковой обработки?
2. Для обработки каких материалов характерно применение ультразвуковой обработки?
3. Какие типы концентраторов применяют для ультразвуковой обработки?
4. Опишите процесс разрушения материала при проведении ультразвуковой обработки.
5. Перечислите основные факторы, влияющие на производительность при ультразвуковой обработке.
6. Перечислите основные факторы, влияющие на точность при ультразвуковой обработке.

3.4. ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

3.4.1. Общие сведения о гидроабразивной обработке

В основе технологии гидроабразивной резки лежит принцип эрозионного воздействия смеси высокоскоростной водяной струи, выступающей

в качестве носителя, и твердых абразивных частиц на обрабатываемый материал.

Процесс струйной гидроабразивной обработки (ГАО) заключается в направлении струи суспензии, состоящей из воды и частиц абразивных материалов, на обрабатываемую поверхность заготовки.

Физическая суть механизма гидроабразивной резки состоит в отрыве и уносе из полости реза частиц разрезаемого материала скоростным потоком твердофазных частиц. Устойчивость истечения и эффективность воздействия двухфазной струи обеспечиваются оптимальным выбором целого ряда параметров резки, включая давление и расход подаваемой воды, а также расход и размер частиц абразивного материала. Если обычную воду сжать под давлением $1000 \div 5000$ Атм, а затем пропустить через отверстие диаметром $0,1 \div 0,3$ мм то она потечет очень быстро (скорость $400 \div 1000$ м/с).

Применение в качестве абразива электрокорунда, карбида кремния, граната и т.п. повышает качество и скорость резания в $2 \div 4$ раза, при соответствующем повышении стоимости процесса резки. Количество ударов абразивных частиц колеблется в зависимости от условий обработки от $2 \cdot 10^6$ до $25 \cdot 10^6$ в секунду. При ударе о поверхность угловатой частицы наблюдается процесс микрорезания материала. Микрорезание производится только вершинами абразивных частиц (зерен) и из-за скоротечности и направленности ударного воздействия оно носит очень специфический характер.

Удар частицы о поверхность приводит к возникновению кратера. Вытесненный из кратера материал течет в направлении падения частицы с образованием вала до тех пор, пока он не растрескивается из-за значительных быстродействующих накопленных деформаций. При ударах под углом 90° вал располагается вокруг кратера равномерно, при меньших углах атаки вал образуется по бокам кратера и по направлению движения частицы (рис. 58). Имеется критическая скорость, после которой материал начинает вытесняться из кратера.

Абразивные частицы в процессе ударного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью изнашиваются, их рабочие грани скругляются, что приводит с течением времени к снижению общей абразивной способности. При непрерывной обработке в зависимости от вида абразивного материала, схемы установки струйной ГАО и конфигурации обрабатываемых деталей срок службы суспензии составляет от 40 до 70 часов. Суспензию эксплуа-

тируют до тех пор, пока в отстоявшейся пробе разрушенные абразивные частицы не превысят 10 % общего объема суспензии, в противном случае суспензию заменяют [36].

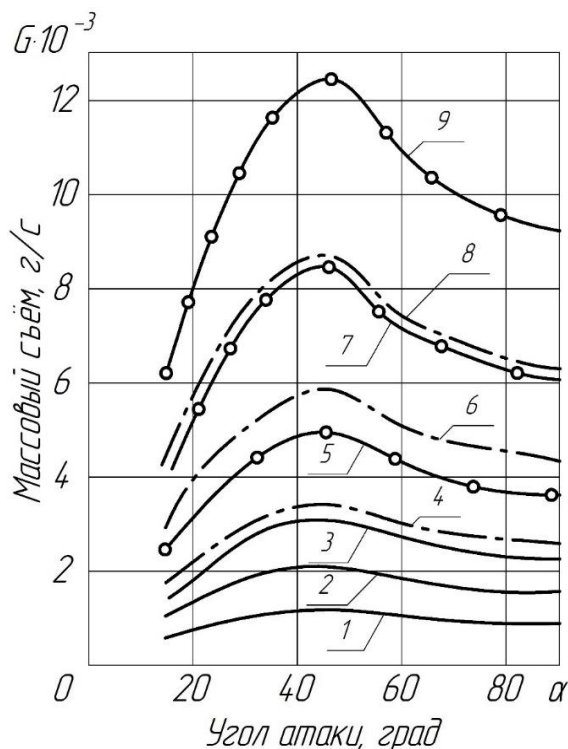


Рис. 58. Съём материала в зависимости от угла падения частиц

Недостатки данной технологии:

- ✓ недостаточно высокая скорость реза тонколистовой стали;
- ✓ ограниченный ресурс отдельных комплектующих и режущей головки.
- ✓ невозможность повторного использования абразивного материала.

3.4.2. Технологические возможности гидроабразивной обработки

Гидроабразивная резка незаменима при резке многослойных, сотых и композиционных материалов, керамики.

Гидроабразивная резка особенно эффективна при резке многих труднообрабатываемых материалов: титановых сплавов, различных видов высокопрочных керамик и сталей, а также композитных материалов. При их гидроабразивной резке не создается разрывов в структуре материала, который, таким образом, сохраняет свои первоначальные свойства.

Гидроабразивная струя не изменяет физико-механические свойства материала и исключает деформацию, оплавление и пригорание материала.

Основные преимущества по сравнению с лазерной, плазменной, механической резкой:

- ✓ высочайшее качество получаемых кромок (не требующих дополнительной механической обработки);
- ✓ позволяет резать пакеты, состоящие из нескольких слоев различных материалов;
- ✓ возможность резать различные композиционные материалы, так как не создается разрывов в структуре материала;
- ✓ обрабатывать материалы с волнистой поверхностью и сложных контуров;
- ✓ отсутствие пыли и газов;
- ✓ небольшая ширина реза;
- ✓ низкое тангенциальное усилие резания на деталь (заготовка не зажимается);
- ✓ высокая скорость резания;
- ✓ кромки материала не подвергаются термической нагрузке, нет окислов, окалины;
- ✓ полная взрывобезопасность и пожаробезопасность процесса резки.

Геометрия заготовок. Диапазон толщин разрезаемых материалов от 0,1 до 300 мм. Оборудование ведущих производителей позволяет обрабатывать высокопрочные и закаленные стали, цветные металлы толщиной до 150÷200 мм, пористые материалы и покрытия до 300 мм.

Точность. Высокая точность резки. Струя жидкости по своим техническим возможностям приближается к идеальному точечному инструменту, что позволяет обрабатывать профиль любой сложности с заданным радиусом закругления, поскольку ширина реза составляет от 1 до 1,5 мм.

Качество. Шероховатость поверхности после струйной ГАО главным образом зависит от исходной шероховатости; скорости, угла атаки и размера абразивных частиц; времени обработки. При необходимости возможно получения финишной поверхности с шероховатостью Ra 1,5÷2,5 мкм.

Физико-химические изменения. Низкая температура в зоне реза 60÷90°C. В результате не происходит заметного повышения температуры заготовки, что обеспечивает по сути «холодный» рез всех материалов. Это позволяет при использовании гидроабразивной технологии: исключить оплавление и пригорание материала в прилегающей зоне. Микронагрев

вызываемый отделением стружки абразивной частицей, устраняется потоком суспензии, сопровождающим эту абразивную частицу.

Производительность. Уменьшение времени холостого хода режущей головки, вследствие возможности резки тонколистовых материалов в многослойном пакете.

Общая схема устройства для проведения гидроабразивной обработки изображена на рис. 59.

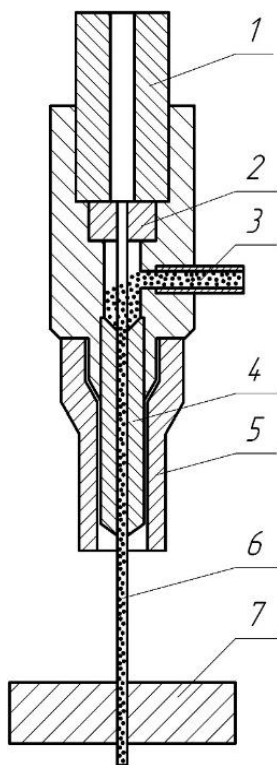


Рис. 59. Схема устройства для ГАО

В установке гидроабразивной резки вода под давлением порядка 4000 атмосфер, создаваемым насосом высокого давления, подается в сопло с профилированным каналом, в котором формируется высокоскоростная водная струя.

Затем водная струя попадает в смесительную камеру режущей головки, где она захватывает поступающие туда абразивные частицы, в результате чего образуется водоабразивная смесь. Далее полученная смесь разгоняется в смесительной трубке (диаметром около 1 мм) до сверхзвуковой скорости (порядка $900 \div 1200$ м/с). Эта высокоскоростная водоабразивная струя и используется в качестве универсального режущего инструмента. После резки материала остаточная энергия струи гасится специальной водяной ловушкой.

Режущая головка устанавливается на устройстве позиционирования координатного стола и может перемещаться при помощи электроприводов по трем координатам с рабочими ходами, обусловленными габаритами координатного стола.

Схема гидроабразивной головки: 1 – шланг высокого давления; 2 – профилированный канал; 3 – абразив; 4 – смесительная камера; 5 – корпус; 6 – струя суспензии; 7 – деталь

3.4.3. Сферы применения гидроабразивной обработки

Сферы применения ГАО схематично показаны на рис. 60.

Также, гидроабразивная обработка может применяться для:

- ✓ Ремонт фасадов зданий (удаление лакокрасочных покрытий, штукатурки и т.п.).
- ✓ Санация бетона и железобетона (в т.ч. полное удаление бетона).
- ✓ Беспыльное, пожаробезопасное удаление коррозии с металла.
- ✓ Омывка речных и морских судов, подготовка к нанесению покрытий.
- ✓ Чистка высоковольтных изоляторов.
- ✓ Удаление любых покрытий, отложений с поверхностей.
- ✓ Утилизация вооружений.
- ✓ Внутренняя и наружная чистка теплообменного оборудования, труб и коллекторов различных диаметров и конфигураций.
- ✓ Пожаробезопасная резка различных материалов (стальные и железобетонные конструкции, стекло, натуральный камень и т.п.).

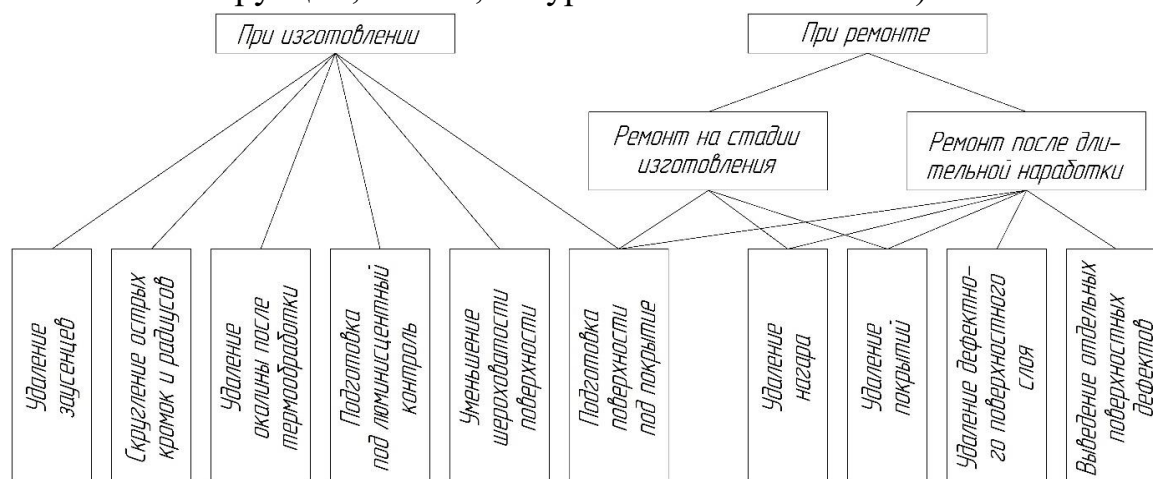


Рис. 60. Схема областей применения ГАО

При помощи гидроабразивной струи резать можно практически любые материалы:

- ✓ черные и цветные металлы и сплавы;
- ✓ труднообрабатываемые легированные стали и сплавы (в том числе: жаропрочные и нержавеющие);
- ✓ композиционные материалы;
- ✓ керамические материалы (керамогранит, плитка);
- ✓ природные и искусственные камни (гранит, мрамор и т. д.);
- ✓ стекло и композиционное стекло (триплекс, бронестекло, армированное стекло, стеклотекстолит и т. п.);
- ✓ пористые и прозрачные материалы;
- ✓ сотовые и сэндвич-конструкции;
- ✓ бетон и железобетон.

3.4.4. Оборудование для гидроабразивной обработки

Для осуществления гидроабразивной обработки используются специализированные станки с подачей жидкостей с абразивным веществом под высоким давлением. На рынке представлено множество моделей станков, но остановимся мы на паре из них.

Станок для проведения операций резки металлов представлен моделью AC3015 от китайской компании WIN-WIN. Станок имеет 5 осей перемещения, давление потока абразива до 4200 бар и уникальную конструкцию самого станка. Конструкция станка является масло-погруженной, что отражено в постоянном нахождении шарико-винтовой передачи и винтовых гаек в масле. Сам станок изображен на рис. 61.



Рис. 61. Внешний вид 5-ти осевого станка модели AC3015 для гидроабразивной обработки деталей [37]

Технические характеристики станка представлены в табл. 28.

Таблица 28

Технические характеристики 5-ти осевого станка модели AC3015

Угол резки, °С	0÷68
Точность резки, мм	до 0,1
Скорость резки, мм/мин	до 11000
Максимальный диапазон резки, мм	3000x1500x200
Размер стола, мм	3800x2200x200

В случае, если необходимо обработать композиционный материал, классический метод гидроабразивной резки может не подойти, так как композиты могут быть повреждены в силу своей хрупкой структуры. Од-

ним из современных решений этой проблемы является специально разработанная сверлильная головка от китайской компании «HEAD», изображенная на рис. 62.



Рис. 62. Внешний вид сверлильной головки HeadWaterJet [38]

Технические характеристики сверлильной головки HeadWaterJet представлены в табл. 29.

Таблица 29

Технические характеристики сверлильной головки HeadWaterJet

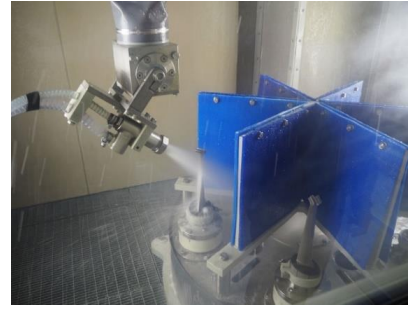
Радиус вращения, мм	266
Точность резания, мм	$\pm 0,05$
Размер рабочей зоны, мм	386x222x698

Существуют также компактные решения для гидроабразивной обработки. Примером такого оборудования может служить установка гидроабразивной обработки с ЧПУ модели KC-150A/6D (рис. 63), которая оснащена защитной рабочей камерой.

К особенностям данного оборудования относится наличие 6-ти шпинделей, шламосборника, блока очистки воздуха, а также вращающегося стола и рабочей камеры.



а



б

Рис. 63. Установка гидроабразивной обработки с ЧПУ модели КС-150А/6D: внешний вид установки (а), процесс обдува детали (б) [39]

Установка предназначена для внешней обработки (обдувки) изделий сложной геометрической формы, к примеру, турбинных лопаток, дисков турбин, корпусов, тракторных колес, барабанов, смесителей и т.д. [40].

Возможна обработка изделий с разовой загрузкой камеры до 6 единиц изделий.

Технические характеристики станка представлены в табл. 30.

Таблица 30

Технические характеристики станка ЧПУ модели КС-150А/6D

Габариты установки, мм	4250x2250x4500
Размеры рабочей зоны, мм	1400x1400x1400
Максимальные размеры детали в шпинделе, мм:	
– диаметр	200
– длина	900
Максимальная масса обрабатываемой детали, кг	100
Потребляемая мощность, кВт	8,5
Получаемая шероховатость (Ra), мкм	4,5÷0,8

Контрольные вопросы

1. В чем заключается физическая сущность процесса гидроабразивной обработки?

2. Какой абразивный материал используется при гидроабразивной обработке?

3. Укажите основные технологические возможности гидроабразивной обработки.

4. Перечислите основные преимущества гидроабразивной обработки.

5. Перечислите основные области применения гидроабразивной обработки.

6. Какие требования, предъявляются к геометрии заготовок при гидроабразивной обработке?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены основные технологические методы обработки на основе концентрированных потоков энергии, включая электрохимические, электроэрозионные, лазерные, ультразвуковые, электронно-лучевые, гидроабразивные и комбинированные. Приведены основные типовые операций указанных методов и их технологические характеристики, оценены преимущества и недостатки.

Издание построено таким образом, что каждая глава имеет одинаковую структуру, которая содержит теоретический материал, описание конструкций и технологические характеристики обработки, а также контрольные вопросы, позволяющие читателю закрепить изученный материал, а также изучить нюансы технологий и особенности их реализации с применением конкретных моделей оборудования, освоить новые термины и определения, облегчая, таким образом, путь дальнейшего самостоятельного изучения технологических методов обработки на основе концентрированных потоков энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богодухов, С. И. Технологические процессы в машиностроении: учеб. для вузов / С. И. Богодухов, Е. В. Бондаренко, А. Г. Схиртладзе и др.; под общ. ред. С. И. Богодухова. - М. : Машиностроение, 2009. - 640 с. : ил. ; 70x100/16. - ISBN 978-5-217-03408-6.
2. Богодухов, С. И. Технологические процессы в машиностроении: учеб. для вузов / С. И. Богодухов, А. Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов и др.; под общ. ред. С. И. Богодухова. - М: Машиностроение, 2012. - 654 с.: ил. - I ISBN 978-5-94178-270-3.
3. Поляков З.И., Исаков В.М., Исаков Д.В., Шамин В.Ю. Электрофизические и электрохимические методы обработки: Учебное пособие для студентов-заочников. Компьютерная версия. - 2-е изд., перер. и доп. - Челябинск: ЮУрГУ, 2006. - 89 с.
4. Попов Л.М. Физико-химические методы обработки: Компьютерный текст лекций. - 2-е изд., перер. - Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. - 97 с.
5. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
6. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное пособие (в 2-х томах) / Под ред. В.П. Смоленцева. - М.: Высш. Школа, 1983. - I том - 386 с., II том - 208 с.
7. Бирюков, Борис Николаевич. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков.- Москва : Машиностроение, 1981 .- 128 с. : ил., табл. - (Библиотека станочника).- Библиогр.: с. 127.
8. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики: Монография / О.И. Невский, В.М. Бурков, Е.П. Гришина, Е.Л. Гаврилова, А.В. Балмасов, А.В. Носков, М.Г. Донцов. ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2006, 282 с.
9. Попов Л.М. Физико-химические методы обработки: Компьютерный текст лекций. – 2-е изд., перер. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 97 с. Открытый доступ: <https://lib-bkm.ru/load/77-1-0-1994>.
10. Системы электрохимической маркировки: [Электронный ресурс] // Лазер Мастер оборудование для лазерной маркировки. URL: <https://lazermaster.ru/oborudovanie-dlja-promyshlennoj-markirovki/sistemy-ehlektrokhimicheskoy-markirovki/sistemy-ehlektrokhimicheskoy-markirovki-es/>.

11. Электрохимический станок для снятия заусенцев Sk-ECM450D: [Электронный ресурс] // SEMAT – российские электрохимические, электроэрозионные и ультразвуковые станки. URL: <http://www.semat.ru/catalog/18/235.html>.
12. Электрохимический станок SFE-12000M: [Электронный ресурс] // Завод по производству станков для электрохимической обработки металлов. URL: <https://stankofinexpo.ru/production/elektrohimicheskij-standok-sfe-12000m>.
13. Электрохимические копировально-прошивочные станки SEMAT серии Sk-ECM: [Электронный ресурс] // SEMAT – российские электрохимические, электроэрозионные и ультразвуковые станки. URL: <http://www.semat.ru/catalog/25/333.html>.
14. Установка для электролитно-плазменной полировки Sk-EPP25: [Электронный ресурс] // SEMAT – российские электрохимические, электроэрозионные и ультразвуковые станки. URL: <http://www.semat.ru/catalog/19/236.html>.
15. Овсянников Б.Л. Изучение устройства и работы установки для вырезной электроэрозионной обработки: Методические указания к лабораторным работам по курсу "Технология и оборудование электрофизических методов обработки". - М.: МИЭМ, 2007. - 20 с.
Открытый доступ: <http://window.edu.ru/resource/198/39198>.
16. Прецизионный 3-х осевой электроэрозионный координатно-прошивной станок АРТА А30: [Электронный ресурс] // Дельта-тест| электроэрозионные (электроискровые) станки и технологии АРТА. URL: https://edm.ru/ru/items/item_16.
17. AQ-Premium - сверхгабаритные электроискровые вырезные станки: [Электронный ресурс] // Лидер электроискрового станкостроения Sodick. URL: <https://sodick.sodicom.biz/ru/aq-premium-edws/>.
18. Медведев В.В. Физико-механические методы обработки: конспект лекций по курсу «Физико-механические методы обработки». – Донецк.: ДонНТУ, 2012. – 122 с.
Открытый доступ: <https://studylib.ru/doc/504280/fmm-lekcii--vyorstka->.
19. Анодно-механический ленточно-отрезной станок модели 4А350: [Электронный ресурс] // Производство станков, электроэрозионного оборудования и расходных материалов. URL: <https://stankitsp.com/catalog/anodno-mexanicheskie-lentochno-otreznye-standki/anodno-mexanicheskij-lentochno-otreznoj-standok-modeli-4a350>.

20. Прецизионный координатно-прошивной электроэрозионный станок для обработки отверстий (супердрель), 3D - микроэрозионного фрезерования АРТА 1040: [Электронный ресурс] // Дельта-тест электроэрозионные (электроискровые) станки и технологии АРТА. URL: https://edm.ru/ru/items/item_21.
21. Полуавтомат для алмазно-электрохимического шлифования с чпу пазов ош-625ЭФ3: [Электронный ресурс] // Производство станков шлифовальных, специальных, фрезерных, прессов. URL: <https://krasnyborets.com/catalog/stanki-dlya-almazno-elektrokhimicheskogo-shlifovaniya/osh-625ef3/>.
22. Электрохимическая металлообработка: установка ЕСМ/РЕСМ PI 800: [Электронный ресурс] // Станки и производственные системы EMAG Group. URL: <https://www.emag.com/ru/stanki/ustanovki-dlja-ehlektrokhimicheskoi-ecm-pecm-obrabotki/pi-800/>.
23. Вейко В.П., Петров А.А. Опорный конспект лекций по курсу "Лазерные технологии". Раздел: Введение в лазерные технологии. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 143 с.
24. Лазеры для резки листового металла (а): [Электронный ресурс] // Купить оптоволоконный лазерный станок по металлу Bodor с доставкой по России. URL: https://bodor.su/group/katalog-oborudovaniya/lazernye-stanki/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=brand_search_reg_521&utm_content=ad2&utm_term=bodor&pm_source=none&pm_block=premium&pm_position=1&mango=%7Cс:61676090%7Cg:4560028233%7Cb:10688178866%7Ck:31709999681%7Cst:search%7Ca:no%7Cs:none%7Ct:premium%7Cp:1%7Cr:%7Creg:192%7Cnet:%7Byad%7D&yclid=7597132035522093991.
25. Станок лазерной резки, сверления отверстий и скрайбирования поликора, керамики и кристаллов МикроЛаб МЛП1-2106: [Электронный ресурс] // Лазерное оборудование, купить оборудование для лазерной обработки с ЧПУ от производителя. URL: <https://www.laserapr.ru/lazernoe-oborudovanie/mashina-lazernoi-mikroobrabotki-MLP1-2106>.
26. Установка для лазерной сварки и наплавки мул-3d: [Электронный ресурс] // Латиком: твердотельные лазеры и их компоненты, лазеры для сварки. URL: <http://www.laticom.ru/oborudovanie/lazernaya-svarka-i-naplavka/seriya-mul/mul-3d/>.

27. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении: Учебное пособие. - СПб.: НИУ ИТМО, 2013. - 103 с. Открытый доступ: <http://window.edu.ru/resource/047/79047>.
Открытый доступ: <http://window.edu.ru/resource/003/63003>.
28. Аппарат электронно-лучевой сварки Focus МЕВW-60: [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «UED Group: Лабораторное оборудование». URL: <https://ued-lab.ru/catalog/obshchelaboratornoe-oborudovanie/oborudovanie-dlya-elektronno-luchevoy-svarki/apparat-elektronno-luchevoy-svarki-focus-mebw-60/>.
29. Универсальный аппарат плазменной сварки SBI серии РМІ: [Электронный ресурс] // Металлообрабатывающее оборудование и станки от «Вебер Комеханикс». URL: <https://weber.ru/device/plazmennaya-svarka/208/>.
30. Установка плазменной наплавки РРС-250 РТМ: [Электронный ресурс] // АО Плакарт – Главная. URL: <https://www.plakart.pro/catalog/oborudovanie/ustanovki-dlya-naplavki/plazmennye/ustanovka-plazmennoy-naplavki-rrs-250-rtm/>.
31. Met-PCC(PLAS): [Электронный ресурс] // Home – Metallisation Ltd. URL: <https://www.metallisation.com/products/met-pccplas/>.
32. Панина, Д. В. Перспективные методы отделочно-зачистной обработки в среде свободных абразивов на основе использования ультразвукового метода / Д. В. Панина, Е. Н. Колганова // Актуальные проблемы инженерных наук : материалы VI-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука - региону», Ставрополь, 02–27 апреля 2018 года. – Ставрополь: ООО ИД "ТЭСЭРА", 2018. – С. 475-476.
33. Ultrasonic Tool Holder: [Электронный ресурс] // Acrow Machinery Mfg. Co., Ltd. URL: https://www.acrow-tools.com.tw/en/products_detal.php?id=3177.
34. China Ultrasonic Welding Transducer, Converter, Generator, Homogenizer, Atomization Factory, Manufacturers and Suppliers: [Электронный ресурс] // URL: <https://www.altrasonicautomation.com/>.
35. Ультразвуковая ванна AlexPulse MO-915: [Электронный ресурс] // Ультразвуковые технологии и оборудование: Александра-плюс. URL: <http://alexplus.ru/MO-915.html>.
36. Эффективное гидрорезание: Монография / Саленко А.Ф. Струтинский В.Б. Кременчуг: Издательство КГПУ, 2005. - 488 с. - ISBN: 966-95391-6-1.

Открытый доступ: <http://window.edu.ru/resource/385/71385>.

37. Станок гидроабразивной резки с ЧПУ под высоким давлением 4200 бар с 5-осевой режущей головкой: [Электронный ресурс] // Установки гидроабразивной резки, Запчасти гидроабразивной резки KMT_WIN-WIN. URL: <https://topwaterjet.ru/ac5/cutting-machine-3015ac.html>.

38. Сверлильная головка: [Электронный ресурс] // Шэньянская научно-техническая компания "HEAD". URL: https://www.headwaterjet.ru/product-in_209.html.

39. Установка гидроабразивной обработки с ЧПУ КС-150А/6D: [Электронный ресурс] // Гидроабразивная очистка от ООО «Гидроабразив», производство оборудования. URL: <https://www.gidroabraziv.com/products/ustanovka-gidroabrazivnoj-obrabotki-s-chpu-ks-150a-6d/>.

40. Тихомиров Р.А. Гидрорезание судостроительных материалов/ Р.А. Тихомиров, В.Ф. Бабин, Е.Н. Петухов. – Л.: Судостроение, 1987. – 164 с.

Учебное электронное издание

БЕЛЯЕВ Леонид Викторович
ДОВБЫШ Никита Сергеевич
ЖДАНОВ Алексей Валерьевич

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ
ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Кафедра технологии машиностроения
zhdanov@vlsu.ru