

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

И. Х. Бутурович, Б. Ф. Гончаров

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Учебное пособие

Ленинград

1980

Отсутствие учебного пособия по курсу «Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки» затрудняет усвоение студентами необходимого материала.

В данном учебном пособии обобщены, систематизированы и изложены основные сведения об электрофизических и электрохимических методах обработки материалов. Рассмотрены физические основы обработки, их технологические возможности, область применения. Приведены примеры технологических операций, выполняемых рассматриваемыми методами, даны сведения об оборудовании.

Пособие составлено в соответствии с учебным планом ЛПИ имени М. И. Калинина и программой курса «Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки» и предназначено для студентов всех специальностей механико-машиностроительного факультета. Оно может быть полезно также студентам других факультетов, изучающих курс «Технология машиностроения».

© Ленинградский ордена Ленина политехнический институт имени М. И. Калинина, 1980 г.

Исмет Хамидович Бутурович,

Борис Федорович Гончаров

Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки

Учебное пособие

Редактор *Л. С. Курышева*

Корректор *Л. А. Онохова*

М-32788. Сдано в набор 12.02.80. Подписано к печати 05.06.80
Формат бумаги 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 3. Усл. печ. л. 4.75.
Уч.-изд. л. 4.5. Заказ 146. Тираж 1500 экз. Цена 20 коп.
Темплан 1980 г., поз. 880

Издание ЛПИ имени М. И. Калинина. 195251, Ленинград,
Политехническая ул., 29

Лаборатория полиграфических машин Ленинградского ордена Ленина
политехнического института имени М. И. Калинина
195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

Глава I

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Развитие многих отраслей народного хозяйства вызвало значительный рост применения жаропрочных, магнитных, нержавеющей и других высоколегированных сталей и твердых сплавов, полупроводниковых материалов, алмазов, рубинов и других материалов, обработка которых обычными механическими методами затруднена или невозможна. Во много раз увеличилась потребность в штампах, литейных формах, пресс-формах и подобных им изделиях со сложной конфигурацией, весьма трудоемких в производстве и требующих высококвалифицированного ручного труда. В современных конструкциях машин, приборов и аппаратов в ряде случаев требуется изготовить детали, притом нередко с высокой точностью, имеющие отверстия, щели и фасонные прорези сверхмалых размеров, соединительные каналы в труднодоступных местах и т. п. Для этих целей механическая обработка не подходит, так как ее применение ограничивается несоответствием жесткости деталей и инструмента требуемым усилиям резания.

Во всех указанных случаях, а особенно при их сочетании, эффективными оказываются электрофизические и электрохимические методы размерной обработки материалов. Эти методы, основанные на различных физико-химических процессах энергетического воздействия на обрабатываемый материал, в ряде случаев обладают более широкими технологическими возможностями. В зависимости от преимущественного вида воздействия на обрабатываемый материал методы обработки можно разделить на три большие группы.

Первая, наиболее многочисленная группа охватывает методы, основанные преимущественно на тепловом воздействии на обрабатываемый материал. В эту группу входят электроэрозионная, электроконтактная, плазменная, электронно-лучевая и лазерная обработки.

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

Третья группа включает методы импульсного механического воздействия на обрабатываемый материал. Это ультразвуковая обработка, электровзрывное и электромагнитное формообразование.

Приведенная классификация методов обработки, относящихся к электрофизическим и электрохимическим, не является исчерпывающей и единственно возможной. В пособии будут рассмотрены не все перечисленные методы, а только те, которые нашли наиболее широкое применение в промышленности.

Общими характерными особенностями электрофизических и электрохимических методов обработки, обеспечивающими им преимущество по сравнению с механической обработкой, являются:

- независимость производительности от твердости и вязкости обрабатываемого материала; исключение составляет ультразвуковой метод, который можно применять только при обработке хрупких материалов;

- возможность копирования формы инструмента сразу по всей поверхности заготовки при простом поступательном перемещении инструмента; при механической обработке для получения сложной формы, как правило, необходимо несколько переходов и перестановок; простая кинематика формообразования позволяет осуществлять также операции, недоступные механической обработке;

- возможность введения больших мощностей в рабочую зону при обработке больших поверхностей, что обеспечивает более высокую производительность обработки деталей даже из обычных конструкционных материалов;

- осуществление обработки практически без силового воздействия инструмента на деталь, что позволяет изготавливать инструмент из легко обрабатываемого материала, а также обрабатывать детали нежесткой конструкции, или нежестким инструментом;

- простота автоматизации оборудования и возможность многостаночного обслуживания.

Основные недостатки электрофизических и электрохимических методов по сравнению с механической обработкой:

- как правило, более низкие показатели по производительности, точности и шероховатости поверхности при обра-

ботке деталей простых геометрических форм из обычных конструкционных материалов;

— в некоторых случаях более сложная форма инструмента;

— более высокая энергоемкость процесса.

Электрофизические и электрохимические методы обработки целесообразно применять в следующих случаях:

— когда обрабатываемый материал плохо поддается механической обработке, например в случае жаропрочных, нержавеющих, магнитных, титановых сталей и сплавов, твердых сплавов, полупроводниковых материалов, ферритов, керамики и минералов;

— при операциях, которые механическим путем не выполняемы либо представляют значительные технические трудности, например при изготовлении криволинейных каналов, соединительных каналов и отверстий в труднодоступных местах пневмо- и гидроаппаратуры, при изготовлении цельных роторов с лопатками;

— для изготовления деталей, не допускающих силового воздействия инструмента на деталь, например тонкостенных деталей приборов, деталей из хрупких материалов, а также для клеймения и маркирования инструмента;

— для механизации и автоматизации таких ручных слесарных операций, как удаление заусенцев, изготовление шаблонов, изготовление вырубных штампов;

— с целью значительного сокращения числа переходов и переналадок по сравнению с механической обработкой при изготовлении деталей сложной формы;

— для снижения затрат на инструменты, например для изготовления отверстий малого диаметра, клеймения и маркирования деталей высокой твердости, изготовления сложных поверхностей.

Электрофизические и электрохимические методы оказывают сильное влияние на ряд отраслей промышленности, открывают перед конструкторами новые возможности в создании надежных и долговечных машин и аппаратов, в ряде случаев являются единственно возможными методами, позволяющими решать сложнейшие технологические задачи.

Глава II

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Метод электроэрозионной размерной обработки был предложен в 1943 г. советскими учеными Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Сущность метода заключается в том, что формообразование осуществляется в результате съема мате-

риала при многократном возбуждении в межэлектродном промежутке электрических разрядов.

§ 1. Основные закономерности электрической эрозии

Схема электроэрозионной обработки показана на рис. 1. Электроды, один из которых является обрабатываемой деталью 1, а другой — инструментом 2, подключаются к генератору электрических импульсов и погружаются в диэлектрическую жидкость 3. При сближении электродов на достаточно малое расстояние происходит пробой межэлектродной среды

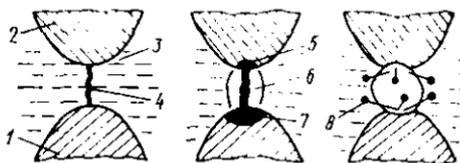


Рис. 1

в месте с наибольшей напряженностью электрического поля. Диэлектрическая прочность промежутка в месте пробоя нарушается, и образуется тонкий токопроводящий канал 4, замыкающий электроды. По образовавшемуся токопроводящему каналу протекает импульс тока большой плотности, канал разряда расширяется, при этом температура в зоне разряда достигает нескольких тысяч градусов. Участки электродов 5 и 7 в зоне разряда расплавляются и испаряются. Под действием высоких температур жидкость в зоне разряда разлагается и испаряется и вместе с парами металла образует быстро расширяющийся пузырь 6. При уменьшении тока, проходящего через электроды, давление паров в расширяющемся газовом пузыре падает. В результате снижения давления расплавленный металл вскипает и выбрасывается в виде мелких капель 8 в окружающую жидкость, где и застывает в виде мелких частиц. Твердые продукты эрозии выносятся из межэлектродного промежутка под действием ударных волн и течения жидкости, вызванных электрическим разрядом и образованием газового пузыря с последующим его расширением. На поверхностях электродов в месте прохождения разряда образуются лунки. Размеры лунок зависят в основном от энергии и длительности импульсов и электроэрозионной стойкости материалов.

Для получения размерной обработки энергия в зону обработки вводится отдельными порциями в виде электрических импульсов достаточно малой длительности. В паузах между импульсами рабочая жидкость восстанавливает свои диэлектрические свойства (деионизируется). Если осуществлять не-

прерывный подвод энергии, то будут разогреваться и плавиться большие объемы материала, и размерная обработка становится невозможной.

При электрической эрозии наблюдается преимущественный съем материала с одного из электродов, даже если материалы электродов одинаковы. Направленность съема материала определяется полярностью подключения электродов к генератору импульсов и параметрами импульсов.

При подаче синусоидального импульса напряжения на электроды (рис. 2) на участке $0-1$ напряжение увеличивается до $U_{сп}$, при котором нарушается диэлектрическая прочность промежутка. Среднее напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка, почти линейно зависит от величины этого промежутка и на чистовых режимах составляет 40—50 В, а для черновых — 70—80 В.

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

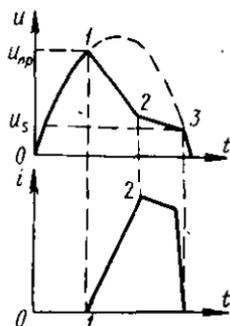


Рис. 2

§ 2. Генераторы импульсов

Технологические показатели электроэрозионной обработки определяются прежде всего характеристиками генераторов импульсов и обрабатываемого материала. При электроэрозионной обработке используются импульсы большой силы тока и низкого напряжения. Частота следования импульсов изменяется в широком диапазоне от 50 Гц до 1,5 МГц. Низкая частота применяется для черновой обработки, высокая — для чистовой. Наибольшая допустимая частота импульсов определяется временем, необходимым для деионизации межэлектродного промежутка.

Генераторы импульсов для электроэрозионной обработки можно разделить на две большие группы: релаксационные,

у которых частота следования импульсов определяется величиной и состоянием межэлектродного зазора, и независимые, частота которых не зависит от зазора и его состояния. Независимые генераторы можно разделить на две группы: машинные и электронные генераторы импульсов.

Релаксационный генератор RC (рис. 3) — наиболее простой генератор импульсов. От источника постоянного тока напряжением $E = 100 \dots 250$ В через сопротивление R конденсатор C накапливает энергию. Напряжение на конденсаторе повышается до величины u_{np} , при которой диэлектрическая прочность промежутка между электродами $MЭП$ нарушается. В диэлектрической жидкости образуется канал проводимости, и запасенная энергия выделяется

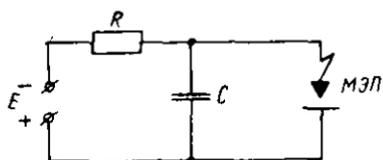


Рис. 3

в межэлектродном промежутке в виде короткого импульса большой мощности. Импульс длится от нескольких микросекунд до сотен микросекунд.

По мере протекания энергии от накопителя к межэлектродному промежутку напряжение на конденсаторе падает ниже величины, при которой еще возможно горение дуги. Такого напряжения недостаточно для поддержания промежутка в проводящем состоянии, поэтому ток быстро уменьшается.

По окончании прохождения тока конденсатор вновь заряжается, и весь процесс повторяется с определенной частотой, зависящей от параметров схемы, от величины промежутка между электродами и степени его заполнения продуктами эрозии.

После прохождения импульсного разряда между электродами начинается деионизация промежутка. Скорость восстановления диэлектрической прочности в основном зависит от типа жидкости и энергии импульса. Время зарядки конденсатора должно быть больше, чем время восстановления диэлектрической прочности, иначе возможно возникновение стационарного дугового разряда.

Энергия импульсного разряда W (в Дж) генератора RC определяется по формуле

$$W = \frac{Cu_{np}^2}{2}, \quad \}$$

где C — емкость конденсатора, Ф; u_{np} — напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка, В.

Изменение параметров импульсного разряда возможно путем подбора соответствующей комбинации R и C . Релаксационные генераторы не позволяют получать пилообразные импульсы большой энергии и имеют относительно низкую частоту.

Получение униполярных импульсов большой энергии возможно с помощью машинных генераторов импульсов, имеющих механическую коммутацию тока. Недостатками машинных генераторов являются фиксированная низкая частота импульсов и невозможность ее регулировки.

Транзисторные и тиристорные генераторы импульсов являются наиболее эффективными и позволяют производить регулировку частоты, напряжения и токов в широком диапазоне. Кроме этого, транзисторные генераторы позволяют получать импульсы различной формы, униполярные, гребенчатые, с поджигающим импульсом и т. д., что обеспечивает высокую производительность, хорошее качество и снижение износа электрода инструмента.

§ 3. Основные схемы электроэрозионной обработки

Основные схемы формообразования, применяемые при электроэрозионной обработке, показаны на рис. 4. Наиболее распространенной схемой обработки является схема с поступательным движением электрода-инструмента или заготовки (рис. 4, *а*). Эту схему называют прошиванием с объемным копированием. Она охватывает около 40% всех операций электроэрозионной обработки. Таким образом изготавливаются сквозные и глухие отверстия различной формы, фасонные полости штампов и пресс-форм. Для изготовления отверстий малого диаметра используют калиброванную проволочку (рис. 4, *л*), направление которой задается кондуктором.

Другой столь же распространенной схемой является вырезка проволочным электродом-инструментом (рис. 4, *б*). Для компенсации износа проволочку перематывают, вводя в работу новые неизношенные участки. Если обеспечить относительные перемещения проволочки и детали последовательно по двум координатам, то можно получать узкие (менее 0,15 мм) прямолинейные резы. Криволинейные сложные резы получаются, если относительные перемещения задаются по копире или системой программного управления. Этим способом изготавливают детали сложной конфигурации: кулачки, вырубные штампы, шаблоны.

Операции типа расточки внутренних поверхностей могут выполняться проволочным электродом-инструментом (рис. 4, *в*) и вращающимся или неподвижным стержневым электродом (рис. 4, *г*) при обязательном вращении заготовки.

Фасонные отверстия могут быть получены по методу расточки и плоским неподвижным электродом соответствующего профиля (рис. 4, д).

Для операций типа шлифования плоскостей при возвратно-поступательном движении заготовки применяют дисковый вращающийся электрод (рис. 4, е). Если дисковому электроду придать соответствующий профиль, то по этой схеме можно выполнять профильное шлифование. Шлифовать плоскости можно также вращающимся или неподвижным стержневым (рис. 4, ж) и проволочным (рис. 4, з) электродами.

Операции типа круглого шлифования тел вращения выполняют дисковым вращающимся электродом-инструментом (рис. 4, и), стержневым (рис. 4, к) или проволочным

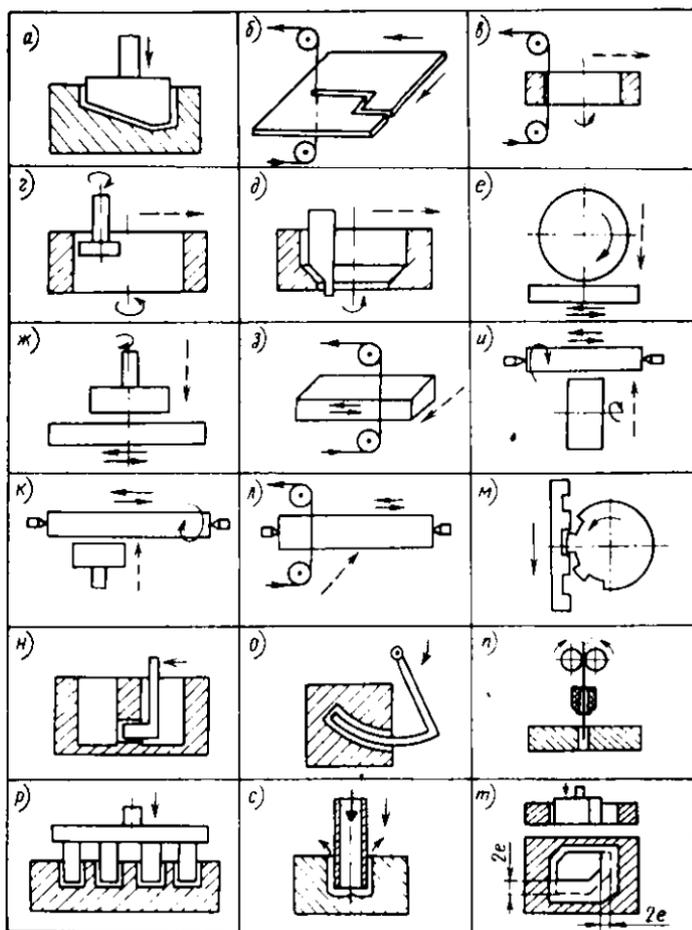


Рис. 4

(рис. 4, л). Если дисковому или стержневому электродам придать соответствующую форму, то можно получить таким образом фасонные поверхности тел вращения.

Способ обкатки заготовки фасонным электродом-инструментом (рис. 4, м) используется для изготовления ручьев в валах для проката как периодического профиля, так и профиля переменного сечения. В этом случае электрод-инструмент представляет собой гребенку с фасонными элементами, образующими требуемый профиль.

Особенности электроэрозионной обработки позволяют выполнять операции, недоступные механической обработке. Например, обработка в труднодоступных местах может выполняться по схеме, приведенной на рис. 4, н. По схеме рис. 4, о изготавливаются криволинейные отверстия. Эти способы применяются для изготовления соединительных каналов в деталях гидроаппаратуры.

Для интенсификации процесса обработки и повышения качества обработанной поверхности используются следующие приемы. Производят прошивку одновременно несколькими электродами (рис. 4, р). Создают вибрацию или вращение электрода-инструмента, которые способствуют лучшему выносу продуктов эрозии из зоны обработки, что применяется при обработке больших поверхностей, при обработке глубоких отверстий и отверстий малого диаметра. Для улучшения выноса продуктов эрозии применяют также прокачку рабочей жидкости через отверстия в электроде-инструменте (рис. 4, с). Плоскопараллельное (орбитальное) перемещение электрода-инструмента вводят при обработке по методу копирования (рис. 6, т). Орбитальное перемещение осуществляется в плоскости, перпендикулярной рабочей подаче, так, чтобы все грани электрода при движении оставались параллельны самим себе. Изменяя радиус орбитального перемещения, можно одним электродом-инструментом вести обработку на нескольких последовательно изменяющихся режимах и компенсировать износ электрода-инструмента.

§ 4. Технологические показатели электроэрозионной обработки

Производительность электроэрозионной обработки зависит от большого числа факторов, основными из которых являются свойства обрабатываемого материала, параметры электрических импульсов, геометрические характеристики зоны обработки и реализуемая схема обработки.

Количество материала, снимаемого за один импульс, зависит от энергии импульса и эрозионной стойкости материала. Термообработка материала практически не оказы-

вает влияние на производительность процесса, закаленные и незакаленные стали обрабатываются примерно с одинаковой эффективностью. В табл. 1 приведены данные о сравнительной обрабатываемости различных материалов. За единицу принята обрабатываемость стали 45, которая при прошивании с объемным копированием составляет 35...60 мм³/мин при площади обработки в 1 см², а на операциях вырезки проволочным электродом — до 20 мм²/мин.

Таблица 1

Сравнительная обрабатываемость металлов и сплавов

Обрабатываемый материал	Сравнительная обрабатываемость
Сталь 45	1
Конструкционные и инструментальные стали	1—1,1
Чугун	0,6—1
Жаропрочные стали	1,2—1,6
Нержавеющая сталь 1X18H9T	1,2—1,3
Твердые сплавы группы: ТК	0,09—0,1
ВК	0,15—0,25

Производительность электроэрозионной обработки существенно зависит от соотношения параметров импульсов и площади обработки. Каждому значению площади обработки соответствует своя оптимальная мощность, которая может быть эффективно реализована и соответствует наилучшему использованию импульсов, вырабатываемых генератором. Связь между эффективно реализуемой средней мощностью на промежутке P_c и площадью обработки имеет вид

$$P_c = K_p S^n. \quad (1)$$

Обычно коэффициент $K_p = 0,2 \dots 0,27$, а показатель степени $n = 0,7 \dots 0,75$.

Средняя мощность на промежутке P_c или среднее значение энергии импульса W_c за период T определяется по формуле

$$P_c = \frac{W_c}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = U_c I_c.$$

Значение средней мощности легко контролируется оператором по средним значениям напряжения U_c и тока I_c на промежутке. Величины u и i определяют соответственно текущее значение напряжения и тока.

При постоянной мощности увеличение площади обработки приводит к снижению скорости съема из-за ухудшения

условий эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка.

Снижение скорости съема с увеличением глубины прошивания определяется ухудшением условий эвакуации продуктов эрозии в зоне обработки.

Шероховатость обработанной поверхности. Поверхности, полученные при электроэрозионной обработке, по характеру микрорельефа значительно отличаются от поверхностей, полученных резанием. В результате воздействия единичного импульсного разряда на поверхности металла образуется единичная лунка, радиус которой R_0 и глубина h_n определяются эрозионной стойкостью материала и энергией импульса. При стабильном протекании процесса лунки имеют примерно одинаковые размеры по диаметру $2r_n$ и глубине.

Связь между высотой микронеровностей R_z и энергией импульсов W имеет вид

$$R_z \approx C_R W^m. \quad (2)$$

В табл. 2 приведены значения коэффициента C_R , характеризующего обрабатываемый материал, и показателя степени m .

Таблица 2

Значения коэффициентов C_R и m для некоторых материалов

Обрабатываемый материал	C_R , мкм/Дж	m
Углеродистые стали	95	0,33—0,37
Жаропрочные сплавы на никелевой основе	100	0,37—0,4
Твердые сплавы	32	0,36—0,4

Учитывая, что энергия импульса W и средняя мощность на промежутке P_c связаны с частотой f соотношением

$$W = \frac{P_c}{f} = \frac{I_c u_c}{f},$$

получим формулу, более удобную для практических расчетов,

$$R_z \approx C_R \left(\frac{I_c u_c}{f} \right)^m.$$

Из приведенной формулы видно, что для получения более низкой шероховатости поверхности целесообразно работать на импульсах повышенной частоты.

Изменения в поверхностном слое. Поверхностный слой детали при электроэрозионной обработке локально, кратковре-

менно и весьма интенсивно нагревается и плавится. Большая часть расплавленного металла и его паров удаляется из зоны разряда, а оставшаяся часть на поверхности лунки активно вступает в химическое взаимодействие с продуктами распада диэлектрической жидкости и парами электрода-инструмента, образующимися в рабочей зоне под действием высокой температуры. В результате такого взаимодействия поверхность обрабатываемого материала будет насыщаться веществами, содержащимися в жидкой среде и входящими в состав электрода-инструмента.

Интенсивный отвод тепла через рабочую жидкость и прилегающий к зоне разряда холодный металл создают условия сверхскоростной закалки. В результате одновременного действия этих двух факторов образуется поверхностный слой с измененной структурой и составом. В большинстве случаев такой поверхностный слой является дефектным, так как он хрупок и его плотность по глубине неравномерна.

Поверхностный слой у сталей обладает повышенной твердостью. При обработке твердых сплавов протекающие в поверхностных слоях металла термические процессы могут приводить к образованию микротрещин и увеличению пористости. Глубина слоя с измененными свойствами и структурой зависит от параметров электрических разрядов и свойств обрабатываемого материала и не зависит от продолжительности обработки. В табл. 3 приведены значения наибольшей глубины измененного слоя в зависимости от энергии импульсов для стали 45.

Таблица 3

Зависимость глубины измененного слоя от энергии импульсов для стали 45

Энергия импульсов, Дж	Наибольшая глубина измененного слоя, мм
0,0027	0,01 (слой прерывистый)
0,020	0,02 (слой прерывистый)
0,1	0,04 ... 0,05 (слой прерывистый*)
0,5	0,08 ... 0,10
10	0,19 ... 0,21
20	0,25 ... 0,26

Связь между энергией импульсов W и глубиной измененного слоя h мм имеет вид

$$h \approx C_h W^k, \quad (3)$$

или, если энергию импульсов выразить через средние значения напряжения и тока и через частоту импульсов,

$$h \approx C_h \left(\frac{I_{сус}}{f} \right)^k.$$

Значения коэффициентов C_h и показателя степени k для некоторых материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов C_h и k для некоторых материалов

Обрабатываемый материал	C_h , мм/Дж	k
Углеродистые стали	0,13—0,18	0,4—0,42
Жаропрочные сплавы на никелевой основе	0,04—0,06	0,38—0,40
Чугун СЧ 15-32	0,14—0,17	0,4—0,42
Твердые сплавы группы ВК	0,03—0,05	0,38—0,40

С увеличением частоты импульсов глубина измененного слоя уменьшается и на чистовых высокочастотных режимах полностью отсутствует.

Проектирование технологического процесса. В процессе электроэрозионной обработки методом прямого копирования электрод-инструмент, внедряясь в обрабатываемую заготовку, изнашивается по длине и диаметру. Кроме этого обработка на высокопроизводительных режимах импульсами большой энергии дает грубую поверхность с большой высотой микронеровностей и значительным дефектным слоем. Как правило, обработка на высокопроизводительных режимах не обеспечивает требуемых точности и качества.

Поэтому на практике обработку электроэрозионным способом выполняют в несколько переходов: обработка на черновых высокопроизводительных режимах для удаления основного объема припуска; обработка на средних режимах для выравнивания поверхности и удаления дефектов, полученных от предыдущей операции, обработка на чистовых режимах импульсами малой мощности и высокой частоты.

В качестве примера на рис. 5 представлена схема технологического процесса прошивки сквозного отверстия. Первый проход осуществляется рабочей ступенью электрода-инструмента диаметром D_1 и длиной $l_p \geq H$ на высокопроизводительном режиме. Выбор режима обработки осуществляется по формуле (1).

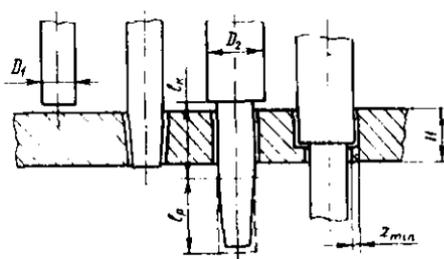


Рис. 5

Полученное отверстие имеет значительную конусность. Для уменьшения конусности продолжают прошивку отверстия калибрующей частью электрода-инструмента длиной l_k , при этом может быть осуществлен переход на более мягкий режим обработки. Величина калибрующей части обычно принимается в пределах $l_k = (1, 2 \dots 1,5)H$.

После калибровки отверстия для получения требуемой шероховатости поверхности и удаления дефектного слоя производят прошивку отверстия на чистовом режиме второй ступенью электрода диаметром D_2 . Режим обработки выбирают по формулам (2) и (3). Минимальная величина припуска, которую необходимо удалить второй ступенью, рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{min}i} = (R_{z\ i-1} + h_{i-1}) + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2},$$

где R_z — высота микронеровностей, полученная после калибровки; h — глубина дефектного слоя, полученного после калибровки; ρ — геометрическая сумма пространственных отклонений поверхностей обрабатываемой заготовки после калибровки; ε — погрешность установки при выполнении прошивки второй ступенью. Индекс $i-1$ указывает, что данная величина должна быть принята по предшествующему проходу, а индекс i присвоен величинам, относящимся к рассчитываемому проходу.

Электроды-инструменты для электроэрозионной обработки изготавливают из меди, алюминиевых сплавов, чугуна, вольфрама и специального углеродистого материала.

§ 5. Электроэрозионные станки

Типаж освоенной отечественной промышленностью электроэрозионных станков включает гамму универсальных копировально-прошивочных станков, гамму станков для резки проволочным электродом-инструментом, многочисленные специальные станки, например для обработки ручьев на прокатных валках, изготовления пресс-форм протекторов шин, изготовления отверстий малого диаметра, изготовления отверстий малого диаметра и для извлечения сломанного инструмента.

Регуляторы межэлектродного промежутка являются наиболее важной частью любого электроэрозионного станка.

Для сохранения устойчивой работы электроэрозионного станка и получения максимальной для данного режима скорости съема материала величина межэлектродного зазора должна поддерживаться в определенных пределах (0,01... 0,1 мм в зависимости от условий обработки). Однако в про-

цессе обработки величина межэлектродного зазора изменяется в результате удаления материала с обрабатываемой детали и электрода-инструмента, а также по другим причинам. При этом скорость подачи электрода-инструмента не может быть постоянной и регулируется специальным следящим устройством — автоматическим регулятором межэлектродного промежутка.

Блок-схема автоматического регулятора межэлектродного зазора представлена на рис. 6. Сигнал с измерительного элемента *ИЭ*, характеризующий состояние объекта регулирования *ОР*, поступает на элемент сравнения *ЭС*. В нашем

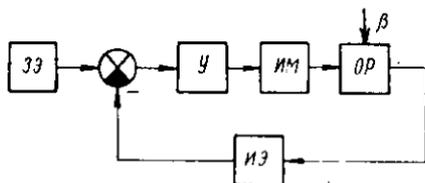


Рис. 6

случае объектом регулирования является межэлектродный промежуток, а сигналом, характеризующим расстояние между электродами, — чаще всего среднее значение напряжения или средний ток в промежутке.

В элементе сравнения сигнал с измерительного элемента сравнивается с эталонной величиной, определяемой задающим элементом. Сигнал рассогласования, равный разнице сигналов с *ЗЭ* и *ИЭ*, с элемента сравнения подается через усилитель *У* на исполнительный механизм *ИМ*, обеспечивающий перемещение электрода-инструмента.

Если зазор между электродами в результате съема материала с детали, износа электрода-инструмента или под действием случайного возмущающего воздействия β на объект регулирования станет больше, чем заданный, то среднее напряжение на электродах увеличится. Разница сигналов, снимаемых с элемента сравнения и задающего элемента, увеличится, поэтому увеличится и сигнал, подаваемый на исполнительный механизм, а тем самым и скорость подачи электрода-инструмента. В общем случае направление и скорость подачи электрода-инструмента, определяемые сигналом рассогласования, будут такими, чтобы привести фактический межэлектродный зазор к задаваемой эталонной величине. Эталонная величина сигнала, задаваемая задающим элементом и определяющая желаемую величину межэлектродного зазора, устанавливается оператором.

Универсальные копировально-прошивочные электроэрозионные станки имеют вертикальную компоновку.

Упрощенная схема станка представлена на рис. 7. Обрабатываемая деталь 3 устанавливается на столе 2. Во время обработки ванна 1 с диэлектрической жидкостью должна быть поднята, чтобы зона обработки была под слоем диэлектрической жидкости. Электрод-инструмент 4 закрепляется на ползуне 5. Ползун с электродом-инструментом получает ра-

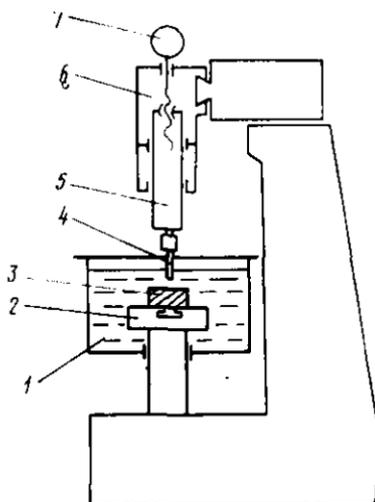


Рис. 7

бочее движение от двигателя 7 регулятора межэлектродного зазора через передачу винт-гайка. Механизмы универсальных станков дают возможность получить ручные или механические установочные перемещения инструментальной головки 6 в трех взаимно перпендикулярных направлениях. На станке могут быть также установочное вращательное движение электрода-инструмента и его вибрация. В комплект станка входят генератор импульсов, имеющий ступенчатое или ступенчато-плавное регулирование электрических режимов, и система снабжения и фильтрации рабочей жидкости.

Универсальные станки, снабженные соответствующими приспособлениями: вращающейся и осциллирующей головками, вращающимся столом и др., позволяют выполнить все известные операции электроэрозионной обработки.

Станок для вырезки проволочным электродом-инструментом (рис. 8) имеет две каретки: каретку продольных перемещений 8 и каретку поперечных перемещений 3. На каретке поперечных перемещений закреплена скоба 5 и размещено устройство для перемотки и натяжения проволоки. Проволока 6 под действием тянущих роликов 4 проходит систему направляющих роликов и перематывается с одной катушки 1 на другую 2, причем изношенная при обработке проволока наматывается на приемную катушку 2. К катушке 1 приложен тормозной момент M_t , обеспечивающий требуемое натяжение проволоки. Величину натяжения можно регулировать изменением тормозного момента. Скорость перемотки проволоки регулируется изменением угловой скорости ω_r тянущего ролика. Для вырезки чаще всего применяют проволоку из меди, латуни и вольфрама диаметром от 0,1 до 0,3 мм.

Каретка продольных перемещений имеет кронштейн 7, на котором закрепляется обрабатываемая деталь 10. Для погружения детали при обработке в диэлектрическую жидкость станок имеет поднимающуюся ванну 9.

В комплект станка входят генератор импульсов, позволяющий регулировать электрические режимы обработки, и система очистки и подачи диэлектрической жидкости.

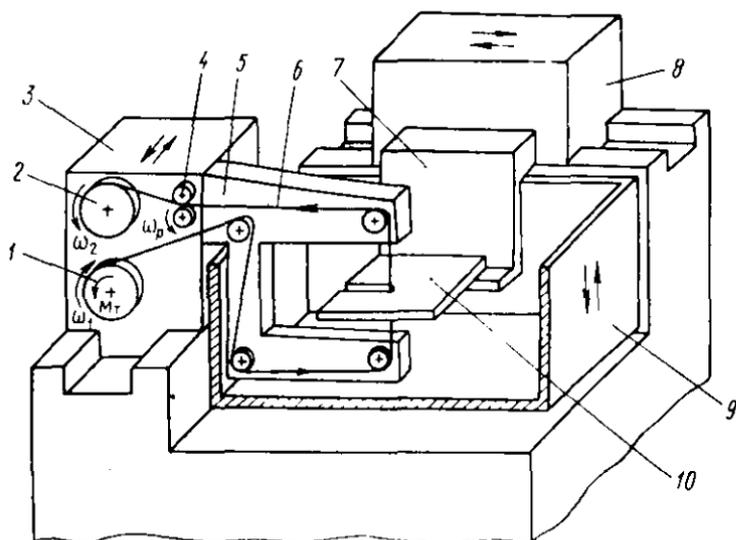


Рис. 8

Прямолинейная резка осуществляется при движении одной из кареток, последовательность включения кареток определяется контуром реза.

Для получения криволинейных резов на деталь через изолятор устанавливают металлический копир, который определяет вырезаемый контур, при этом используется одновременное движение обеих кареток. В этом случае привод одной из кареток подключается к регулятору, обеспечивающему поддержание межэлектродного зазора между провололкой и деталью. Привод другой каретки подключается к регулятору копировальной подачи, обеспечивающему контакт провололки с копиром.

Вырезка криволинейного профиля осуществляется благодаря тому, что одна из кареток при своем движении обеспечивает контакт провололки с копиром, а другая — обеспечивает резание детали, поддерживая при своем движении необходимый межэлектродный зазор между провололкой и деталью. В результате сложения этих двух движений провололка вырезает контур, определяемый формой копира.

Криволинейные резы сложной формы получают также на электроэрозионных вырезных станках с фотокопировальной системой. В этом случае роль копира выполняет чертеж детали, выполненный в увеличенном масштабе, а считывающим устройством является фотоэлемент. Станки с фотокопировальной системой позволяют получать более сложные контуры, чем станки с металлическим копиром.

Наиболее эффективными при вырезке проволочным электродом деталей любой сложной формы являются станки с ЧПУ, в настоящее время налажен серийный выпуск таких станков.

§ 6. Электроискровое легирование

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

Физические основы процесса. Электроискровое легирование использует явление электрической эрозии в газовой среде (в отличие от электроэрозионной обработки, которая осуществляется в жидкой среде).

Схема установки для электроискрового легирования представлена на рис. 9. Генератор униполярных импульсов 1 типа *RC* подключается к электродам, причем катодом 3 служит легируемая поверхность детали, а анодом 2 — заостренный легирующий электрод.

В зависимости от параметров искрового разряда количество материала, выброшенного из анода и катода, может изменяться. При легировании обеспечивают условия, при которых выброс металла происходит преимущественно из анода. При каждом разряде с анода удаляется весьма малая частичка материала, которая или является отходом (если процесс протекает в жидкой среде как при электроэрозионной обработке), или достигает поверхности катода и осаждается на ней. Такой эффект процесса электрической эрозии — осаждение на катоде выброшенных из анода частиц и используется при электроискровом легировании металлических поверхностей.

При прохождении между электродами одиночного электрического разряда на поверхности катода образуется лунка с краями, несколько приподнятыми над первоначальной поверхностью металла. Это результат деформации металла, расплавившегося в месте прохождения разряда. Материал, перенесенный с анода, располагается на вогнутой поверхности лунки. Размер лунки и качество перенесенного мате-

риала в основном зависят от эрозионной стойкости материала и энергии разряда.

При перемещении анода вдоль легируемой поверхности она покрывается лунками, поверхности которых имеют в своем составе материал анода. В дальнейшем последующие разряды проходят через края лунок (наиболее выступающую часть поверхности). Металл, переносимый с анода, «прилипает» (сплавляется, смешивается) к поверхности катода и образует слой покрытия.

Материал в парообразном и жидкокапельном состояниях, выброшенный из анода в виде расширяющегося пучка, попадает в межэлектродное пространство, разогретое прошедшим электрическим импульсом до температуры, при которой

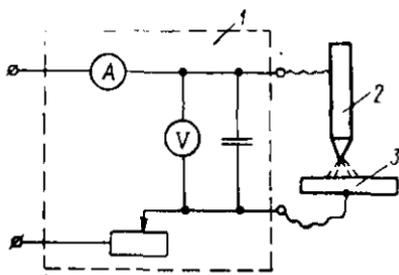


Рис. 9^б

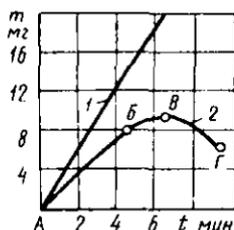


Рис. 10

возможно существование вещества в ионизированном состоянии. Эти частицы ударяются о поверхность катода, также локально разогретую электрическим разрядом, вступают с ней во взаимодействие, образуя сплавы, твердые растворы или механическую смесь. Эти микрометаллургические процессы протекают в отрезке времени, определяемые долями секунды, поэтому состав слоя и его физико-механические свойства часто существенно отличаются от свойств легирующего и легируемого материалов.

Качество материала, осаждаемого на легируемой поверхности, зависит от удельной продолжительности легирования, т. е. от времени легирования единицы поверхности. На рис. 10 прямая 1 показывает, что в течение всего времени легирования анод равномерно «подает» одинаковые порции материала. В первые минуты на катоде откладывается наибольшее количество материала (участок AB кривой 2). В точке B максимума кривой 2 изменение массы катода не наблюдается, в этот момент времени количество материала, осевшего с анода, равно количеству материала, удаляемому с катода. В дальнейшем (см. участок BГ) начинается обратный процесс, т. е. на катоде осаждается материала меньше, чем выбрасывается за один импульс. Удельная продолжительность

легирования, при которой наступает максимум покрытия, зависит от энергии единичного импульса и химического состава материалов электродов.

Наличие максимума в кривой свидетельствует о невозможности получения покрытий большой толщины. Обычно толщина покрытия при чистовом легировании составляет 50...80 мкм, при грубом — 1...2 мм. Причины, ограничивающие толщину покрытия, пока полностью не выяснены.

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

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

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

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

Глава III

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ ОБРАБОТКА

Электроконтактная обработка основана на использовании тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока через место контакта инструмента с деталью. Степень тепло-

вого воздействия при электроконтактной обработке различна и, в зависимости от технологического процесса, вызывает либо расплавление материала, либо только его нагрев.

Наиболее эффективно электроконтактная обработка используется для черновых и получистовых операций, таких как разрезка, очистка проката от окалины, обдирка и сглаживание поверхностей заготовок из труднообрабатываемых материалов, интенсификация процессов резания.

Электроконтактная резка металлическим диском (инструментом) осуществляется по схеме рис. 11. Вращающийся диск 1 прижимается с небольшим усилием P к заготовке 2. К диску и заготовке подключен источник переменного или постоянного тока напряжением до 40 В и током до 3000 А.

В месте контакта вращающегося диска и заготовки из-за неплотного их контакта образуется повышенное электрическое сопротивление, вызывающее значительное выделение тепла при прохождении тока.

При вращении инструмента контакт его с заготовкой периодически прерывается, вследствие чего возникает нестационарный электрический разряд, приводящий также к значительному выделению тепла.

Выделение тепла происходит также в результате трения поверхности инструмента и заготовки. При увеличении усилия прижима доля тепла, выделяющегося в результате трения, возрастает.

Таким образом, при электроконтактной обработке тепло выделяется по трем причинам: в результате прохождения тока через место контакта, вследствие нестационарных электрических разрядов и в результате трения поверхности заготовки и инструмента. В зависимости от соотношения параметров процесса (напряжения, тока, усилия прижима, окружной скорости инструмента) преобладает тот или иной механизм выделения тепла.

Выделившееся тепло приводит к расплавлению металла в зоне контакта и к его частичному испарению. Жидкий металл увлекается вращающимся диском и удаляется из зоны обработки. Для интенсификации удаления расплавленного металла в зону обработки подается струя воздуха. Чтобы предотвратить плавление инструмента, ему придают большую скорость вращения. Так, окружная скорость диска достигает 40 м/с.

Производительность резки диском достигает 40 000 мм²/мин при высоте микронеровностей $R_z = 160 \dots 80$. Электроконтактная резка сопровождается значительным шумом и разбрызгиванием расплавленного металла. Другой существенный недостаток электроконтактной резки — наличие дефектного слоя толщиной до 0,3 мм.

Электроконтактная очистка от окалины стальных листов осуществляется по схеме рис. 12. При контактировании стальной щетки 1 с поверхностью листа 2, покрытого слоем окалины, ток, проходящий через зону контакта, расплавляет окалину. Расплавленная окалина сметается вращающейся щеткой. Ток в цепи достигает 500 А при напряжении до 16 В. Производительность такой очистки достигает 100 000 мм²/мин.

Сглаживание микронеровностей поверхности производится с помощью ролика или специальной гладилки, перемещающейся под давлением по обрабатываемой поверхности. Ток, проходящий в месте контакта, вызывает только местный разогрев микронеровностей обрабатываемой поверхности и

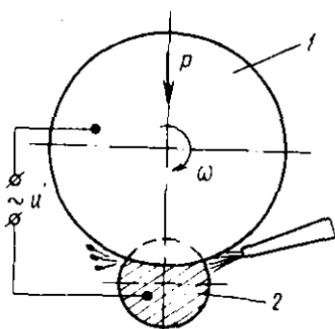


Рис. 11

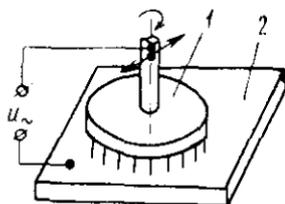


Рис. 12

облегчает их деформацию. Для этих процессов используют переменное напряжение до 3 В, исключающее возникновение электрических разрядов. Для предотвращения сильного разогрева инструмента его искусственно охлаждают.

Интенсификация процессов резания — одна из областей применения электроконтактной обработки, при которой тепловое действие электрического тока вызывает только нагрев металла без его расплавления. Дополнительный нагрев заготовки в месте контакта с инструментом, например, при точении токарным резцом, значительно снижает силы резания и увеличивает производительность обработки. Особенно эффективен этот процесс при обдирке заготовок из труднообрабатываемых материалов. При этом используется переменное напряжение до 6 В, ток достигает 500 А.

Глава IV ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА

§ 1. Получение плазмы для технологических целей

Плазмой называется частично или полностью ионизированный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически одинаковы. Любое вещество при достаточно сильном нагревании испаряется, превращаясь в газ. Если и дальше повышать температуру, то молекулы его начнут распадаться на атомы, которые при дальнейшем нагреве превращаются в ионы. Этот процесс называется термической ионизацией. В промышленности для технологических целей используют низкотемпературную плазму с температурой 10 000 — 50 000 К.

Для получения плазмы используют дуговой разряд постоянного тока, который сжимают с помощью газа или магнитного поля. Сжатие электрической дуги позволяет значительно повысить ее температуру по сравнению с обычным дуговым разрядом. Газ, соприкасаясь с дугой, переходит в плазменное состояние.

Устройство для получения плазмы называют плазмотроном. Плазмотроны постоянного тока (рис. 13) состоят из сле-

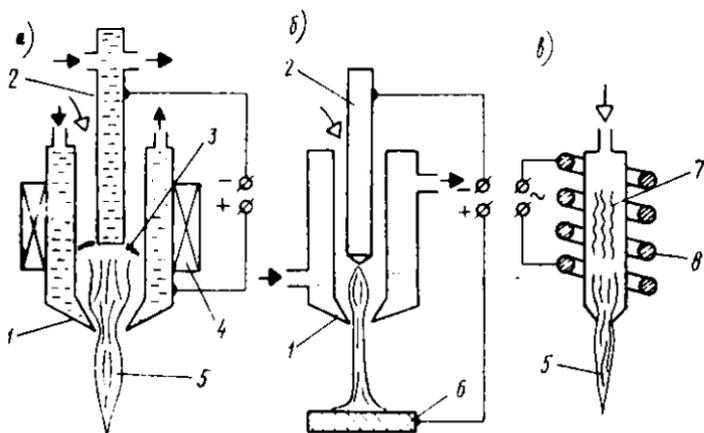


Рис. 13

дующих основных узлов: катода 2, анода 1 и системы подачи плазмообразующего вещества. Для защиты от действия высоких температур электроды плазмотрона, как правило, охлаждаются водой.

Различают две группы плазмотронов — для создания плазменной струи и для создания внешней плазменной дуги.

В плазмотронах первой группы (рис. 13, а) плазма, создаваемая в разряде 3 между катодом и анодом, истекает из разрядной камеры в виде длинной узкой струи 5. В плазмотронах второй группы (рис. 13, б) дуговой разряд горит между катодом плазмотрона и обрабатываемой деталью 6, служащей анодом.

Стабилизация дугового разряда в плазмотронах может осуществляться магнитным полем, потоком газа и стенками разрядной камеры. Магнитная стабилизация плазменной струи производится с помощью соленоида 4. Сильное магнитное поле соленоида вынуждает дуговой разряд вращаться, обегая анод и катод, поэтому перемещаются по кругу и анодные и катодные пятна дуги, что предотвращает интенсивную эрозию электродов. Для стабилизации дугового разряда и сжатия дуги газом газ подается в разрядную камеру по спиральным каналам. В результате «закрутки» образуется газовый вихрь, обдувающий столб дуги и генерируемую плазменную струю. Слой более холодного газа располагается под действием центробежных сил у стенок камеры, предохраняя их от контакта с дугой. Очень часто стабилизирующий газ одновременно является и плазмообразующим.

Плазма дуговых плазмотронов содержит частицы вещества электродов вследствие эрозии. Когда это явление по технологическим соображениям полезно, его интенсифицируют, в других случаях уменьшают, изготавливая электроды из тугоплавких материалов (вольфрама, молибдена) и охлаждая их водой. Более чистую плазму дают высокочастотные (ВЧ) плазмотроны. Наибольшее распространение в технике нашли индукционные ВЧ плазмотроны (рис. 13, в).

ВЧ индукционный плазмотрон имеет электромагнитную катушку — индуктор 8, подключенный к источнику высокочастотной энергии, разрядную камеру, в которой нагрев вихревыми токами вызывает в плазмообразующем газе дуговой разряд 7, образующий плазменную струю 5.

§ 2. Применение плазменной обработки

При плазменной обработке материалов низкотемпературной плазмой, генерируемой дуговыми или ВЧ плазмотронами, изменяются форма, размеры, структура обрабатываемого материала или состояние его поверхности.

Эффект обработки обусловлен как тепловым, так и механическим действием плазмы. Механическое действие проявляется в бомбардировке поверхности обработки частицами плазмы, движущимися с очень большой скоростью и обеспечивающими удаление расплавленного металла.

Плазменная обработка материалов обладает рядом особенностей, определяющих ее применение в промышленности. К ним относятся: возможность высокой концентрации энергии в зоне обработки, способность плавить и испарять практически любые тугоплавкие материалы, широкий диапазон регулирования мощности.

Плазменная обработка применяется для резки материалов, нанесения покрытий, формирования деталей, получения порошков и сварки.

Резка металлов осуществляется плазменной дугой, которая горит между анодом (разрезаемым металлом) и катодом плазменной горелки. Стабилизация и сжатие токового канала дуги, повышающие ее температуру, осуществляются соплом горелки и обдуванием дуги плазмообразующим газом, чаще всего аргоном, азотом или водородом. Удельная мощность плазменной дуги $10^5 - 10^6$ Вт/см². Для интенсификации резки применяют кислород. Кислород, окисляя металл, вносит дополнительный энергетический вклад в процесс резки.

Плазменной дугой режут нержавеющие и хромоникелевые стали, медь, алюминий и другие металлы, не поддающиеся кислородной резке. Мощность установок для плазменной резки достигает 150 кВт.

Неэлектропроводные материалы, такие как бетон, гранит, тонколистовые органические материалы, обрабатывают плазменной струей. Удельная мощность плазменной струи меньше, чем плазменной дуги и составляет $10^3 - 10^4$ Вт/см².

Плазменная струя используется для интенсификации процессов механической обработки деталей из тугоплавких материалов. Струя плазмы подается на обрабатываемую деталь и разогревает ее. Разогретый материал снимается токарным резцом, перемещающимся вместе с плазмотроном вдоль обрабатываемой поверхности. В ряде случаев резец вообще не используют. Скорость точения жаропрочных сплавов при точении с плазменным подогревом в 5—10 раз выше, чем при обработке без подогрева.

Плазменное нанесение покрытий (наплавку) производят для защиты деталей, работающих в агрессивных средах, при высоких температурах или подверженных интенсивному механическому износу, в микро- и радиоэлектронике. Материал покрытия, обычно это тугоплавкие металлы, окислы или карбиды, вводят в виде порошка или проволоки в плазменную струю. Материал распыляется, приобретает скорость порядка 100—200 м/с и в виде мелких частиц диаметром 20—100 мкм наносится на поверхность изделия. Возможно нанесение и керамических покрытий на металл. Для исключения окисления напыляемого материала и получения особо чистых

покрытий напыление производится в камерах с контролируемой атмосферой. Наносить покрытие на изделие желательно в последнюю очередь, проведя все виды механической обработки. Это исключает повреждение покрытий и возникновение в них дополнительных напряжений. Для получения более чистой поверхности с точными размерами покрытие наносят с припуском под последующую обработку резанием или шлифованием. Наибольшая производительность — 5—10 кг напыленного материала в час.

Формирование деталей напылением позволяет получать изделия из тугоплавких материалов со сложными конструктивными элементами, например с внутренними резьбами, фасонными выступами и отверстиями. Наиболее широко распространено формирование этим методом деталей из вольфрама и молибдена. Напыляемый материал вводится в струю ионизированного газа в виде порошка или проволоки и наносится в несколько слоев на поверхность оправки. Оправки (шаблоны) для напыления могут быть разового или многократного использования. Для разовых оправок используют медь, алюминий и другие материалы, которые после напыления растворяют в кислотах или щелочах, либо выплавляют в вакууме. Если оправка изготовлена из графита, то его удаляют механически. Для многократного использования оправок их рабочую поверхность покрывают тонким слоем вещества, предотвращающего сцепление между напыленным слоем и шаблоном.

После напыления материал изделия хрупок и имеет слоистую структуру. Отжиг в вакууме или в среде водорода придает материалу мелкозернистую структуру и механические свойства, позволяющие подвергать полученное изделие механической обработке и использовать в конструкциях.

Сварка. Большая удельная мощность сфокусированной плазменной дуги позволяет сварить без всякой разделки кромок металлы толщиной 10—15 мм. Сварка плазменной дугой отличается высокой производительностью и хорошим качеством шва. Инертные газы обеспечивают защиту места сварки от окисления. Маломощная плазменная струя в виде «иглы» удобна для сварки листов толщиной до 0,05 мм при изготовлении мембран, сильфонов, теплообменников из титана, вольфрама, алюминия.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА

§ 1. Основы электронно-лучевой обработки

Электронно-лучевой метод обработки материалов основан на использовании тепловой энергии, выделяющейся в результате столкновения быстро движущихся электронов с обрабатываемым материалом. Идея использовать энергию электронов для технологических целей были высказаны еще в начале XX века, но электронно-лучевая обработка стала применяться в промышленности только с пятидесятых годов.

Установки для электронно-лучевой обработки. Основные части электронно-лучевых технологических установок — электронная пушка, служащая источником электронов; фокусирующая и ускоряющая система, позволяющая получить поток электронов большой плотности и энергии; отклоняющая система, с помощью которой управляют перемещениями электронного луча по обрабатываемой поверхности; система координатных перемещений детали; оптическая система, позволяющая вести визуальное наблюдение за процессом.

Принципиальная схема электронно-лучевой обработки приведена на рис. 14. Свободные электроны, эмитируемые прямонакальным катодом 6, ускоряются разностью потенциалов между анодом 9 и катодом 6. Изменяя напряжение смещения между управляющим электродом 5 и катодом 6, можно регулировать величину потока электронов 8. Управляющий электрод одновременно фокусирует электронный поток. Электронный луч сжимается до необходимых размеров электромагнитными линзами 10, их действие основано на взаимодействии движущихся электронов с электрическим или магнитным полем.

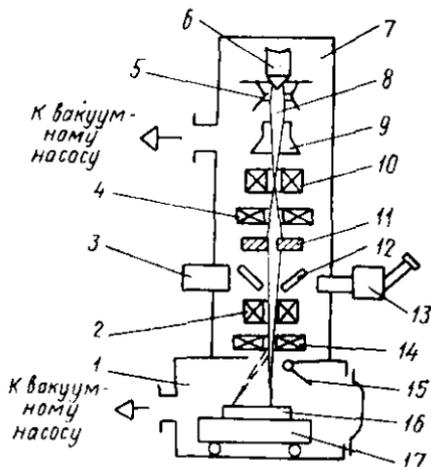


Рис. 14

Сфокусированный и ускоренный поток электронов проходит через диафрагму 11, которая пропускает центральную часть луча и отсекает краевые электроны. Положение оси луча относительно отверстия диафрагмы корректируется стигматором 4, представляющим собой электромагнитную систему. Фокусирующая электромагнитная линза 2 концентри-

рует поток электронов на обрабатываемой поверхности изделия 16, а отклоняющая электромагнитная система 14 позволяет перемещать электронный луч по обрабатываемому контуру.

В зависимости от технологического назначения установки могут быть укомплектованы координатными столами 17, обеспечивающими перемещения деталей в горизонтальной плоскости по двум координатам с ЧПУ, устройством для вращения детали вокруг горизонтальной или вертикальной осей. Обработка производится в вакууме $10^{-2} \dots 10^{-4}$ Па. Обрабатываемая деталь и механизмы координатных перемещений располагаются в боксе 1, имеющем вакуумный затвор 15 для герметизации электронно-оптической колонны 7 во время установки детали.

Для визуального наблюдения за процессом имеются системы зеркал 12, системы подсветки 3 и бинокулярный микроскоп 13.

Электроны, эмитируемые катодом, в электрическом поле между катодом и анодом приобретают кинетическую энергию (в Дж)

$$\frac{m_0 v^2}{2} = eU, \quad (4)$$

где m_0 — масса электрона, равная $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг; v — скорость электрона, м/с; e — заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; U — ускоряющее напряжение, В.

Если считать массу электрона постоянной, то его скорость (в м/с), согласно формуле (4), будет

$$v = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U}.$$

При больших значениях ускоряющего напряжения (до 100 кВ) скорости электронов оказываются соизмеримы со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ км/с. В этом случае необходимо учитывать изменение массы электрона m_v при движении

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Современные электронно-лучевые технологические установки позволяют ускорить электроны до скорости $2 \cdot 10^8$ км/с.

Удельная мощность электронного луча p определяется током в луче I , ускоряющим напряжением U и радиусом луча на обрабатываемой поверхности, т. е.

$$p = \frac{IU}{\pi r^2},$$

где p — в Вт/см².

Величина наибольшего тока в луче достигает 500 мА, а наименьший радиус луча 2,5 мкм.

Взаимодействие электронного луча с веществом. При движении от катода к обрабатываемой поверхности электроны на своем пути могут встречать атомы газа и атомы испарившегося обрабатываемого материала. При столкновении потока электронов с этими частицами происходит их ионизация, и на пути электронного луча образуется плазма. При этом луч теряет часть своей энергии.

Достигая поверхности обрабатываемого изделия, электроны внедряются в вещество и в результате столкновения с его частицами передают им свою энергию. Столкновения электрона с ядром атома приводят к получению ядром дополнительного импульса количества движения, которое проявляется в виде местного повышения температуры.

При прохождении электронов сквозь кристаллическую решетку в пространстве решетки, пронизанном электрическими полями отдельных микрочастиц, возникают возмущения этих полей. Такие возмущения проявляются в виде перемещения атомов и молекул и увеличения амплитуды их колебаний. Внешний признак этого — местное повышение температуры металла.

При соударении электронов луча со свободными электронами вещества возможен выход последнего в вакуум. В результате этого возникает эмиссия вторичных электронов с поверхностью обрабатываемого вещества. Основная доля потеря энергии электронного луча является следствием вторичной эмиссии.

При столкновении электронов луча со связанными электронами вещества последние переходят на более высокие энергетические уровни. При возвращении на прежние энергетические уровни эти электроны испускают кванты электромагнитного излучения, частота которого находится в области рентгеновского излучения. При торможении электроны луча сами создают рентгеновское излучение, которое в нагреве вещества не участвует.

При упругом соударении с частицами вещества электроны луча имеют возможность, отразившись, выйти из обрабатываемого материала обратно в вакуум. Энергия этих электронов также не участвует в процессе нагрева.

В результате бомбардировки электронным лучом материала большая часть кинетической энергии электронов, порядка 90%, превращается в тепло. Это тепло и используется при электронно-лучевой обработке. Выделившееся тепло расходуется на нагрев обрабатываемого участка, расплавление материала в зоне обработки и его испарение (это полезно используемое тепло), а также на потери части тепла вслед-

ствие теплопроводности и лучеиспускания. Размерная обработка электронным лучом возможна лишь в том случае, если количество полезно используемого тепла значительно превышает потери на теплоотвод.

§ 2. Применение электронно-лучевой обработки

Электронно-лучевая обработка имеет ряд существенных достоинств, обуславливающих целесообразность ее практического применения, в том числе: создание узких зон нагрева при высокой концентрации энергии, что позволяет обрабатывать миниатюрные детали, получать весьма малые отверстия и т. д.; возможность широкой регулировки режимов тепловых процессов; пригодность для обработки как металлических, так и неметаллических материалов; высокая чистота среды при обработке и отсутствие окисляющих или загрязняющих веществ, что позволяет обрабатывать легкоокисляющиеся, тугоплавкие и подобные материалы; отсутствие специального обрабатывающего инструмента; высокий КПД.

К недостаткам электронно-лучевой обработки относятся: необходимость обработки в вакууме, необходимость защиты от рентгеновского излучения, относительно высокая стоимость и сложность оборудования.

Размерная обработка материалов электронным лучом осуществляется при удельной мощности выше $10^6 \dots 10^9$ Вт/см². Материал в зоне бомбардировки при столь высокой концентрации энергии вскипает и испаряется, образуя на детали углубление — отверстие, а при перемещении луча — рез. В зоне обработки температура достигает 6000°C , на расстоянии всего лишь 1 мкм — $280 \dots 300^\circ\text{C}$. Обрабатываемость материалов электронным лучом определяется только их теплофизическими свойствами и не зависит от механических свойств.

Обработка диэлектриков электронным лучом отличается от обработки металлов. Низкая теплопроводность диэлектриков приводит к образованию высоких температурных градиентов и остаточных термических напряжений, приводящих к растрескиванию материала. Для снижения термических напряжений обработку диэлектриков проводят с предварительным и сопутствующим подогревом, а также с последующим отжигом в вакуумной печи для полного снятия напряжений.

Для обеспечения качества обработки важное значение имеет нормирование теплового действия луча на обрабатываемую поверхность. Это достигается только импульсным управлением работой электронной пушки, например путем подачи на управляющий электрод электрических импульсов, определяющих время прохождения электронов с катода

к аноду и далее в рабочую камеру. Импульсный режим позволяет контролировать съем вещества в желаемом месте и уменьшить тепловое влияние на окружающий материал. Длительности импульсов составляют от 1 мкс до 100 мс и более.

Для получения фасонных отверстий электронный луч перемещают по обрабатываемой поверхности. В большинстве случаев отклоняющие системы выполняют в виде прямоугольных катушек, собранных попарно, причем каждая пара относительно другой смещена на 90° , так что вместе они обеспечивают отклонение электронного луча по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Управление лучом с помощью электрических систем отклонения осуществляется в пределах небольшой площади до 10×10 мм. Отклонение луча на угол более 7° приводит к сильной расфокусировке его. При обработке деталей больших размеров применяют устройства типа координатных или поворотных столов.

Диаметр получаемого отверстия приблизительно на 10% больше диаметра электронного луча при небольших глубинах обработки. При глубинах обработки, достигающих стократной величины диаметра отверстия и более, диаметр луча должен быть в два-четыре раза меньше отверстия. Точность электронно-лучевой обработки в большинстве случаев составляет 5...20% минимального диаметра отверстия или ширины реза.

Область применения электронно-лучевой обработки в зависимости от удельной мощности и длительности излучения представлена на рис. 15.

Многоимпульсная электронно-лучевая обработка позволяет изготавливать отверстия диаметром до 2 мм в материалах толщиной до 15 мм (поз. 7), задавать конусную или цилиндрическую форму отверстия. Этот метод совместно со сканированием луча используется для резки материала. Скорость резания составляет около 0,5 м/с для высокоуглеродистых сталей толщиной 2 мм.

Электронно-лучевая обработка весьма эффективна при изготовлении большого количества отверстий, расположенных близко друг от друга, например, при изготовлении фильтров. Этот процесс называют перфорированием (поз. б). Обычно скорость перфорирования составляет около

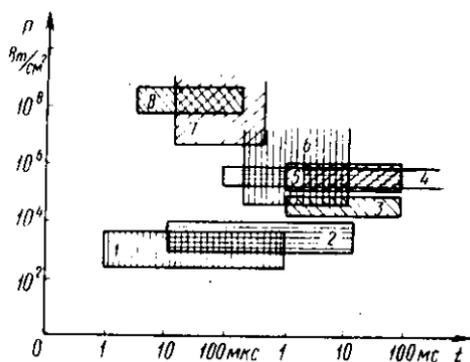


Рис. 15

3000 отв/с и в ряде случаев может быть доведена до 1 млн. отв/с.

В настоящее время осваивается область промышленного применения электронно-лучевого гравирования (поз. 8), например, валиков офсетной печати. Высокая точность управления лучом от ЭВМ дает возможность получать лунки заданной формы и глубины в соответствии с цветовым тоном и насыщенностью оригинала с производительностью до 50 000 отв/с.

Применение электронно-лучевой обработки синтетических материалов (поз. 2), например, для перфорирования искусственных кож позволяет получить значительный экономический эффект. Обувь из перфорированной искусственной кожи обладает почти всеми свойствами изделий из натуральной кожи.

Как показывает сравнение точности, качества обработки и производительности изготовления отверстий различными методами (электроэрозионным, лазерным и электронным лучами), применение электронно-лучевой обработки экономически целесообразно в том случае, если обрабатываемая деталь имеет более 100...400 отверстий.

В приборостроительной промышленности электронно-лучевая обработка применяется для изготовления микроэлементов деталей. Используя систему линз и диафрагм, можно получать лучи диаметром менее микрона, но с небольшой удельной мощностью (поз. 1). Обработка материалов такими лучами основана на использовании других (не тепловых) видов взаимодействия электронов с материалом, например, химического. Таким образом изготавливают, например, целевые диафрагмы шириной 0,5 мкм, расположенные на расстоянии 1...2 мкм друг от друга.

Сварка электронным лучом перед другими методами сварки имеет то преимущество, что электронный луч обеспечивает в сотни раз большую концентрацию энергии в месте сварки (поз. 4 на рис. 15). Глубина проплавления электронным лучом может в 20 раз и более превышать ширину шва, при этом скорость нагрева достигает $7000^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Отличием от других видов сварки является также характер распределения температур в зоне сварки, при котором уже на расстоянии 1,5 мм от сварного шва температура не превышает 400°C .

Сварка в вакууме в совокупности с высокой интенсивностью нагрева электронным лучом обеспечивает высокое качество сварного шва, так как в процессе сварки удаляются газы, окислы, примеси и загрязнения как с поверхности металла, так и из внутренних слоев. Шов получается высокопрочный. При этой сварке имеют место значительно мень-

шие деформации свариваемого изделия, вызываемые термическими напряжениями.

Широкое варьирование параметров электронного луча, большие удельные мощности в луче позволяют выполнять практически все виды швов, применяемых при сварке металлических конструкций.

Электронно-лучевая сварка в настоящее время применяется в различных отраслях промышленности. Диапазон размеров свариваемых изделий — от деталей микроэлектронных схем, где размеры сварного шва измеряются десятками микрометров, до крупных машиностроительных конструкций.

Кроме указанных областей применения электронный луч используется для термообработки (поз. 3 на рис. 15), например, для поверхностной закалки и для получения особо чистых металлов (поз. 5 на рис. 15).

Глава VI

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

§ 1. Источники лазерного излучения

Лазер, или оптический квантовый генератор (ОКГ), является источником электромагнитного излучения. Излучение может быть в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах. ОКГ обладает способностью генерировать непрерывные или импульсные световые лучи, характеризующиеся высокой плотностью энергии, не расширяющиеся на значительном расстоянии (когерентные) и монохроматичные. Для технологических целей используют лазеры на твердом теле и газовые.

Каждый атом или молекула (частица) вещества может обладать различным, но вполне определенным значением энергии и находиться на ряде вполне определенных дискретных энергетических уровней. При термодинамическом равновесии число частиц, находящихся на верхнем энергетическом уровне, значительно меньше, чем на нижнем, при этом, чем выше располагается энергетический уровень, тем меньше находится на нем частиц.

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 энергии — фотон. При переходе на нижний энергетический уровень происходит испускание энергии в виде кванта света.

Для получения электромагнитного излучения необходимо обеспечить условия, при которых число частиц, находящихся

на верхнем энергетическом уровне, будет больше, чем на нижнем, т. е. условия, противоположные термодинамическому равновесию. Это обеспечивается возбуждением частиц, называемым накачкой. Накачка осуществляется различными способами, например облучением потоком фотонов или электронов. Если после накачки на верхнем энергетическом уровне обеспечить больше частиц, чем на нижнем, и подвергнуть возбужденные частицы облучению фотонами, то произойдет лавинное размножение фотонов. Взаимодействие одного фотона с возбужденной частицей приводит к излучению еще одного фотона, движущегося в том же направлении. Эти два фотона, встретив соответственно две возбужденные частицы, образуют четыре фотона и т. д. Усилению света способствует многократное отражение его от зеркальных торцов рабочего тела, образующих волновой резонатор. Один из зеркальных торцов резонатора выполнен полупрозрачным, через него осуществляется выход излучения. В результате такого процесса можно получить узконаправленный пучок большой интенсивности.

Твердотельные лазеры. Схема лазерной технологической установки приведена на рис. 16. Лазерная головка 3 состоит

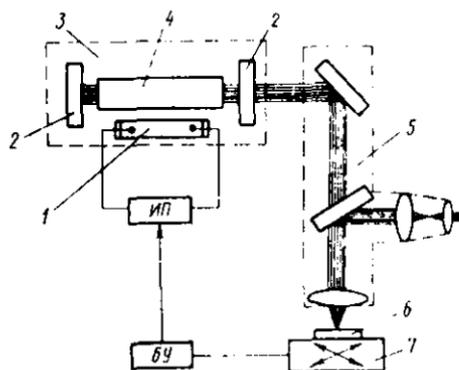


Рис. 16

из рабочего тела 4, двух зеркал - резонаторов 2, одно из них полупрозрачное, лампы накачки 1 с отражателем, оптической системы 5 для фокусировки луча на обрабатываемой детали 6, установленной на координатном столе 7; блок управления БУ управляет положением координатного стола и источником питания ИП лампы накачки.

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

Накачка ОКГ, работающих в импульсном режиме, осуществляется импульсными ксеноновыми лампами питаемых от батареи конденсаторов. Рабочее тело и лампу накачки

помещают в отражатели 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.

Газовые лазеры. Рабочим телом газовых лазеров могут быть чистые газы: ксенон, аргон, криптон, гелий, азот или смеси газов, например углекислого 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.

Газовые лазеры подразделяются на три большие группы: лазеры на атомных, молекулярных и ионных переходах. Газовые лазеры могут работать как в импульсном режиме, так и в режиме непрерывного излучения.

Основные параметры лазеров технологического назначения и области их применения приведены в табл. 5.

§ 2. Применение лазерной обработки

При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью среды оно 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^{100} C/c) и охлаждения (до 10^{80} 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.

Лазерная резка обладает существенными преимуществами по сравнению с другими методами: обширным классомрезаемых 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;

Основные параметры лазеров технологического назначения

Рабочее тело	Режим работы	Средняя мощность излучения, Вт	Частота следования импульсов, Гц	Длительность импульса	Область использования
Рубин	Импульсный	1—20	1	0,3—6 мс	Сварка, сверление
Стекло с неодимом	Импульсный	1—15	1	0,5—10 мс	Сварка, сверление, резка
ИАГ	Непрерывный Импульсный	2—110 1—100	— 1—100	— 0,01—5 мс	Испарение, сварка, резка, сверление, сварка, сверление, испарение
CO ₂ —N ₂ —He	Непрерывный Импульсный	5—1·10 ³ 1—250	— 1—1·10 ³	— 5—150 мкс	Резка, сварка, термообработка Сверление
Ag	Непрерывный Импульсный	1—15 1—20	— 1—1·10 ³	— 5—100 мкс	Сварка Испарение

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 резы с малой шероховатостью и обеспечить высокую точность реза.

При резке металлов 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. Показатели лазерной резки приведены в табл. 6.

Таблица 6

Показатели лазерной резки листового материала

Материал	Толщина листа, мм	Мощность излучения, Вт	Скорость резания, м/мин
Малоуглеродистая сталь	8,0	400	0,6
	3,8	400	2,3
	1,2	400	4,6
Нержавеющая сталь	9,0	850	0,36
	5,0	850	0,6
	0,5	250	2,6
Титан	1,0	600	1,5
	0,5	850	3,2
Фанера	17,0	500	0,5
	6,3	850	5,0
Бумага газетная	—	200	600

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, при-

водящие к образованию кольцевой трещины и сколу. В зависимости от скорости роста термических напряжений высота микронеровностей R_z поверхности раздела составляет 40...0,2.

Лазеры непрерывного излучения небольшой мощности применяются для нарезки резисторов путем удаления резистивного слоя в нужных местах с керамической подложки. Для этого излучение фокусируется на поверхности заготовки, которая вращается вокруг продольной оси и одновременно перемещается вдоль нее. Нарезка резисторов с помощью лазеров позволяет уменьшить их габариты и совместить нарезку с контролем, прекращая практически мгновенно процесс при достижении заданного номинала. Скорость нарезки достигает 12 м/мин.

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

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

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

Применение лазерного сверления позволило решить важные технологические задачи. Так, отечественная промышленность полностью перешла на лазерную обработку часовых камней. Решена проблема черного профилирования алмазных волок с последующей доводкой ультразвуковым методом. Бесконтактное удаление материала позволяет производить динамическую балансировку гироскопов.

Формирование фигурных изображений выполняется различными способами, наиболее распространены проекционный и контурно-лучевой методы.

При проекционном методе (рис. 17) пучок света лазера 1 расширяется с помощью оптической системы 2 и освещает трафарет 3. Далее фокусирующая линза 4 уменьшает изображение и проецирует его на обрабатываемую деталь 5. Этот метод применяется для нанесения знаков на изделие, не допускающее механического воздействия, и для получения интегральных схем в микроэлектронике. Наименьший

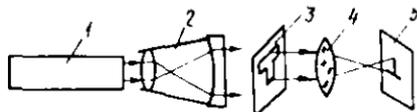


Рис. 17

размер элемента при обработке тонких пленок проекционным методом достигает 1,1 — 1,5 мкм. При обработке используется, как правило, многоимпульсный режим.

При контурно-лучевом методе изображение получается в результате последовательного обхода остро сфокусированным лазерным лучом требуемого контура. Обход контура осуществляется за счет перемещения образца или сканирования лазерного луча по программе, задаваемой системой управления. Этот способ применяется для гравирования и получения интегральных схем. При этом наибольшая скорость нанесения изображения достигает 18 см/мин при погрешности положения и размеров элементов $\pm 1,5$ мкм.

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, чем резка, 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 излучения материала, например графита.

С помощью лазерной сварки можно получать высококачественные соединения из нержавеющей стали, молибдена, кобальта, 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. Ла-

зерная сварка наиболее эффективно применяется для сваривания легкодеформирующихся деталей, при сварке в труднодоступных местах, при необходимости обеспечить особо чистый шов с минимальной зоной термического влияния.

Глава VII

МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

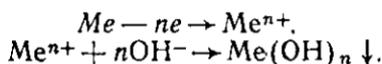
§ 1. Основные закономерности анодного растворения металлов

Анодное растворение металлов в среде электролита при прохождении постоянного электрического тока лежит в основе размерной электрохимической обработки.

При погружении металла в электролит, например в водный раствор нейтральных солей, молекулы которых обладают значительным дипольным моментом, возникают условия, при которых возможны преодоление катионом металла энергетического барьера и переход его с поверхности металла в раствор. Полярные молекулы растворителя группируются около катионов, находящихся на поверхности металла, и способствуют их переходу в раствор. После перехода катиона в раствор число зарядов катионов в металле стало меньше, чем число электронов. Поверхность металла приобрела избыточный отрицательный заряд, а раствор — избыточный положительный заряд. Переход следующего катиона в раствор связан с преодолением большего энергетического барьера, его удерживает отрицательно заряженная поверхность металла и отталкивает раствор, заряженный положительно.

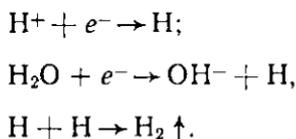
Катионы, переходящие в раствор, располагаются вблизи поверхности металла и не могут удалиться от нее в глубь раствора. Этому препятствует электростатическое притяжение между катионами и избыточными электронами на поверхности металла. По мере увеличения концентрации катионов у поверхности металла возрастает вероятность обратного перехода, т. е. возвращения катиона на поверхность металла. Постепенно на границе металл — раствор устанавливается динамическое равновесие, при котором число катионов, переходящих в раствор, равно числу катионов, возвращающихся на поверхность металла. Между поверхностью металла и катионами, перешедшими в раствор, существует разность потенциалов, называемая равновесным потенциалом поляризации ϕ . Равновесный потенциал поляризации на границе металл — электролит определяется их природой.

При подаче напряжения на электроды равновесный потенциал изменяется. На аноде из-за отвода электронов источником питания значительно облегчается переход катионов металла в раствор (рис. 18). Перешедшие в раствор катионы металла вступают в реакцию с ионами электролита и образуют нерастворимый осадок. Этот процесс можно записать следующим образом:



Первое уравнение описывает процесс отвода электролита с анода и переход катиона металла в раствор, второе — отражает результаты сложного процесса образования гидрата окиси металла.

При подаче напряжения на катоде переход катионов металла в раствор из-за избытка электронов становится невозможным. На катоде происходит выделение водорода по следующим схемам:



Из приведенных реакций видно, что при прохождении постоянного тока через электроды, погруженные в раствор электролита, могут быть созданы условия, при которых растворяется анод и, следовательно, изменяется его форма. На катоде выделяется водород, поверхность катода не изменяется. Это позволяет использовать анодное растворение для размерной обработки металлов.

Процесс электрохимической обработки, использующий анодное растворение, описывается законом Фарадея

$$m = \eta a I t, \quad (5)$$

где m — масса растворенного материала; a — электрохимический эквивалент растворяемого материала; I — ток между электродами; t — время; η — выход по току.

Электрохимический эквивалент прямо пропорционален атомному весу металла A_0 и обратно пропорционален валентности, с которой он переходит в раствор. Электрохими-

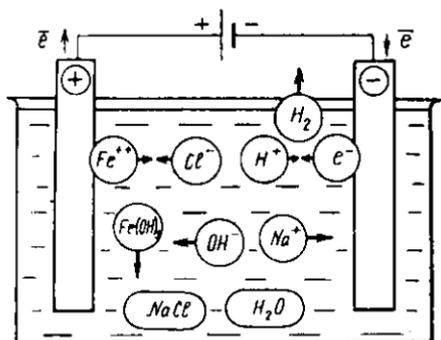


Рис. 18

ческий эквивалент элемента рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{A_2}{nF},$$

где F — число Фарадея, равное $96\,500$ Кл $\equiv 26,8$ А · ч.

Значения электрохимических эквивалентов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Электрохимические эквиваленты некоторых металлов

Материал	Валентность	Электрохимический эквивалент	Материал	Валентность	Электрохимический эквивалент
Вольфрам	6	1,140	Молибден	3	1,190
	8	0,860		4	0,894
Железо	2	1,040		6	0,598
	3	0,694	Никель	2	1,100
Кобальт	2	1,100		3	0,730
	3	0,746	Титан	3	0,594
Марганец	2	1,03		4	0,450
	4	0,512	Хром	?	0,973
	6	0,340		3	0,650
	7	0,294		6	0,323

Электрохимический эквивалент сплава α_c рассчитывается по формуле

$$\alpha_c = \frac{100}{\sum c_i \alpha_i},$$

где c_i — процентное содержание i -го элемента в сплаве; α_i — электрохимический эквивалент i -го элемента.

Выход по току — безразмерная величина, которая учитывает отклонение реального процесса от идеального анодного растворения. Выход по току при электрохимической обработке зависит от условий, при которых реализуется процесс, от состава электролита, степени его загрязнения продуктами реакций, температуры, плотности тока и других факторов. На практике выход по току определяется экспериментально для конкретных условий обработки.

Скорость анодного растворения v_p обычно выражается в мм/мин. Подставляя в формулу (5) выражение для массы растворенного вещества

$$m = \rho_m z S$$

(где ρ_m — плотность материала; z — толщина растворенного припуска; S — площадь обработки) и переходя к бесконечно малым величинам, получаем

$$v_p = \frac{dz}{dt} = \eta \frac{a}{\rho_m} i, \quad (6)$$

где i — плотность тока.

Напряжение на электродах U складывается из падений напряжения в электролите U_a и в приэлектродных областях φ_z и называется суммарным потенциалом поляризации.

Суммарный потенциал поляризации складывается из потенциала поляризации анода φ_a , падения напряжения в диффузионном анодном слое ΔU_a , вызванного различной концентрацией реагирующих веществ и продуктов растворения в диффузионном слое и основном потоке электролита, падения напряжения в диффузионном катодном слое ΔU_k и потенциала поляризации катода φ_k :

$$u = u_a + \varphi_z = \varphi_a + \Delta U_a + \Delta U_k + \varphi_k. \quad (7)$$

Падение напряжения в электролите рассчитывается по формуле

$$U_a = IR_a,$$

где R_a — сопротивление электролита между электродами.

Учитывая, что $R_a = a/\kappa S$, получаем

$$U_a = i \frac{a}{\kappa}, \quad (8)$$

где a — расстояние между электродами; κ — удельная электропроводность электролита.

Подставляя (7) и (8) в (6), получаем

$$v_p = \eta \frac{\kappa a (U - \varphi_z)}{\rho_m a} = \frac{A}{a},$$

где A — характеристика режима.

Значения удельной электропроводности электролитов, наиболее часто применяемых при электрохимической обработке, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Удельная электропроводность электролитов при $T = 18^\circ \text{C}$

Электролит	Удельная электропроводность ($\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$) при концентрации, %			
	5	10	15	20
KCl	0,069	0,136	0,202	0,268
NaCl	0,067	0,121	0,164	0,196
KNO ₃	0,045	0,084	—	—
NaNO ₃	0,0436	0,0782	0,1041	0,130
Na ₂ SO ₄	0,041	0,069	0,089	—

Потенциал поляризации наиболее полно характеризует процессы, происходящие при электрохимической обработке. Зависимость плотности тока от потенциала поляризации называется поляризационной характеристикой. Поляризационная характеристика определяется экспериментально и зависит от обрабатываемого материала, состава электролита, его температуры и других параметров процесса. Типичная поляризационная характеристика приведена на рис. 19. Участок

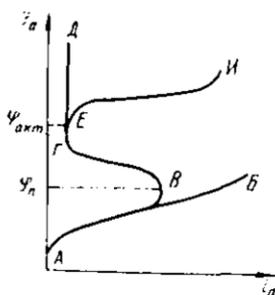


Рис. 19

АВ кривой соответствует активному анодному растворению. Для этого участка характерна почти пропорциональная связь между плотностью тока и приложенным напряжением к электродам.

Для некоторых материалов и электролитов характерно пассивное состояние, при котором на анодной поверхности образуется окисная пленка, оказывающая экранирующее воздействие и приводящая к росту потенциала поляризации и снижению плотности тока. Пассивация может наступить также из-за образования на поверхности металла

адсорбционных слоев из продуктов растворения. Точка В кривой и $\phi_{п}$ характеризуют начало пассивации. Участок ГД соответствует полной пассивации.

В ряде случаев возможна активация пассивного состояния, при котором разрушается пассивная пленка и процесс снова переходит в активный. Активации соответствует точка Е кривой и $\phi_{акт}$. Такое состояние называется транс-пассивным и ему соответствует участок ЕН.

Электрохимическая обработка в зависимости от вида поляризационной характеристики может осуществляться в активном, пассивном и транс-пассивном состоянии.

Формирование микроповерхности в активном состоянии.

При анодном растворении в активном состоянии из-за структурной неоднородности материала распределение плотности тока неравномерно. На границах зерен и прослойки плотность тока больше, чем в середине зерна. Поэтому растворение границ происходит более интенсивно, что приводит к их скруглению. Толщина прослойки значительно меньше размеров зерен, поэтому растворение ее происходит практически одновременно с растворением границы зерен, и микроповерхность приобретает вид, показанный на рис. 20, где 1 — зерно, 2 — прослойка. Высота микронеровностей R_2 при растворении в активном состоянии составляет обычно 1... 1,2. Высота микронеровностей существенно зависит от размеров зерен и с уменьшением размера зерна уменьшается.

Формирование микроповерхности в транспассивном состоянии. В транспассивном состоянии обрабатываются титановые сплавы, например сплав ТС-5 в растворе NaNO_3 . При анодном растворении в начальный момент на поверхности титана (рис. 20) происходит интенсивный рост окисной пассивной пленки 1, вследствие чего снижается плотность тока и увеличивается потенциал поляризации. Дальнейшее повышение потенциала поляризации приводит к активации анодной поверхности в результате местных разрушений 2 пассивной пленки и к образованию очагов 3 с активным со-

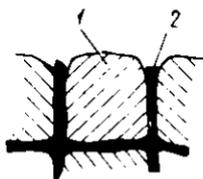


Рис. 20

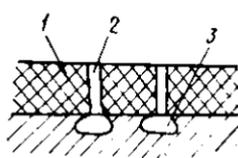


Рис. 21

стоянием поверхности. Вследствие развития очагов и дальнейшего разрушения пассивной пленки обрабатываемая поверхность постепенно переходит полностью в активное состояние. Этот переход сопровождается нарастанием плотности тока и резким ухудшением качества поверхности до $R_z = 200 \dots 300$. В дальнейшем механизм формирования микроповерхности полностью соответствует процессу при активном анодном растворении.

§ 2. Классификация электрохимических методов обработки

Электрохимические методы по способу съема материала и удаления продуктов обработки из рабочей зоны можно разделить на три основные группы.

Электрохимическая обработка (анодно-гидравлическая) — материал растворяется в активном состоянии, продукты растворения удаляются потоком электролита.

Анодно-абразивная — это совмещенный способ обработки, при котором наряду с электрохимическим растворением происходит механическое резание материала абразивными зернами. Растворение материала возможно как в активном, так и в пассивном состоянии. Продукты обработки удаляются потоком электролита и инструментом.

Анодно-механическая — растворение происходит в пассивном состоянии, инструмент оказывает депассивирующее воздействие на обрабатываемую поверхность. Продукты обработки удаляются в основном либо инструментом, либо абразивом.

На рис. 22 приведена такая классификация с указанием основных технологических операций, выполняемых с помощью данных методов. Разновидности электрохимических методов обработки значительно отличаются по технологическим возможностям и областям применения.



Рис. 22

§ 3. Технологические показатели электрохимической обработки

Электрохимическая (анодно-гидравлическая) обработка фасонных поверхностей. Способ электрохимической размерной обработки (ЭХО) в проточном электролите предложен в 1928 г. В. Н. Гусевым. При электрохимической обработке на обрабатываемую анод-деталь и катод-инструмент, находящиеся в электролите, подается напряжение порядка 12 В от источника постоянного тока. В качестве электролита используются преимущественно растворы нейтральных солей NaCl и NaNO₃. Материал растворяется в активном состоянии. Продукты растворения — газы, окислы и гидраты окислов — удаляются из межэлектродного промежутка потоком электролита, скорость которого 10—15 м/с. Зазор между электродами во время обработки составляет 0,05...0,5 мм. Плотность тока при этом достигает 20—100 А/см², а ток в зависимости от площади обработки — 10 000 А. При этих условиях скорость растворения может достигать 5 мм/мин при $R_z = 1,5...5$ мкм. Точность копирования формы катода-инструмента на детали достигает 0,05...0,3 мм. Обработка осуществляется без силового воздействия инструмента на деталь, катод-инструмент практически не изнашивается.

Процесс формообразования поверхности происходит следующим образом. В начале обработки участки профиля катода-инструмента расположены на различных расстояниях

от обрабатываемой поверхности. Где меньше зазор, там больше плотность тока, там выше скорость растворения. В результате такого неравномерного распределения скоростей растворения зазоры между электродами постепенно выравниваются и поверхность детали приобретает форму, близкую к форме катода-инструмента.

ЭХО целесообразно применять для обработки деталей из жаропрочных, титановых и других высокопрочных сталей и сплавов, скорость резания которых не превышает 10 м/мин. В ряде случаев ЭХО оказывается эффективной при обработке деталей из обычных конструкционных материалов, но имеющих сложную форму. Это объясняется тем, что при ЭХО происходит копирование формы инструмента на детали сразу по всей поверхности.

Основные технологические операции, выполняемые ЭХО, — прошивание сквозных и глухих отверстий как круглых, так и фасонных, изготовление фасонных полостей. Преимущественная область применения — изготовление ковочных штампов и пресс-форм, изготовление деталей сложной формы, таких как турбинные лопатки, винтовые поверхности, а также удаление заусенцев, клеймение и маркирование.

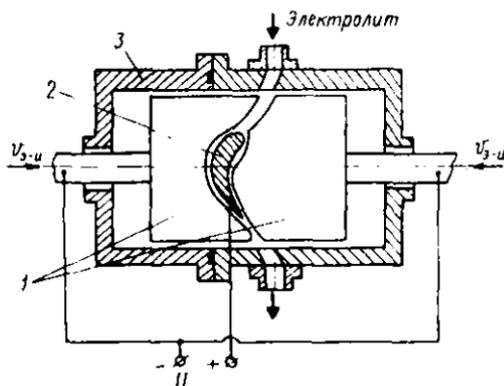


Рис. 23

Перед электрохимической обработкой детали, как правило, обезжириваются для удаления масла, эмульсии и других жировых загрязнений. После обработки остатки электролита с детали смываются проточной водой или в ультразвуковой ванне. Для предохранения от коррозии детали пассивируют.

Наиболее широкое промышленное применение ЭХО нашла при обработке сложных поверхностей, например, таких как у пера турбинной лопатки (рис. 23). Заготовка 2 устанавливается в герметичном контейнере 3 и обрабатывается одновременно с двух сторон двумя катодами-инструмен-

тами 1. Штампованную заготовку предварительно обрабатывают механически: обрезают облой, удаляют окалину, подрезают входные и выходные кромки, подготавливают базовые поверхности для крепления. Точность ЭХО подобных деталей составляет 0,2...0,3 мм и в большинстве случаев исключает слесарную доводку, что экономически выгоднее обработки на копировально-фрезерных станках или на другом оборудовании при объеме партии более 100 шт.

ЭХО сложных поверхностей типа гравюр ковочных штампов, пресс-форм, литейных форм и им подобных проводится после термообработки и шлифования базовых поверхностей. Припуск под окончательную слесарную доводку определяется точностью и обычно не превышает 0,3...0,4 мм. ЭХО штампов экономически целесообразно при объеме партии свыше 35...40 штук в год.

Установка для электрохимической обработки фасонных поверхностей копировально-прошивочного типа (рис. 24) представляет собой комплекс оборудования, включающий

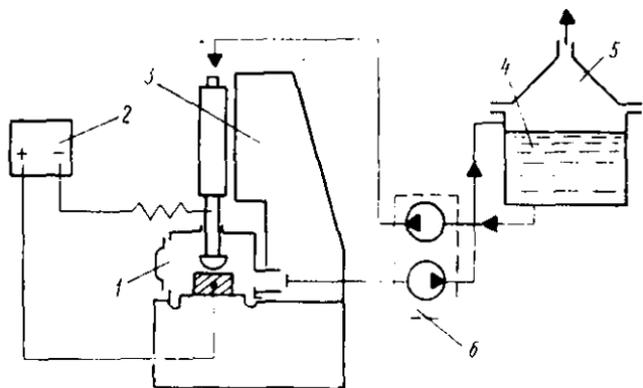


Рис. 24

собственно станок 3, источник технологического тока 2 с токоведущими шинами, систему стабилизации и контроля технологических параметров, систему подачи и очистки электролита. Насосный агрегат 6 осуществляет подачу электролита в зону обработки и возвращение его в баки 4. Установка имеет приточно-вытяжную вентиляцию 5, обеспечивающую безопасную концентрацию водорода. Для защиты от разбрызгивания электролита обработка ведется в закрытой камере 1.

Удаление заусенцев и скругление острых кромок. Электрохимический метод позволяет эффективно удалять заусенцы любых размеров, в том числе расположенные в труднодоступных местах, а также совмещать травление заусенцев

с операциями по доводке и калибровке. Локальность процесса достигается благодаря работе на малых зазорах, применению катодов в виде узких ленточек, повторяющих конфигурацию обрабатываемых кромок, и изоляции нерабочих участков катода и анода.

Для съема заусенцев в местах сопряжения двух отверстий (рис. 25) электролит через полый катод-инструмент 3 с изоляцией 2 попадает в зону обработки, а затем через отверстия в аноде-детали 1 возвращается в баки.

Качество съема заусенцев, равномерности и плавности скругления и шероховатости поверхности на кромках весьма высокое. Отсутствие износа катода-инструмента и использование неподвижных электродов в процессе обработки создают благоприятные условия для автоматизации.

Клеймение и маркирование деталей. Электрохимическое маркирование по трафарету производится следующим образом (рис. 26). Маркируемую деталь 5 устанавливают на контактной плите 1, присоединенной к положительному полюсу источника питания. К отрицательному полюсу присоединяют электрод 2 маркера. Электрод маркера покрыт прокладкой 3 из сукна, войлока или другого материала, смоченного электролитом. На прокладку накладывается трафарет 4, в котором вырезаны требуемые для маркирования знаки. При легком прижатии маркера к детали электролит

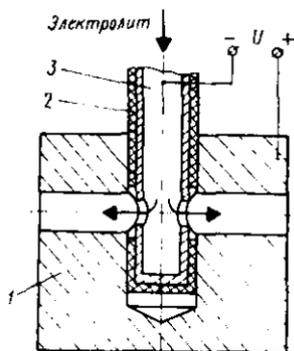


Рис. 25

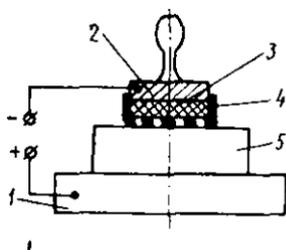


Рис. 26

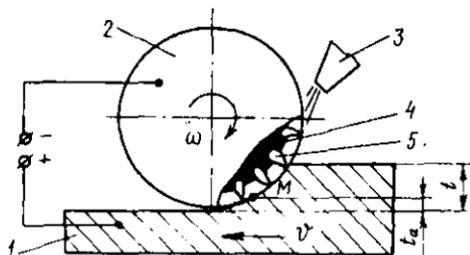


Рис. 27

из прокладки заполнит вырезы в трафарете. При включении тока происходит анодное растворение поверхности детали в открытых местах трафарета.

При электрохимической бестрафаретной маркировке изготавливают из металла гравированием катод-инструмент, у которого промежутки между знаками заполнены изолирую-

щей пластмассой. В этом случае для маркирования поверхность детали смачивают электролитом и устанавливают катод-инструмент с незначительным зазором.

Маркирование может производиться как на постоянном, так и на переменном токе напряжением от 6 до 20 В. В зависимости от режима маркирования глубина клеймения может достигать нескольких десятых долей миллиметра или определяться только толщиной темной оксидной пленки в 2—3 мкм. Время маркирования при нанесении оксидной пленки составляет 1—2 с. При глубоком маркировании время определяется глубиной клейма и может достигать 25 с.

Анодно-абразивное шлифование осуществляется абразивными кругами в среде электролита при прохождении электрического тока (рис. 27). Обрабатываемая деталь 1 подключается к положительному полюсу источника питания напряжением 6...12 В, а вращающийся абразивный круг 2 — к отрицательному. Особенность абразивных кругов, применяемых при анодно-абразивном шлифовании, в том, что абразивные зерна 5 находятся в токопроводящей связке 4. Электролит подается из сопла 3 на абразивный круг и увлекается в зону обработки.

При анодно-абразивном шлифовании имеются два характерных участка с различным механизмом съема припуска t . На участке $t-t_a$ съем металла осуществляется в результате совместного воздействия анодного растворения, механического резания абразивными зернами и электроэрозионных разрядов. На участке t_a съем осуществляется только в результате анодного растворения. Точка M является границей перехода от комбинированного съема к анодному растворению.

В зависимости от величины подачи v соотношение между величинами припусков, снимаемых комбинированно и анодно, изменяется. С увеличением скорости подачи увеличивается и величина припуска, снимаемого комбинированно. При этом появляется искрение, вызываемое наличием в зазоре стружки, снимаемой абразивными зернами. При дальнейшем увеличении скорости подачи пространство между зернами заполняется продуктами шлифования, зазор между связкой круга и обрабатываемой поверхностью уменьшается, и процесс переходит в электроконтактный. Этот режим приводит к резкому увеличению износа шлифовального круга и к снижению качества обработки. Предпочтительны режимы, при незначительном искрении, которые обеспечивают высокие производительность и качество обработки. Съем металла при анодно-абразивном шлифовании значительно превышает сумму съемов, взятых отдельно при механическом шлифовании и электрохимической обработке вращающимся элект-

тродом-инструментом. При обычном механическом шлифовании вязких материалов, таких как нержавеющие стали, жаропрочные сплавы, сплавы на основе цветных металлов, обрабатываемый материал налипает на абразивные зерна, вследствие чего снижается режущая способность абразивных зерен. При этом возрастают усилия резания, повышается температура в зоне резания и появляются прижоги и микротрещины. При анодно-абразивном шлифовании за счет анодного растворения стружки и выделения водорода предотвращается как налипание металла на поверхность зерен, так и заполнение промежутков между зернами продуктами шлифования. Получаемую разницу в съемах можно объяснить именно различными условиями работы абразивного зерна при шлифовании, поскольку режущая способность зерен, работающих в режиме анодно-абразивного шлифования, значительно выше, чем зерен того же круга без наложения тока.

Анодно-абразивное шлифование применяется для шлифования плоскостей, тел вращения, фасонных профилей и заточки режущего инструмента по схемам, аналогичным механическому шлифованию. Наиболее полно преимущества этого способа проявляются при глубинной схеме шлифования фасонных профилей, снимаемый при этом припуск может достигать 10 мм за один проход. При этом обеспечивается производительность 2000...4000 мм³/мин, износ круга составляет 2,7—4,7%, время между правками круга 60...80 мин, высота микронеровностей обрабатываемой поверхности 3,5...6,0 мкм.

Разновидностью анодно-абразивной обработки является электроалмазное шлифование. В этом случае электродом-инструментом служит алмазный диск на металлической связке. По сравнению с обычным алмазным шлифованием электроалмазное обеспечивает большую стойкость инструмента и более высокую производительность. Наиболее широко электроалмазная обработка применяется при заточке твердосплавного режущего инструмента.

Анодно-абразивная зачистка литых деталей. Способ анодно-абразивной зачистки литых деталей предложен в 1962 г. группой ленинградских инженеров. В основе этого процесса лежит анодное растворение с одновременным удалением продуктов растворения гранулами свободного абразива.

На рис. 28 приведена схема анодно-абразивной зачистки. Обрабатываемая деталь 1 вместе с электродом 2 закрепляется на вращающейся планшайбе станка. Межэлектродный зазор заполняется электролитом и абразивными гранулами 3.

В результате анодного растворения на поверхность изделия оседает слой продуктов обработки, который препятствует дальнейшему растворению поверхности. При вращении детали абразивные гранулы удаляют этот слой в основном с гребешков микронеровностей. На оголенных участках снова происходит анодное растворение. Во впадинах слой

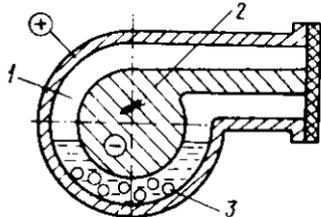


Рис. 28

продуктов обработки сохраняется, и на этих участках растворение не происходит. Из-за различных скоростей растворения на выступах и во впадинах микрорельеф поверхности сглаживается. Съем металла осуществляется только за счет анодного растворения, а абразив оказывает лишь депассивирующее воздействие.

Окружная скорость обрабатываемой поверхности детали находится в пределах 10...20 м/мин. При меньших скоростях воздействие абразива на продукты обработки незначительно, при больших скоростях абразив увлекается поверхностью детали. Для обеспечения равномерного воздействия абразива на все участки обрабатываемой поверхности направление вращения планшайбы периодически изменяется.

В качестве абразива применяют абразивный или керамический бой, а также используют фарфоровые шары диаметром 5...6 мм. Абразив должен заполнять 25...40% объема межэлектродного промежутка. Межэлектродный зазор составляет 10...15 мм.

Напряжение на электродах обычно не превышает 24 В. При плотности тока 0,8—1,2 А/см² время обработки составляет 60...80 мин. Шероховатость обработанной поверхности R_z достигает 40...10 мкм после удаления припуска 0,5...0,8 мм. Время анодно-абразивной зачистки не зависит от размеров и конфигурации обрабатываемой полости, а определяется материалом детали и режимами обработки. Поэтому наибольший экономический эффект достигается при обработке крупных деталей сложной конфигурации.

Анодно-механическое полирование применяется для отделочных операций деталей из нержавеющей стали, красной меди и других вязких металлов и сплавов. Обработка происходит в пассивном состоянии.

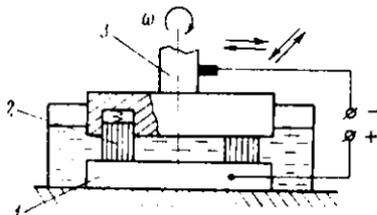


Рис. 29

Схема обработки приведена на рис. 29. Полировальная

головка 3 оснащена притирами 2, изготовленными из пластмассы или из мягких пород дерева. Могут применяться также и абразивные бруски. Корпус полировальной головки соединяют с отрицательным полюсом источника технологического тока, а обрабатываемую деталь 1 — с положительным. Зазор между полировальной головкой и деталью заполняется электролитом с мелкодисперсным абразивным порошком. В процессе полирования головка совершает вращательное и осциллирующее движения.

Параметры обработки и состав электролита подбираются такими, чтобы образовалась пассивная пленка, плотно прилегающая к анодной поверхности и препятствующая дальнейшему растворению (рис. 30). Под действием притиров и

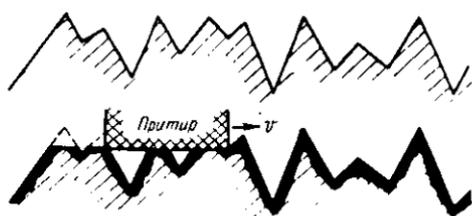


Рис. 30

абразивного порошка, находящегося в электролите, эта пленка удаляется с микровыступов. Во впадинах пассивная пленка сохраняется и препятствует дальнейшему растворению. Оголенные участки вновь подвергаются анодному растворению с образованием пассивной пленки, которая затем удаляется притирами. Поверхность после анодно-механического полирования имеет зеркальный блеск и высоту микронеровностей $R_z = 0,8$ мкм.

В качестве электролитов применяются водные растворы фосфорнокислых и азотнокислых солей, абразивными порошками служат окись хрома или корунд.

Анодно-механическое полирование применяется для чистой отделки полостей, наружных и внутренних поверхностей тел вращения. Съем металла незначителен и составляет от десятков микрометров до нескольких сотых долей миллиметра.

Убедительным примером описываемого метода является полирование глянцевоочных листов из нержавеющей стали площадью 1500×1500 до высоты микронеровностей $R_z < 0,2$. Листы обрабатываются в два перехода: предварительный — со свободным абразивом — и окончательный — с окисью хрома. Время обработки в зависимости от состояния исходной поверхности составляет от 2 до 4 ч.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

В машиностроении и приборостроении ультразвук применяется для размерной обработки особо хрупких материалов, сварки и пайки металлов, очистки деталей, интенсификации процессов резания, обработки металлов давлением, электрохимической обработки, поверхностного упрочнения металлов и др.

§ 1. Основные представления об ультразвуке

Бегущая волна упругих деформаций. Ультразвук, как и слышимый звук, представляет собой гармоническую волну упругих деформаций. Это означает, что деформации, возбуждаемые в некоторой области упругой среды или тела по гармоническому закону, распространяются по этой среде (телу) согласно выражению

$$\epsilon = \epsilon_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right). \quad (9)$$

Из (9) следует, что в любой заданной точке среды деформации ϵ изменяются во времени t также по гармоническому закону с угловой частотой ω (или частотой $f = \omega/2\pi$), но со сдвигом по фазе, пропорциональным координате x . В любой момент времени распределение деформаций вдоль оси x подчиняется также гармоническому закону с длиной волны $\lambda = v/f$. Любому фиксированному значению деформации соответствует постоянное значение аргумента $t - \frac{x}{v} = \alpha$ или $x = vt + \beta$, где α и β — постоянные. Из этого видно, что значение деформации в волне, а следовательно и волна в целом, перемещаются или, как обычно говорят, распространяются со скоростью v . Волна, описываемая выражением (9), называется бегущей волной.

Распространяться в виде волны способны все типы деформаций в жидкостях и газах — деформации растяжения-сжатия, а в твердых телах кроме того изгибные и крутильные. В ультразвуковой технике и технологии наиболее широкое применение нашли волны сжатия-растяжения, называемые продольными волнами.

Скорость распространения упругих волн является функцией отношения жесткости к инертности среды, в которой волна распространяется. Так, например, в тонком стержне для продольной волны $v_n = (E/\rho)^{0,5}$, для волны крутильных деформаций $v_x = (G/\rho)^{0,5}$, для изгибных $v_k = \omega^{0,5} (EJ/\rho S)^{0,25}$, где E , G и ρ — модули упругости и плотность материала

стержня; J и S — момент инерции и площадь поперечного сечения стержня. Значение v_n для стержней из железа, никеля, алюминия, кобальта или из их сплавов примерно равно 5000 м/с, для воды — 1500 м/с, а для воздуха — 330 м/с.

Частотные диапазоны. Для технологических целей наиболее эффективен нижний участок ультразвукового диапазона частот — от 20 до 25 кГц, а для контрольно-измерительных и информационных систем — средний его участок: от 1 до 10 МГц.

Соотношения между колебательными переменными. Относительная упругая деформация ϵ всегда сопровождается механическим напряжением σ и смещением ξ частиц среды от их нейтрального положения. В волне, как и при статических упругих деформациях, напряжение σ определяется по закону Гука (для продольной волны $\sigma = E\epsilon$). Смещение ξ определяется интегрированием ϵ вдоль оси x , а скорость $\dot{\xi}$ смещения частиц среды и их ускорение $\ddot{\xi}$ — первой и второй производными смещения ξ по t . Каждая из приведенных переменных, определяющих состояние и поведение частиц среды в бегущей волне, является гармонической функцией аргумента $(t - \frac{x}{v})\omega$. Эти переменные — ϵ , σ , ξ , $\dot{\xi}$ и $\ddot{\xi}$ — в дальнейшем будем называть колебательными переменными упругой волны. В бегущей волне справедливо $\sigma = R\dot{\xi}$, где $R = \rho v$. Величина R называется волновым сопротивлением среды и характеризует ее волновые свойства.

Интенсивность бегущей волны. Бегущая волна представляет собой поток механической энергии. Удельная мощность или, как говорят, интенсивность бегущей волны определяется выражением $I = \sigma_m \dot{\xi}_m / 2 = \sigma_m^2 / 2R$, где σ_m и $\dot{\xi}_m$ — амплитуды соответствующих колебательных переменных. Как видно из формулы, максимальная интенсивность ультразвука ограничена прочностью материала волновода. В воде при $f = 20$ кГц она не превышает $1 \dots 2$ Вт/см². Для сравнения отметим, что это примерно в тысячу раз больше интенсивности звука оружейного залпа. В сталях по их прочностным характеристикам интенсивность ультразвука может быть на $3 \dots 4$ порядка больше, чем в воде.

Потери энергии существенно зависят от свойств среды. Так, например, в железе они в сто раз больше, чем в алюминии, и в миллион раз меньше, чем в резине.

Поведение волны на границе сред. На границе двух сред упругая волна частично отражается и частично проходит в соседнюю среду. Количественно поведение волны на границе определяется углом ее падения на границу и соотношением волновых сопротивлений граничащих сред. Волна тем

лучше проникает через границу, чем меньше отличаются друг от друга волновые сопротивления граничащих сред. Так, например, через границу железа с воздухом проникает лишь тысячная доля процента энергии падающей волны, через границу железа с водой около 13%, а через границу железа и никеля — почти 100%.

Стоячая волна. Отраженная от границы волна налагается на исходную волну и образует с ней так называемую стоячую волну. Деформации в стоячей волне описываются выражением

$$\varepsilon = 2\varepsilon_m \cos kx \sin \omega t, \quad (10)$$

где $k = \omega/v$ — постоянная распространения.

Все остальные колебательные переменные стоячей волны — σ , ξ , ξ и ξ — находятся из (10) в результате таких же преобразований, что и для бегущей волны.

Стоячая волна существенно отличается от бегущей волны. Амплитуды ее колебательных переменных, как видно из (10), не постоянны, а изменяются (модулированы) вдоль оси x по гармоническому закону. Между модулирующими функциями переменных ε и σ , с одной стороны, и переменных ξ , ξ и ξ , с другой, имеет место сдвиг по фазе на четверть длины волны так, что максимальные амплитуды ε и σ размещены в точках волны, где переменные ξ , ξ и ξ равны нулю, а максимальные амплитуды последних — там, где равны нулю деформации и напряжения. В результате такая волна не только неподвижна, но и не передает энергию, ее мощность равна нулю.

В то же время плотность механической энергии, а также максимальные амплитуды колебательных переменных у такой стоячей волны в два раза больше, чем у возбуждающей ее бегущей волны. Этот эффект многократно увеличивается, если среда по направлению распространения возбуждающей волны ограничена и расстояние l между границами кратно половине длины волны, а именно: $l = n \frac{\lambda}{2}$, где n — целое число.

В этом случае стоячая волна образуется в результате прямого наложения теоретически бесконечного числа волн, отраженных от границ среды. Максимальные амплитуды колебательных переменных в такой стоячей волне достигают значительно больших значений, чем у бегущей волны. Это явление подобно резонансу дискретной колебательной системы и поэтому часто его называют резонансом континуальной колебательной системы. В отличие от дискретных систем

континуальные системы имеют бесконечный спектр резонансных частот:

$$P_n = n \frac{v}{2l}. \quad (11)$$

Укажем, что формула (11) справедлива в том случае, если границы возбужденной среды свободны.

Стоячая волна благодаря ее способности накапливать энергию и увеличивать амплитуды колебательных переменных широко используется в ультразвуковых технических и технологических устройствах.

Распространение ультразвука в жидкостях сопровождается нередко рядом нелинейных эффектов, таких как акустические течения, радиационное давление, кавитация, звукокапиллярный эффект.

Возбуждение ультразвука в технологических установках осуществляется чаще всего магнитострикционными преобразователями. В этих преобразователях используется свойство ферромагнитных материалов изменять в магнитном поле свои размеры вдоль магнитных линий в зависимости от напряженности H поля. Достигаемое при этом предельное значение относительной деформации ϵ_m для лучших магнитострикционных материалов, таких как никель, сплав кобальта с железом и сплав алюминия с железом, не превышает величины $(45 \dots 70) \cdot 10^{-6}$.

Конструкция магнитострикционного преобразователя наиболее распространенного типа представлена на рис. 31, а. Преобразователь состоит из двухстержневого пакета, изготовленного из склеенных друг с другом тонких пластин магнитострикционного материала, и двух электрических обмоток, намотанных на стержни пакета. Одна обмотка запитывается переменным током, частота которого равна частоте возбуждаемого ультразвука, вторая — постоянным током. Суммарный магнитный поток, создаваемый обмоткой, очевидно, является униполярным, гармоническим и распространяется по стержням и перемычкам пакета, как показано штриховой линией на рис. 31, а. Стержни пакета деформируются (растягиваются и укорачиваются) синхронно с частотой возбуждения магнитного поля.

Для увеличения амплитуды деформаций и других колебательных переменных преобразователя используется эффект стоячей волны. Для этого длина пакета l (рис. 31, а) подбирается равной половине длины возбуждаемой волны или, иначе говоря, обеспечивается равенство между собственной частотой продольных колебаний пакета преобразователя и частотой возбуждающего магнитного поля. Характер распределения амплитуд колебательных переменных по длине пакета показан на рис. 31, а.

Интенсивность излучения такого преобразователя на резонансных частотах может составлять несколько десятков ватт с квадратного сантиметра излучающей поверхности. При излучении в воду коэффициент полезного действия пре-

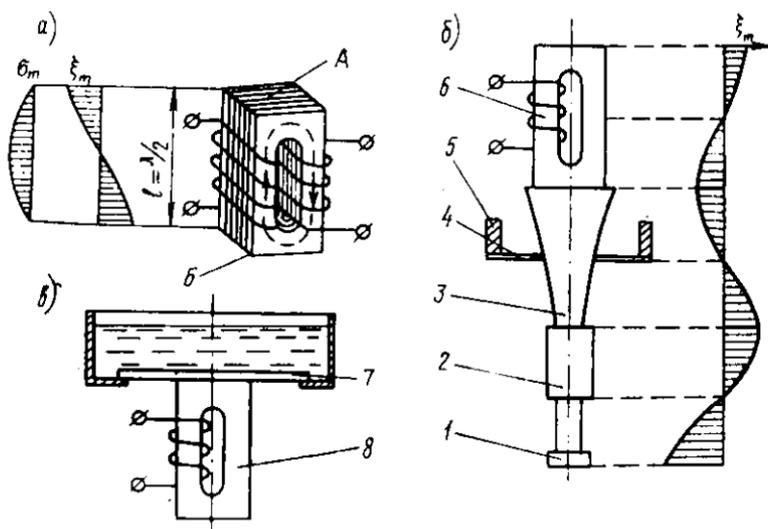


Рис. 31

образователя равен примерно 0,5. Тепло, выделяющееся в преобразователе в результате потерь электрической и механической энергии, обычно отводится проточной водой.

Передача ультразвука от преобразователя осуществляется волноводами.

Для передачи ультразвука объекту небольших размеров (например, инструменту ультразвукового станка) используются волноводы в виде ряда последовательно соединенных стержней (рис. 31, б). Каждый стержень волновода представляет собой резонансное звено, его длина равна половине длины волны. Если такой стержень сужается по длине, то амплитуда колебаний его тонкого конца будет больше амплитуды колебаний толстого конца стержня. Поскольку такие стержни увеличивают амплитуду колебаний, их называют концентраторами. Магнитострикционный пакет 6 (рис. 31, б), присоединенные к нему концентраторы 2 и 3 и инструмент для обработки 1 составляют единую непрерывную колебательную систему. Такая колебательная система крепится к корпусу 5 обычно при помощи диафрагмы 4 в том месте, где амплитуда колебаний в стоячей волне равна нулю, чтобы колебания не передавались на корпус.

Излучение ультразвука в жидкость осуществляется обычно волноводом, имеющим форму пластины (рис. 31, в). Продольные колебания закрепленного на пластине 7 магнито-стрикционного преобразователя 8 или группы преобразователей возбуждают стоячую волну изгибных деформаций в пластине, которая в жидкости, в свою очередь, возбуждает продольную волну.

§ 2. Ультразвуковая размерная обработка

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

Ультразвуковой метод пригоден также для обработки поверхностей сложной формы.

Сущность ультразвукового метода размерной обработки состоит в том, что материал обрабатываемой детали 1 (рис. 32) разрушается абразивными зёрнами 2 под действием ударов инструмента 3, прижатого к ним малым статическим усилием P и колеблющегося с ультразвуковой частотой. При этом инструмент углубляется в деталь, его форма копируется в ней.

Для передачи инструменту высокочастотных колебаний его закрепляют на конце колебательной системы, состоящей из магнито-стрикционного преобразователя 5 и одного или двух концентраторов 4. Колебательная система вместе с инструментом может перемещаться в прямолинейных направляющих 6 вдоль своей оси и перпендикулярно обрабатываемой поверхности.

Абразивные зёрна вводятся в рабочую зону в виде водной суспензии при помощи, например, сопла 7. Продукты разрушения обрабатываемого материала и абразивных зёрен удаляются из рабочей зоны циркулирующими через нее течениями суспензии.

Процесс разрушения материала при ультразвуковой обработке в первом приближении состоит в следующем. Инструмент благодаря тому, что он колеблется, приходит в контакт с абразивными зёрнами в течение небольшой части каждого периода колебаний. При частоте колебаний порядка 20 кГц

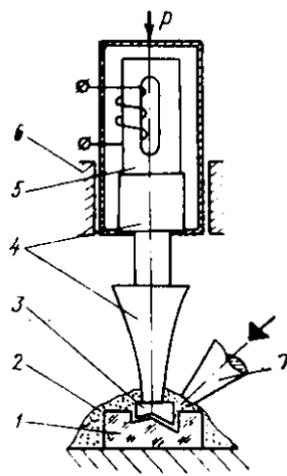


Рис. 32

время контакта за период не превышает 10...20 мкс. Усилия $P_{и}$, действующее в течение столь малого отрезка времени между инструментом, абразивными зернами и обрабатываемой поверхностью, имеет импульсный, ударный характер. Среднее и тем более максимальное значения усилия $P_{и}$ в течение импульса, очевидно, во много раз превосходят значение статического усилия P прижима инструмента.

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

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

Для ультразвуковой обработки применяются абразивные смеси со средним размером зерна (от 10 до 200 мкм). Лунки, образующиеся в хрупком материале при такой обработке, по своей величине на порядок меньше размера абразивных зерен. Отрывающиеся от материала выколы во много раз меньше самих лунок. Таким образом, разрушение материала имеет микромасштабный, эрозивный характер.

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

Формообразование при ультразвуковом методе отличается двумя существенными особенностями. Первая из них состоит в том, что для разрушения материала этим методом других движений инструмента, кроме колебаний, не требуется. Благодаря этому любое из шести координатных перемещений инструмента или их комбинация могут быть использо-

ваны для придания обрабатываемой поверхности нужной формы. Наибольшее практическое значение имеют операции, осуществляемые прямым копированием рабочей поверхности инструмента в обрабатываемом материале.

Наглядным примером применения комбинированного инструмента при ультразвуковой обработке может служить прошивка 256 отверстий диаметра 0,25 мм в элементе куба памяти ЭЦВМ, представляющем собой пластину феррита размером 15×15 мм. Все отверстия прошиваются одновременно в течение 15...20 с инструментом, набранным из 256 стальных стержней.

Вторая важная особенность метода состоит в том, что, поскольку обеспечить однородные колебания на больших поверхностях практически невозможно, большие поверхности (длиной более 60...70 мм) приходится обрабатывать либо последовательно по участкам, либо с применением поперечной подачи. Применение поперечной подачи позволяет выполнить практически все технологические операции, выполняемые методом резания: фрезерование, точение, шлифование и др. Особенности этих технологических операций при выполнении их ультразвуковым методом удобно рассмотреть на одной из типичных фрезерных операций — обработке длинного профильного паза.

Наиболее простой вариант выполнения этой операции показан на схеме рис. 33, а. Обрабатываемая поверхность инструмента представляет собой отображение профиля обра-

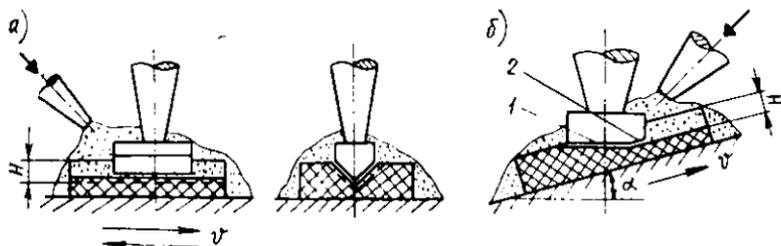


Рис. 33

ботанного паза. Скорость поперечной подачи здесь достаточно высока так, чтобы слой снимаемого за один проход материала был меньше амплитуды колебаний инструмента и не мешал его перемещению. Заданная глубина H паза достигается в результате многократных проходов. Недостаток этого варианта в том, что неизбежный износ инструмента приводит к искажению формы профиля паза.

Названный недостаток устраняется обработкой по схеме, показанной на рис. 33, б. В этом случае инструмент имеет два характерных участка: разрушающую площадку 1 и ка-

либрующую площадку 2. Стол станка наклонен на угол α и перемещается со скоростью v . Разрушение материала происходит в основном под действием разрушающей площадки, а калибрующей площадкой снимается незначительный припуск. Поэтому износ калибрующей части инструмента существенно меньше, что позволяет достичь высокой точности обработки.

Производительность ультразвуковой обработки q оценивается объемом материала заготовки, снятого в единицу времени с единицы рабочей площади инструмента. Производительность q зависит от многих факторов. Укажем главные из них.

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

Стекло	1
Титанат бария	1,1
Феррит	0,75 ... 0,85
Кремний	0,4 ... 0,75
Германий	0,35 ... 0,70
Кварц	0,45 ... 0,70
Керамика	0,4 ... 0,65
Твердые сплавы типа ВК	0,2
Рубин	0,15
Алмаз	0,01 ... 0,005

2. Амплитуда колебаний инструмента: с ее увеличением производительность увеличивается примерно прямо пропорционально.

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

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

5. Интенсивность прокачки суспензии через рабочий зазор; при подаче суспензии поливом с увеличением площади

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

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

Главным фактором, нарушающим точность инструмента, является его износ. Износ инструмента, изготовленного, например, из конструкционной стали, составляет 1...3% объема разрушенного им материала заготовки, если этот материал характеризуется высокой обрабатываемостью, как, например, стекло, феррит или керамика. При обработке твердого сплава и других материалов, обладающих низкой обрабатываемостью, износ инструмента доходит до 80...100%. Износ распределяется по рабочей поверхности инструмента неравномерно: больше изнашивается разрушающая его часть, боковые поверхности становятся конусными, острые кромки скругляются. Поэтому для получения высокой точности необходимо применять, где это возможно, инструмент с калибрующим участком (рис. 33,б), периодическую правку профиля инструмента или доводочную обработку чистовым инструментом при малом припуске.

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

В настоящее время при копировально-прошивочных операциях стабильно достигается точность 0,01...0,02 мм.

Качество обработанной поверхности. Шероховатость поверхности, обработанной ультразвуковым методом, увеличивается с увеличением размера абразивных зерен, обрабатываемости материала заготовки, шероховатости инструмента и в меньшей степени с увеличением усилия прижима инструмента. Так, например, при обработке стекла при изменении среднего размера зерна абразива со 150 на 50 мкм среднеквадратичная высота микронеровностей уменьшилась с 3,6 до 2,5 мкм. При обработке твердых сплавов благодаря пониженной их обрабатываемости шероховатость поверхности

примерно в два раза меньше, чем при обработке стекла. Шероховатость боковых стенок при ультразвуковой обработке обычно на один или два класса ниже, чем торцевых.

Важное достоинство ультразвуковой обработки — отсутствие каких-либо изменений химических или структурных свойств поверхностного слоя.

Ультразвуковые станки, область их применения. Универсальные станки (модели 4770, 4771, 4772, 4773 и их модификации) предназначены для выполнения копировально-прошивочных операций по схеме, приведенной на рис. 32, и применяются для обработки твердосплавного инструмента — матриц, пуансонов, волок, фильер, пресс-форм, для резки полупроводниковых материалов, прошивки отверстий в деталях из феррита и керамики, вырезки деталей из оптического стекла и кварца, для выполнения других подобных задач.

Ультразвуковую размерную обработку геометрически простых поверхностей (плоскостей, круглых отверстий и т. п.) целесообразно выполнять круглым вращающимся и колеблющимся инструментом, рабочая поверхность которого шаржирована (насыщена) зернами абразива, например алмазной крошкой. Потребность в абразивной суспензии при этом отпадает. Станки, работающие по этому принципу, обеспечивают более высокую производительность и точность обработки.

Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент металлорежущих операций нередко оказывается эффективным. К таким операциям относятся сверление, точение, нарезание резьбы в жаропрочных, нержавеющих и других вязких сталях. При этом уменьшается усилие резания, снижается шероховатость поверхности, увеличивается стойкость инструмента.

§ 3. Ультразвуковая сварка

Механизм образования сварного соединения при ультразвуковой сварке металлов состоит в следующем. Инструмент 4 (рис. 34) прижимает с относительно небольшим усилием $P_{сж}$ свариваемые детали 5 и вводит в них ультразвуковую волну сдвиговых деформаций. Соединяемые поверхности контактируют друг с другом через немногочисленные выступы их микрорельефа. Плотность энергии ультразвуковой волны в таких выступах становится настолько большой, что они деформируются пластически, поверхностная окисная пленка на них разрушается, происходит образование первичных «мостиков схватывания». Поглощение энергии ультразвука на границе раздела приводит к повышению температуры в точках схватывания, происходят перемещение веще-

ства в результате вязкого течения, заполнение микропор и щелей под влиянием капиллярного эффекта, стимулированного ультразвуком, разрастание «мостиков схватывания», образование зоны сварного соединения.

Волна сдвиговых деформаций в свариваемых деталях возбуждается колебательной системой, состоящей из магнитоstrictionного преобразователя 2, одного-двух концентраторов 3 и инструмента 4. Продольные колебания концентратора возбуждают в инструменте изгибные колебания, а в свариваемых деталях — высокочастотные деформации сдвига. Колебательная система связана со станиной шарниром 1 так, что детали можно сжать требуемым усилием $P_{сж}$.

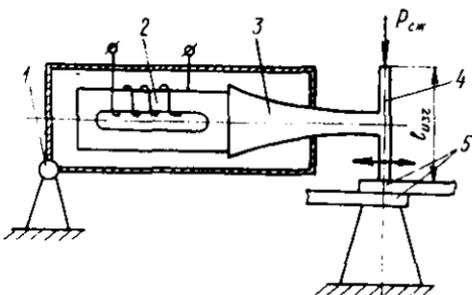


Рис. 34

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

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

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

При ультразвуковой сварке соединяемые материалы не подвергаются воздействию высоких температур как при элек-

тросварке, а также воздействию больших статических усилий, как при холодной сварке. Благодаря этому при ультразвуковой сварке коробление свариваемых узлов небольшое или полностью отсутствует, происходит минимальное изменение физико-химических свойств материала, что позволяет получить соединения с улучшенными показателями по прочности, электро- и теплопроводности, коррозионной стойкости, а также возможна сварка деталей малых размеров: проволоки диаметром до 20 мкм, пластин толщиной до 2—3 мкм. Сварка ультразвуковым методом листового материала толщиной более 2—3 мм и прутков диаметром 5—6 мм пока не освоена.

Основными параметрами ультразвуковой сварки являются усилие сжатия $P_{сж}$ свариваемых деталей, длительность τ процесса и амплитуда ξ смещений рабочей поверхности. Выбор режима зависит от свойств материала поверхностного слоя, геометрических характеристик и размеров свариваемых деталей. В зависимости от этих факторов диапазон рациональных значений параметров режима весьма широк. Так, например, для сварки алюминиевой фольги толщиной 10 мкм оптимальными являются значения $\xi = 8$ мкм, $P_{сж} = 0,2$ Н, $\tau = 0,03$ с, а для сварки алюминиевых листов толщиной 1,5 мм необходимы значения $\xi = 14 \dots 16$ мкм, $P_{сж} = 5 \cdot 10^2$ Н, $\tau = 1,5 \dots 2,0$ с. Мощность ультразвуковой системы в первом случае составляет 10...20 Вт, во втором — 2...4 кВт.

Сварочные машины типа МТУ являются установками общего назначения. По мощности ультразвуковой системы они перекрывают диапазон от 0,4 до 4 кВт, а по усилию сжатия — от 80 до 5500 Н. Работают на частоте $22 \pm 7\%$ кГц. Маломощные установки, предназначенные для сварки микродеталей, используются в электронной промышленности при монтаже интегральных схем, сварке элементов пленочных микросхем и других операциях.

§ 4. Ультразвуковая пайка

Пайка и лужение деталей из алюминия и его сплавов вызывают значительные трудности потому, что окисная пленка, образующаяся на их поверхности, в силу ее высокой прочности, химической стойкости и тугоплавкости трудно удаляется. Эффективным способом решения этой задачи является ультразвуковая пайка.

Сущность способа состоит в следующем. Как показано на рис. 35, к нагретому наконечнику 7 паяльника подводятся ультразвуковые колебания, которые в расплавленном припое 3 возбуждают волну деформаций сжатия-растяжения.

При достаточно большой интенсивности волны в припой возникают микроразрывы, происходят образование, пульсирование и захлопывание пузырьков 4. Это явление называют ультразвуковой кавитацией. При захлопывании кавитационного пузырька возникает ударная волна, обладающая высокой плотностью энергии и, следовательно, разрушающим действием. Кавитационная эрозия разрушает окисную пленку 2. Припой беспрепятственно облуживает поверхность основного

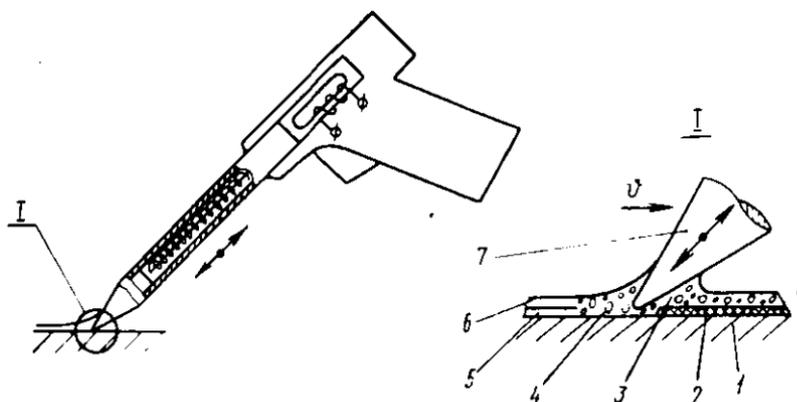


Рис. 35

ного металла 1, покрывает ее слоем полуды 5, который, охлаждаясь, затвердевает. Остатки окисной пленки образуют поверхностную корку 6.

Ультразвуковая кавитация приводит также к диффузии припоя в поверхностные слои некоторых материалов. Благодаря этому ультразвуковой метод лужения позволяет наносить припой на неметаллические материалы, такие как фарфор, радиокерамика, ферриты, стекло, термостойкие пластмассы, а также оказывается эффективным для бесфлюсового лужения ряда металлов, в том числе меди, бронзы, латуни.

Оптимальные значения удельной мощности ультразвука на этих частотах находятся в пределах 25...40 Вт/см². Продолжительность облучения при этом составляет около 0,1 с. Широкое применение для ультразвуковой пайки нашли припой с высоким содержанием олова, цинка, кадмия.

§ 5. Ультразвуковая очистка

Качество, надежность, долговечность машин и приборов в значительной степени зависят от чистоты поверхности элементов их конструкции. Особенно опасны загрязнения деталей и узлов в процессе их изготовления. К таким загрязне-

ниям относятся жировые пленки, мелкая стружка, абразивная пыль и другие отходы механической обработки; нагар, окалина и другие следствия термообработки; смолистые осадки или коррозия после химической обработки; иногда к загрязнениям относят даже атмосферную пыль и влагу или следы прикосновения рук оператора. Очистка изделий нередко представляет сложный технологический процесс, включающий в себя химические, механические, гидравлические способы очистки. Наряду с этими способами в последние годы очень широкое применение нашел ультразвуковой метод очистки. К достоинствам этого метода следует отнести высокое качество очистки от любых загрязнений, повышенную производительность, устранение из процесса токсичных и пожароопасных растворителей, благоприятные условия для механизации и автоматизации процесса.

Ультразвуковая очистка осуществляется в моющей жидкости и путем возбуждения в ней интенсивных упругих колебаний ультразвуковой частоты. Технологическое действие процесса определяется гидродинамическими эффектами, которые вызывает мощный ультразвук в жидкости. Важнейшая роль при этом принадлежит ультразвуковой кавитации. Ударные волны захлопывающихся кавитационных пузырьков способны разрушать поверхностную пленку любого вида загрязнений, отделять ее от очищенной поверхности, размельчать и смешивать с потоком жидкости. Незахлопывающиеся кавитационные пузырьки проникают в щели и зазоры между загрязнениями и очищенной поверхностью и своими пульсациями способствуют их отслаиванию.

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

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

Ультразвуковая очистка происходит благодаря совместному действию химически активной среды и явлений, возникающих в жидкости вследствие наложения акустического поля. В качестве химически активной среды используются

органические растворители или водные растворы щелочей и синтетических моющих средств.

Применяются следующие методы ультразвуковой очистки.

Метод погружения в ванну применяется для очистки мелких и среднеразмерных изделий. При этом ультразвуковая волна вводится в моющую жидкость 3 встроенными в дно или стенки ванны 2 магнитострикционными излучателями ультразвука 1 (рис. 36). Изделия обычно обрабатываются в нескольких технологических зонах: в ванне предварительной очистки, ванне тонкой очистки, ванне промывки, камере сушки и т. д. В автоматических поточных линиях мелкие изделия обычно помещаются в сетчатые корзины 4, которые переносятся из ванны в ванну транспортным устройством карусельного типа или цепным транспортером 5.

Очистка непрерывно-последовательным методом применяется для проволоки, ленты, листового материала. При этом методе очищаемое изделие перемещается непрерывно поверх излучающей поверхности размещенных в ванне ультразвуковых излучателей.

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

Нашей промышленностью серийно изготавливается целая гамма типоразмеров универсальных установок для ультразвуковой очистки, начиная от установок настольного типа мощностью 0,1...0,2 кВт, до установок с емкостью ванны до 150 л и акустической мощностью до 10 кВт.

Широкое применение нашли также специализированные автоматизированные установки для очистки коленчатых валов металлургического проката, роторов турбин, разблокировки и очистки полупроводниковых кристаллов и многие другие. Такие установки, как правило, отличаются высокой экономической эффективностью. Экономический эффект от внедрения на Новолипецком металлургическом заводе автоматизированной линии для ультразвуковой очистки полосы трансформаторной стали составил на одном агрегате более полумиллиона рублей в год.

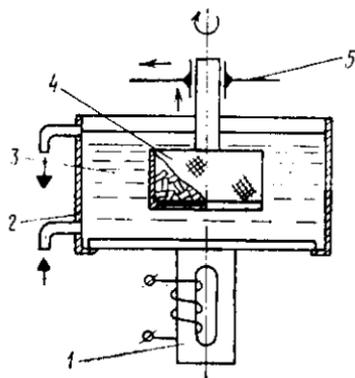


Рис. 36

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Башенко В. В. Электронно-лучевые установки. — М.: Машиностроение, 1972.

Введение в технологию электронно-лучевых процессов. Пер. с англ. под редакцией Ольшанского И. А. — М.: Металлургия, 1965.

Вейко В. П., Либенсон М. П. Лазерная обработка. — Л.: Лениздат, 1973.

Де-Барр А. Е., Оливер Д. А. Электрохимическая обработка. — М., Машиностроение, 1973.

Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. Электродуговые нагреватели газа (плазматроны). — М.: Машиностроение, 1973.

Келлер О. К., Кратыш Г. С., Лубяницкий Г. Д. Ультразвуковая очистка. — Л.: Машиностроение, 1977.

Костиков В. И., Шестерин Ю. А. Плазменные покрытия. — М.: Металлургия, 1978.

Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. — Л.: Машиностроение, 1978.

Левинсон Е. М., Лев В. С. Справочное пособие по электротехнологии. Электроэрозионная обработка металлов. — Л.: Лениздат, 1972.

Марков А. И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. — М.: Машиностроение, 1968.

Материалы и методы для изготовления фасонных электродов-инструментов электроэрозионных копировально-ярошивочных станков. Серия С-Х-7. — М.: НИИМАШ, 1975.

Мороз И. И., Алексеев Г. А., Водяницкий О. А. Электрохимическая обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1969.

Размерная электрическая обработка металлов. / Артамонов Б. А., Вишницкий А. Л., Волков Ю. С., Глазков А. В. — М.: Высшая школа, 1978.

Седыкин Ф. В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. — М.: Машиностроение, 1976.

Ультразвуковая технология. Под ред. Аграната Б. А. — М.: Металлургия, 1974.

Электроимпульсная обработка металлов. / Лившиц А. Л., Кравец А. Г., Рогачев И. С., Сосенко А. Б. — М.: Машиностроение, 1967.

Электрофизические и электрохимические станки. Каталог. — М.: НИИМАШ, 1978.

Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы. / Головачев В. А., Петров Б. И., Филимошин В. Г., Шманев В. А. — М.: Машиностроение, 1969.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Классификация электрофизических и электрохимических методов обработки	3
Глава II. Электроэрозионные методы обработки	5
§ 1. Основные закономерности электрической эрозии	6
§ 2. Генераторы импульсов	7
§ 3. Основные схемы электроэрозионной обработки	9
§ 4. Технологические показатели электроэрозионной обработки	11
§ 5. Электроэрозионные станки	15
§ 6. Электроискровое легирование	20
Глава III. Электроконтактная обработка	22
Глава IV. Плазменная обработка	25
§ 1. Получение плазмы для технологических целей	25
§ 2. Применение плазменной обработки	26
Глава V. Электронно-лучевая обработка	29
§ 1. Основы электронно-лучевой обработки	29
§ 2. Применение электронно-лучевой обработки	32
Глава VI. Лазерная обработка	35
§ 1. Источники лазерного излучения	35
§ 2. Применение лазерной обработки	37
Глава VII. Методы электрохимической размерной обработки	42
§ 1. Основные закономерности анодного растворения металлов	42
§ 2. Классификация электрохимических методов обработки	47
§ 3. Технологические показатели электрохимической обработки	48
Глава VIII. Ультразвуковая обработка	56
§ 1. Основные представления об ультразвуке	56
§ 2. Ультразвуковая размерная обработка	61
§ 3. Ультразвуковая сварка	66
§ 4. Ультразвуковая пайка	68
§ 5. Ультразвуковая очистка	69
Рекомендуемая литература	72