Глава 32. Основы физико-химических методов размерной обработки

К физико-химическим методам размерной обработки (ФХО) материалов относят методы, обеспечивающие съем обрабатываемого материала в результате физико-химических процессов. По механизму разрушения и съема материала все физико-химические процессы обработки подразделяют на три группы: электрофизические методы обработки (ЭФО), электрохимические методы обработки (ЭХО) и комбинированные. Рассмотрим основные, наиболее применяемые и перспективные, методы обработки: электроэрозионную, электрохимическую, лучевые, ультразвуковую, а также комбинированные способы (см. схему на с. 556).

Каждый из методов ФХО обладает уникальными технологическими возможностями, но все они более энергоемки и менее производительны в сравнении с методами механообработки. Поэтому использование методов ФХО оправдано только в следующих случаях:

- для обработки конструкционных материалов, имеющих низкую обрабатываемость лезвийным и абразивными инструментами, в том числе высоколегированных сталей, твердых сплавов, ферритов, керамики, полупроводников, ситалла и др.;
- для обработки деталей сложной геометрической формы из труднообрабатываемых материалов (пресс-формы, детали лопаток турбин и т. п.);
- для обработки миниатюрных тонкостенных нежестких деталей, а также деталей сложной формы с пазами и отверстиями.

Эффективность применения методов ФХО проявляется тем больше, чем сложнее форма обрабатываемой поверхности детали, выше физико-механические свойства материала и чем большие трудности возникают при ее изготовлении методами механической обработки.

32.1. Электроэрозионная размерная обработка (ЭЭО)

Электроэрозионная обработка основана на использовании явления электрической эрозии — разрушения материала электродов при электрическом пробое межэлектродного промежутка.

Схемы процессов ЭЭО. Размерная ЭЭО заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки путем съема материала припуска за счет управляемого процесса электрической эрозии.

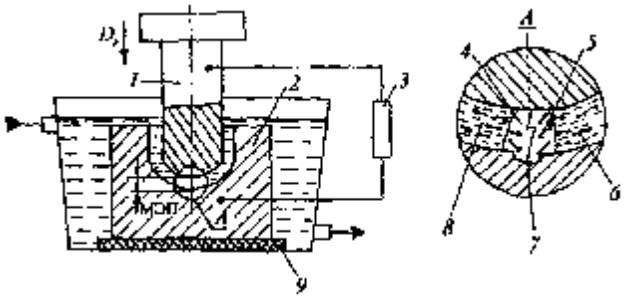

Рис 32.1. Условная схема процесса ЭЭО:
1 — электрод-инструмент, *2* — обрабатываемая поверхность; *3* — генератор электрических импульсов, *4* — электрический разряд, *5* — газовый пузырь; *б* — продукты эрозии (шлам), 7 — эрозионная лунка, *8* — рабочая жидкость, *9* — изолятор

Схемы процессов ЭЭО. Размерная ЭЭО заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки путем съема материала припуска за счет управляемого процесса электрической эрозии.

На рис. 32.1 приведена условная схема процесса ЭЭО. Изолированные электрод-инструмент *1* (ЭИ) и обрабатываемая заготовка *2* погружены в рабочую диэлектрическую жидкость и соединены с генератором электрических импульсов *3*. Между электродом и

деталью электрическим пробоем межэлектродного промежутка (МЭП) возбуждается импульсный разряд *4,* который мгновенно нагревает микроучастки электродов и контактирующую с ними жидкость. В результате в зоне разряда формируется газовый пузырь 5. В конце каждого импульса происходит схлопывание пузыря. При этом продукты эрозии — шлам — в виде гранул *6* удаляются из МЭП рабочей жидкостью *8,* а на поверхности электрода-заготовки образуется эрозионная лунка 7. За время паузы происходит восстановление электрической прочности МЭП до исходного значения. Затем, при подаче следующего импульса напряжения, весь процесс повторяется, но пробой происходит уже там, где напряженность примет максимальное значение, — в зазоре между наиболее близкими микровыступами поверхности заготовки и инструмента. Процесс эрозии заготовки продолжается до полного удаления металла, находящегося на расстоянии электрического пробоя (0,01—0,15 мм).

Для обеспечения непрерывности процесса съема припуска величина МЭП должна оставаться неизменной, для чего скорость главного движения ЭИ в направлении обработки должна соответствовать скорости эрозии электродов. Обработанная поверхность представляет собой поверхность, образованную множеством лунок (рис. 32.2) глубиной $h_л$ и диаметром $D_л$.

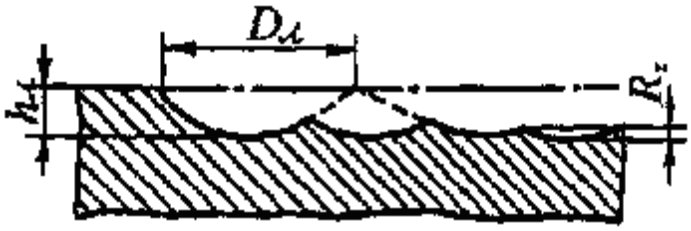

Рис. 32.2. Профиль поверхности, обработанной ЭЭО

При многообразии кинематических схем ЭЭО все схемы условно можно распределить на три группы.

Получение требуемой формы и точности поверхности заготовки копированием формы профильного инструмента, представляющего собой об- ратное отображение формы детали. По этой схеме электрод-инструмент внедряется в заготовку при поступательном перемещении по мере электроэрозии металла заготовки. Эта схема наиболее широко применяется в практике: ЭЭО. Операции, выполняемые по первой схеме, называются копировальное прошивочными (рис. 32.3, *а, б, в).*

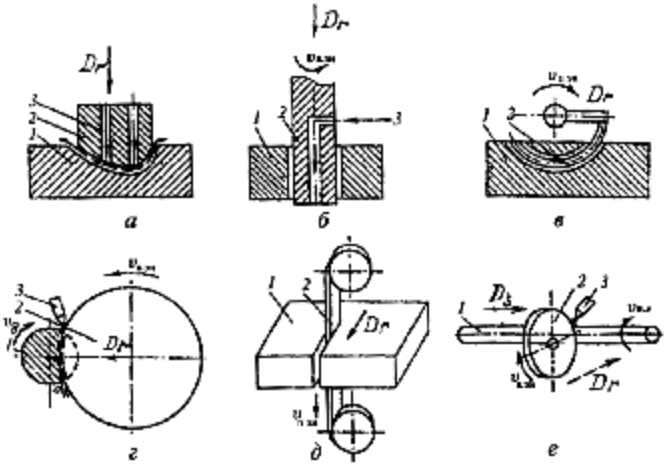

Рис. 32.3. Кинематические схемы процессов ЭЭО:
а — копирование, *б* — прошивание полостей с прямой осью; *в* — прошивание отверстий с криволинейной осью; *г* — отрезка вращающимся диском; *д* — отрезка проволокой (лентой), *е* — шлифование; *1* — обрабатываемая деталь, *2* — инструмент; *3* — подача рабочей жидкости

1. Заданная форма детали обеспечивается взаимным перемещением заготовки и непрофилированного инструмента. По этой технологической схе-ме ЭЭО производят с использованием в качестве электрода-инструмента проволоку или металлический вращающийся диск (рис. 32.3, *г, д)*.

Получение требуемой формы обеспечивается взаимным перемещением профилированного инструмента и заготовки. Эти операции получили наимень- шее распространение. Они используются для правки фасонных электроалмазных кругов, изготовления фигурных канавок и шлифования (рис. 32.3, *е)*.

Физико-химические основы ЭЭО, Сущность ЭЭО составляют процессы и явления, ответственные за электроэрозию электродов. Это прежде всего процессы нагрева, плавления и удаления металла из лунки; образования частиц — продуктов эрозии; захват и эвакуация частиц из зазора.

Применяемый при ЭЭО разряд возбуждается электрическим пробоем. Электрический пробой при подаче импульса напряжения 50—250 В происходит между микровыступом электрода-заготовки и обработанной поверхностью электрода-инструмента. В результате при ЭЭО разрушаются именно выступы, выравнивая поверхность заготовки по всему межэлектродному зазору. В случае возбуждения разряда замыканием МЭП гранулами шлама процесс ЭЭО нарушается, изменяются параметры режима, снижая точность и качество поверхности.

Интенсивность эрозии зависит от вида возбуждаемого разряда. Начальная (искровая) стадия, длящаяся ~10^{-9}—10^{-7} с, отличается наибольшей удельной мощностью, так как диаметр канала в начальной стадии весьма мал и концентрация энергии на обрабатываемых микроучастках составляет ~10^{7}—10^{8} Вт/см^2. Процесс эрозии металла электродов осуществляется испарением. В конце искровой стадии под действием высоких температуры и давления в канале разряда рабочая жидкость приходит в движение и канал расширяется со сверхзвуковой скоростью. При увеличении длительности импульса в результате роста сечения канала удельная мощность разряда снижается и он переходит в дуговую стадию. Сравнительно высокое значение удельной мощности дуговой формы разряда, ~10^{6}—10^{4} Вт/см^2, при длительности, соответственно, ~10~^{5}—10^{-1} с при ЭЭО, объясняется охлаждающим воздействием жидкого диэлектрика. Известно, что принудительное охлаждение столба дуги является эффективным способом повышения концентрации электрического дугового разряда. Поэтому высокие значения эрозии при ЭЭО обеспечивает и дуговая форма разряда. В качестве источников питания при ЭЭО используют генераторы импульсов.

По форме импульсы подразделяются на: знакопеременные; асимметричные; униполярные синусоидальные; униполярные прямоугольные; униполярные гребенчатые.

По схеме подключения электродов различают обработку на прямой полярности, когда инструмент подключен к «-» источника, и на обратной полярности, когда к «-» источника подключена заготовка.

Используемые форма импульса и полярность сильно сказываются на характере разрушения электродов. Симметричные знакопеременные импульсы вызывают одинаковую эрозию электродов из одного материала. Униполярный импульс (импульс одной полярности) обеспечивает преимущественное разрушение одного из электродов. Обычно наибольшая эрозия заготовки отмечается при воздействии униполярного импульса прямой полярности. На практике широко используются и знакопеременные асимметричные импульсы, в этом случае различают два полупериода процесса — рабочий на пря-
мой полярности с максимальным током и холостой на обратной полярности с минимальным током, что обеспечивает высокую эрозию заготовки и незначительную эрозию инструмента.

Обрабатываемость различных материалов при электроэрозионной обработке оценивается коэффициентом обрабатываемости. Числовое значение коэффициента

обрабатываемости равно, как и при обработке резанием, отношению экспериментально установленной скорости съема данного материала к скорости съема стали 45 при тех же параметрах ЭЭО. Коэффициент обрабатываемости стали 45 принимается за единицу, тогда коэффициент обрабатываемости составляет: для жаропрочных и нержавеющих сталей — 1,4; для алюминия — 2,4; для меди — 0,9; для титана — 0,6; для вольфрама — 0,5; для твердых сплавов — 0,3.

Газогидродинамические и гидравлические процессы в М Э П ответственны за образование, захват, эвакуацию частиц из межэлектродного зазора и восстановление электрической прочности МЭП после разряда. Рассмотрим последовательность и физику происходящих процессов.

В результате теплового контакта плазмы разряда с жидкостью происходит ее разогрев и испарение с образованием газового пузыря. Давление газа в пузыре достигает (10—100)·10^5 Па, по окончании импульса разряда оно резко падает до значений ниже атмосферного. Резкое падение давления над расплавленным перегретым металлом ведет к выбросу его из лунки в виде капель жидкой фазы при температурах ниже температуры кипения металла. Жидкие микропорции металла в виде капель выбрасываются во внутреннюю полость схлопывающегося пузыря на его стенки. В результате соприкосновения с рабочей жидкостью продукты эрозии застывают в виде гранул шарообразной формы. При схлопывании пузыря продукты эрозии выталкиваются из межэлектродного зазора ударными волнами вместе с окружающей их жидкостью. Этот процесс происходит во время пауз между электрическими импульсами. В этот момент межэлектродный зазор должен полностью очиститься от продуктов эрозии электродов, а рабочая жидкость — полностью восстановить электрическую прочность, обеспечивающую постоянство напряжения пробоя и зазора при обработке.

При работе на форсированных режимах (высокая мощность и длительность импульса) происходит разогрев электродов и выбрасываемый из лунки металл налипает на электрод-инструмент, образуя наросты. Образований нароста нарушает точность и качество обработанной поверхности. С тем чтобы устранить это явление, применяется искусственная прокачка электролитов через МЭП. Прокачку проводят с помощью насосов, расход жидкости при прокачке входит в основные технологические параметры процесса обработки.

Сопутствующим явлением при ЭЭО является разложение рабочей жидкости под действием высоких температур — пиролиз. В жидких углеводородах, имеющих температуру кипения 150—200 °С, в зоне дугового разряда

образуются пары состава C_nH_{2n}. При соприкосновении паров с нагретыми участками электродов происходит разложение паров с осаждением на поверхности углерода и выделением водорода. Взаимодействуя с поверхностями электродов, углерод и водород могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние. Так, взаимодействие с обрабатываемой поверхностью детали ведет к изменению химического состава поверхностного слоя, что в большинстве случаев нежелательно. В то же время взаимодействие с поверхностью инструмента ведет к образованию на его поверхности слоя пирографита, компенсирующего его эрозию в процессе обработки. Это явление используется для повышения стойкости инструмента.

Электроды-инструменты (ЭИ) и рабочие жидкости (РЖ). *Профилированный* ЭИ задает конфигурацию обрабатываемой поверхности детали. Материал электрода-инструмента должен обладать высокой эрозионной стойкостью, прочностью, малым омическим сопротивлением и высокой обрабатываемостью методами резания.

Эрозионный износ электрода при ЭЭО не является локальным, как при механической обработке, а охватывает всю рабочую поверхность и оценивается отношением израсходованного объема электрода к объему удаленного металла.

В качестве материала для электродов при обработке высокоуглеродистых инструментальных сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе рекомендуются

графит, медь и композиционный материал МНБ-3 (97% меди и 3% нитрида бора). Наименьшему износу подвержен медный электрод, так как его электроэрозия компенсируется углеродом, откладывающимся в результате пиролиза углесодержащих рабочих жидкостей. Для удаления шлама из МЭП в электроде изготавливается необходимое число отверстий (см. рис. 32.3, *а*, б). Удаление осуществляется прокачкой или отсосом рабочей жидкости из зазора.

В качестве *непрофилированного инструмента* при ЭЭО наибольшее распространение получили медные или латунные диски и тонкая проволока диаметром 0,02—0,3 мм из меди, латуни, вольфрама и молибдена. Для обеспечения точности обработки и снижения износа проволока-электрод в процессе обработки перематывается с одной бобины на другую, испытывая усилие растяжения.

В качестве рабочих жидкостей используют низкомолекулярные углеводороды различной вязкости (керосин, индустриальное масло И12А, трансформаторное масло и их смеси), воду, кремнийорганические жидкости и водные растворы двухатомных спиртов.

Для уменьшения коррозии электродов в воду добавляют *4%* Ca_2Co_3 (кальцинированная сода). Повышение технологических свойств обеспечивается введением поверхностно-активных веществ (ПАВ), например композиций элементорганических соединений Ва, Са и ароматических веществ.

Предельно допустимая массовая концентрация шлама в рабочей жидкости зависит от режима обработки. Например, с увеличением частоты от 0,4 до 44 кГц допустимая концентрация должна быть, соответственно, снижена с 0,49 до 0,19%.

Технологические параметры и режимы ЭЭО. *Производительность процесса* оценивается скоростью съема материала заготовки. Приближенную оценку производительности процесса (мм^3 /мин) без учета площади обработки дает соотношение:

$$Q = \pi k_1^2 k_2^2 f W_и, \qquad (32.1)$$

где $k_1 = r_л / h_л$, k_2 — значение эрозии материала заготовки при определенных условиях обработки, $r_л$ и $h_л$ — соответственно радиус и глубина лунки; f— частота; $W_и$ — энергия импульса.

Из соотношения (32.1) следует, что производительность определяется энергией и частотой следования импульсов.

По энергии электрические режимы подразделяют на жесткие (0,5—5 Дж), средние (0,1—0,5 Дж), легкие (0,05 — 0,1 Дж) и очень легкие (менее 0,05 Дж).

По технологическим показателям эти режимы соответствуют черновым, получистовым, чистовым и доводочным. В табл. 32.1 приведены режимы ЭЭО прямоугольными импульсами и значения производительности ЭЭО для стали 45. Из табл. 32.1 следует, что максимальная производительность ЭЭО обеспечивается на жестких (черновых) режимах обработки.

Таблица 32.1. Режимы обработки и производительности ЭЭО

Название режима	Частота, кГц	Средний ток, А	Производительность, см^3 /мин
Черновой	8	35—45	12000
Получерновой	22-24	30—35	200—300
Чистовой	66-100	25—20	5—30
Доводочный	440	10—15	1—5

Точность обработки, несоответствие формы деталей размерам ЭИ при ЭЭО, обусловлено наличием межэлектродного зазора и изменением его размеров по ходу движения рабочей жидкости в МЭП. Двигаясь в МЭП, жидкость обогащается продуктами обработки и нагревается, изменяя свои свойства. В результате на этих участках происходит повышенный съем металла, вызывая конусность у обработанных поверхностей. Для повышения точности при разработке технологии предусматривают оптимальные пути эвакуации продуктов эрозии путем: изготовления специальных технологических полостей в инструменте и заготовке; формирования направления течения жидкости в зазоре за счет принудительной прокачки или отсоса (рис. 32.4).

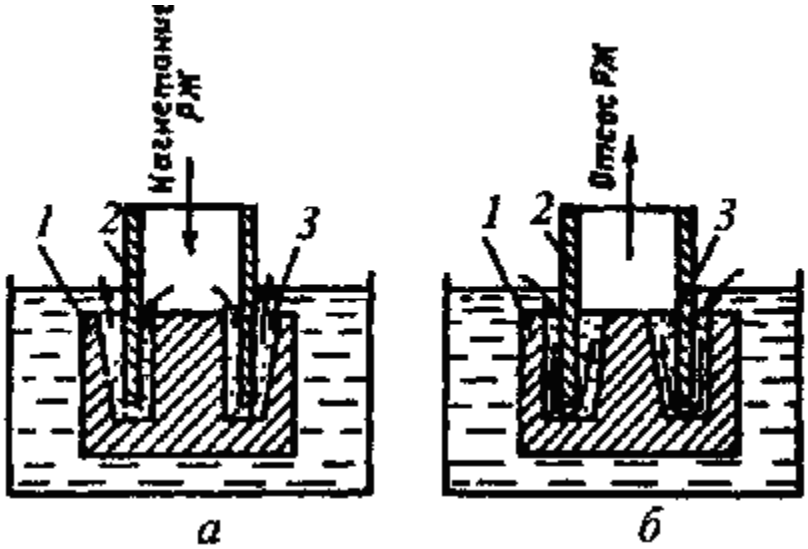

Рис 32.4. Характер изменения размеров МЭП по длине в зависимости от способов подачи рабочей жидкости (РЖ), удаляющей продукты эрозии:
а — прокачка; *б* — отсос; *1* — заготовка; *2* — электрод-инструмент, *3* — шлам

Кроме того, погрешности формы снижают корректировкой исходных размеров и формы ЭИ на величину возможных погрешностей.

Шероховатость поверхности определяется электрическими и гидравлическими параметрами процесса. Шероховатость R_z зависит от размера лунки и степени перекрытия лунок (см. рис. 32.2). Приближенная количественная связь параметров шероховатости с энергией импульса описывается следующим соотношением:

$$R_z = \frac{\beta^2}{3} k \sqrt[3]{W_и} \text{ (мкм)}, \qquad (32.2)$$

где β — коэффициент перекрытия лунок, 2 > β > 1, зависящий от частоты импульсов тока; *k*— коэффициент, зависящий от материала заготовки; $W_и$ — энергия импульса.

Следовательно, условия получения минимальной шероховатости требуют ведения процесса на повышенных частотах с минимальной энергией импульса. Помимо того, шероховатость поверхности зависит от концентрации шлама в межэлектродном зазоре, определяемой эффективностью его удаления рабочей жидкостью. При работе на мягких режимах с малыми зазорами эффективно удаляют шлам жидкости с низким значением вязкости (типа керосина).

Структура и состав поверхностного слоя обусловлены тепловым воздействием электрического разряда, а также химическими воздействиями плазмы разряда и рабочей жидкости.

В результате теплового воздействия поверхность оплавляется и в поверхностном слое возникают остаточные напряжения растяжения с максимумом на поверхности детали, металл

претерпевает наклеп и структурные изменения. Возможно насыщение его компонентами, входящими в состав материала инструмента, и компонентами, содержащимися в рабочей жидкости.

Микротвердость поверхностного слоя металла возрастает. Глубина слоя h_c, иногда называемого дефектным слоем, зависит от теплофизических свойств обрабатываемого металла, шероховатости поверхности и режима обработки. Она определяется следующим соотношением:

$$h_c = 4\sqrt{\frac{\pi\lambda\tau_и}{C\rho}} - R_z, \qquad (32.3)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; $t_и$ — длительность импульса; C — теплоемкость; ρ — плотность; R_z — шероховатость поверхности.

Средние значения качества поверхности в зависимости от режима обработки приведены в табл. 32.2.

Таблица 32.2. Качество поверхности при ЭЭО

Тип обработки	Режим ЭЭО	Шероховатость поверхности	Глубина дефектного слоя, мм	Уровень остаточных напряжений
Черновая	Жесткий	Rz80 — Rz320	0,3—0,2	Высокий
Чистовая	Средний	Rz20 — Rz40	0,2—0,1	Средний
Отделочная	Мягкий	0,8 — 1,6	0,1—0,05	Низкий
	Очень мягкий	0,2 — 0,4	0,05—0,001	Очень низкий

Процесс следует проводить за несколько проходов. При первом, черновом, проходе на жестком режиме снимается до 90% припуска, а последующие чистовые проходы на мягких и очень мягких режимах обеспечивают высокую точность, низкую шероховатость и высокое качество поверхности. Черновая и чистовая обработки ведутся сменным инструментом, точность чистового инструмента должна быть на 1—2 класса выше требуемой точности обработки детали.

Специфический характер геометрии поверхностей, а также возможность управления толщиной упрочненного слоя обусловили отличие эксплуатациионных свойств поверхностей, обработанных ЭЭО. Так, износостойкость поверхности из-за удерживания масла совокупностью лунок и наличия упрочненного слоя выше, чем при механической обработке. Усталостная прочность детали зависит от толщины упрочненного слоя и при обработке на средних и мягких режимах несколько выше, чем деталей, полученных резанием при одинаковой чистоте поверхности, что можно объяснить меньшей толщиной дефектного слоя. Коррозионная стойкость поверхностей, полученных на средних режимах, аналогична стойкости при механической обработке резанием. Она возрастает при обработке на мягких режимах, но снижается при обработке на грубых режимах.

Технологические операции ЭЭО. *Заготовительные операции* и используют для получения заготовок из молибдена, вольфрама, никелевых сплавов, сплавов на основе титана, металлокерамики, нитинола и других труднообрабатываемых материалов.

Отрезку заготовок из проката и металлокерамики выполняют дисковыми ЭИ из меди, латуни. Разрезание точных малогабаритных заготовок выполняют на вырезных станках (см. рис. 32.3, *д)*.

Прошивание отверстий на глубину до 20 диаметров выполняют стержневым ЭИ, до 40 диаметров — трубчатым ЭИ, при прошивке желательно вращать ЭИ (см. рис. 32.3, б).

Формирование рабочих полостей штампов, пресс-форм и вырубных штампов (см. рис. 32.3, а). Обычно ЭЭО штампов выполняют после операции фрезерования, обеспечивающей съем основной массы металла. Штампы после ЭЭО имеют повышенную износостойкость по сравнению со штампами, изготовленными обработкой резанием.

Прямое и обратное копирование позволяет изготавливать пуансон по изготовленной матрице и наоборот, что значительно упрощает технологию их изготовления и исключает слесарную доводку. Обработка по методу копирования ведется на копировально-прошивочных станках с ЧПУ.

Обработка криволинейных каналов газовых турбин аэродинамического профиля осуществляют прошивкой с криволинейной осью (см. рис. 32.3, в).

Вырезание используют при изготовлении деталей электронной техники, вырубных штампов, шаблонов, лекал, фасонных резцов и т. д. Обработка ведется на вырезных станках проволокой (см. рис. 32.3, *д).*

Изготовление сеток, решеток и пазов проводят методом копирования групповым ЭИ (см. рис. 32.3, б), одновременно обрабатывая до 800 отверстий и более диаметром 0,2—2,0 мм, глубиной 2 мм с точностью ±0,002 мм.

Электроэрозионное, шлифование применяют при чистовой обработке наружных и внутренних поверхностей труднообрабатываемых материалов, магнитных и твердых сплавов и т. п. (см. рис. 32.3, *е).* Точность и качество поверхности при обработке на чистовых и доводочных режимах соответствуют чистовым режимам, выполняемым шлифованием. При этом зона термического влияния при доводочных режимах не превышает 0,003 мм.

32.2. Электрохимическая размерная обработка (ЭХО)

Размерная ЭХО заключается в получении деталей требуемой геометрической формы, размеров и качества поверхностей путем снятия с поверхности заготовок слоя металла припуска электрохимическим растворением. Электрохимическая обработка основана на явлении анодного растворения металлов при электролизе.

Классификация и схемы процессов ЭХО. Область эффективного применения электрохимической обработки обусловлена следующими технологическими особенностями:

-способ позволяет обрабатывать только электропроводные мате-риалы;

-производительность способа не зависит от твердости и прочности обрабатываемых материалов и в несколько раз превосходит производительность обработки резанием заготовок из высокопрочных твердых сплавов, металлокерамики и сталей в закаленном состоянии;

- способ позволяет обрабатывать поверхности любой формы;

- в металле обработанной поверхности отсутствуют остаточные напряжения и наклеп.

Недостатком метода является ограничение его применения обработкой только таких электропроводных материалов, которые при растворении не образуют труднорастворимых пленок. Для этих материалов наряду с электрохимическим воздействием требуется механическое или электротермическое воздействие, удаляющее образующиеся оксидные пленки.

Рассмотрим схему процесса ЭХО на примере обработки заготовки из железа в электролите — водном растворе хлорида натрия (рис. 32.5).

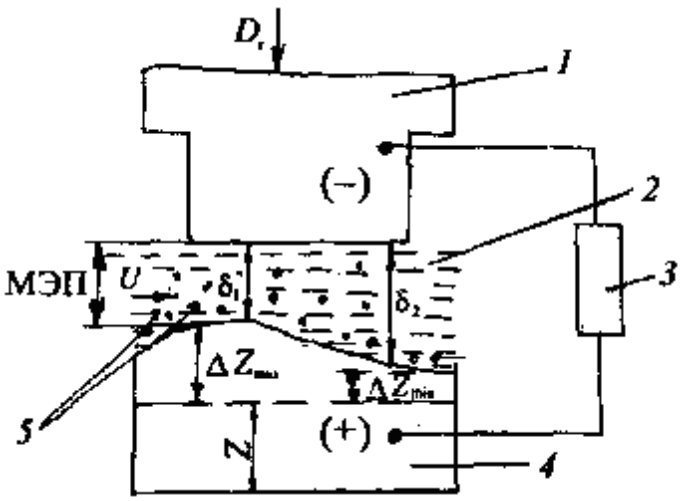

Рис. 32.5. Условная схема ЭХО:
1 — электрод-инструмент; *2* — электролит; *3*— источник питания постоянного (периодического) тока; *4* — обрабатываемая заготовка (анод); *5* — шлам; δ_1, δ_2— зазоры МЭП; ΔZ_{max}, ΔZ_{min} — соответственно, максимальное и минимальное значения припуска на обработку; *υ*, — скорость прокачки электролита через МЭП

Заготовка *4* подсоединяется к положительному полюсу источника питания *3* и является анодом (+), а инструмент — к отрицательному полюсу и является катодом (-).

В электролите *2* молекулы вещества диссоциируют на электрически заряженные ионы Na^+ и Cl^-, а ионы растворителя — на ионы H^+ и OH^-. Когда к металлическим электродам, погруженным в электролит, прикладывают разность потенциалов, положительно заряженные ионы (катионы) движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы (анионы) — к аноду, в результате электрическая цепь замыкается. При этом перенос электрических зарядов в металлических проводниках осуществляют электроны, а в электролите — ионы. Изменение носителей заряда в электрической цепи происходит на поверхности электродов, погруженных в электролит.

На аноде под действием электрического поля электроны перемещаются к источнику питания, «оттягиваясь» от поверхности анода внутрь металла,

облегчая непосредственное взаимодействие молекул воды с положительными ионами решетки металла анода.

Это явление нарушает межатомные связи в приповерхностном слое металла и обусловливает переход положительных ионов металла в электролит — растворение анода. В электролите ионы металла анода образуют гидроксид металла $Fe(OH)_2$, который выпадает в осадок в виде шлама и уносится движущимся электролитом со скоростью прокачки $и_э$.

Кинематика операций ЭХО во многом схожа с кинематикой процессов электроэрозионной обработки, но имеет некоторые особенности. Так, некоторые операции ЭХО, не требующие съема больших объемов металла, такие, как полирование, калибрование и маркирование, выполняются при неподвижных электродах (рис. 32.6). Стрелками указаны направления подачи инструмента и заготовки, а также направления движения электролита в межэлектродном зазоре.

Основные процессы и параметры ЭХО. Основным электрохимическим процессом ЭХО является процесс растворения анода. Линейная скорость растворения, характеризующая производительность ЭХО, определяется из первого закона Фарадея. После ряда преобразований, учитывающих реальный процесс электролиза, уравнение для линейной скорости растворения анода принимает следующий вид:

$$\upsilon_л = (k_\upsilon/x_{эф})\ \eta_a\ (U_э-\Delta\varphi)\delta, \qquad (32.4)$$

где k — электрохимический эквивалент растворяемого вещества; Хэф — эффективная удельная электрическая проводимость электролита; η_a — коэффициент, учитывающий потери тока на нагрев электролита и др.; $U_э$ — напряжение, приложенное к электродам; $\Delta\varphi$ — сумма электродных потенциалов поляризации анода и катода; δ — межэлектродный зазор (МЭЗ) в рассматриваемом участке МЭП между поверхностями электродов, измеренный по нормали к обрабатываемой поверхности.

Из уравнения (32.4) следует: 1. Скорость растворения участков анода, при прочих равных условиях, обратно пропорциональна значению МЭЗ на

этих участках: $\upsilon_{л1} / \upsilon_{л2} = \delta_1/ \delta_2$. Этим объясняется выравнивание поверхности анода в МЭП при ЭХО и повышение производительности обработки с умень-шением зазора. Минимально допустимым зазором при ЭХО принят зазор 0,02 мм.

2. При подаче напряжения на электроды растворение анода идет с разной скоростью, но по всей обрабатываемой поверхности, что осложняет получение деталей с требуемой точностью размера и формы.

3. Скорость растворения зависит от электрической проводимости электролита, поэтому факторы, влияющие на электрическую проводимость, определяют производительность ЭХО.

4. Скорость растворения возрастает с увеличением напряжения. Однако экспериментально установлено, что при $U_З$ = 30 В происходит электрический пробой зазоров, используемых при ЭХО, поэтому обработка ведется при напряжении -15 В.

Электролиты. Электрическая проводимость электролита зависит от его состава и происходящих в электролите явлений. Наиболее распространенными электролитами при ЭХО являются нейтральные водные растворы неорганических солей: хлориды, нитраты и сульфаты натрия и калия. Приготовление электролитов требуемого состава и концентрации относится к основной операции ЭХО. Оптимальные значения концентраций, обеспечивающих максимальное значение электрической проводимости электролита заданного состава, приводятся в справочной литературе. Например, максимальная электрическая проводимость электролита NaOH обеспечивается при его концентрации в воде, равной 15%.

Концентрация электролита в процессе ЭХО может изменяться из-за образующегося шлама, нарушая при этом процесс ЭХО и снижая его производительность. Постоянство концентрации электролита обеспечивается технологически — его очисткой. Для этого используются методы центрифугирования (воздействия центробежных сил), фильтрования с помощью пористых материалов, отстаивания в специальных резервуарах и флотации — очистки всплывающими пузырьками газа или воздуха.

На электрическую проводимость электролита существенное влияние оказывает сопутствующий электролизу нагрев электролита проходящим током. Так, нагрев электролита из водного раствора солей на один градус увеличивает его электрическую проводимость на 2—2,5%. Поэтому при ЭХО для выведения шлаков и выравнивания температуры электролита применяют прокачку электролита через МЭП под давлением. Необходимая скорость течения электролита $\upsilon_э$ определяется из условия удаления продуктов электролиза со скоростью, превышающей скорость их образования, и технологически задается давлением вводимого в раствор электролита. Для стабилизации температуры электролита в станках ЭХО применяют теплообменники с автоматическими терморегуляторами, встроенными в систему подачи электролита.

Точность размеров и формы деталей при ЭХО определяется точностью электрода-инструмента и точностью его положения при обработке относительно оси его главного движения, неравномерностью ΔZ припуска заготовки и стабильностью всех параметров режима, ответственных за процесс электрохимического растворения.

Во всех случаях ЭХО подвижным и неподвижным инструментом форма и размеры

обрабатываемых поверхностей определяются как сумма или разность размеров ЭИ и межэлектродного зазора соответственно для наружных и внутренних поверхностей. Поэтому их точность зависит от точности ЭИ и стабильности зазора в процессе обработки. В процессе обработки ЭИ не из- нашивается, однако, находясь в электролите, он может коррозировать, поэтому рабочую часть электродов изготавливают из нержавеющей стали, а при изготовлении электродов сложной формы используют хорошо обрабатываемые коррозионностойкие медные сплавы — латунь и бронзу. Поверхность ЭИ обрабатывается с точностью, на два класса превышающей требуемую точность обрабатываемой заготовки.

Величина зазора (δ) оказывает влияние на точность обработки. Снижение величины зазора до минимально допустимого (0,02 мм) обеспечивает наибольшую точность. Стабильность величины зазора в процессе ЭХО обеспечивается стабилизацией параметров режима $\upsilon_и$, x, температуры электролита и скорости подачи инструмента $\upsilon_и$ за счет автоматизации процесса и применения специальной аппаратуры. Так, постоянство заданного напряжения обеспечивается стабилизатором напряжения; скорость подачи — прецизионным приводом подачи и системой ее регулирования; температура — теплообменниками с терморегуляторами; концентрации электролита — прокачкой и очисткой электролита.

Снижение наследственного влияния неравномерности припуска ΔZ на точность формы заготовки решается технологическими методами. Во-первых, повышением точности исходных заготовок, выполняемых методами литья, ОМД и порошковой металлургии. Во-вторых, увеличением припуска на обработку, в 6—9 раз превышающего исходную погрешность ΔZ_{min}. В этом случае обеспечивается условие для выравнивания всей обрабатываемой поверхности , но тем не менее метод обеспечивает точность формы не выше ±0,1 мм.

Шероховатость поверхности и эксплуатационные свойства. Шероховатость обработанных ЭХО поверхностей определяется процессами растворения электрода, удаления шлама, исходной шероховатостью и фазовым составом материала заготовки.

Повышение анодной плотности тока, увеличение скорости прокачки электролита под большим давлением и снижение его температуры повышают чистоту обработанной поверхности.

Процесс ЭХО не оказывает на обрабатываемую поверхность ни температурного, ни силового воздействия, в поверхностных слоях отсутствуют остаточные напряжения и не происходят структурные изменения. Поэтому ЭХО обеспечивает высокое качество поверхностей с шероховатостью в диапазоне $^{0,4}\sqrt{}$—$^{1,6}\sqrt{}$. Эксплуатационные свойства поверхностей находятся на уровне свойств материала.

Однако при значительной химической и фазовой неоднородности обрабатываемых материалов наблюдается явление растравливания границ зерен и фаз на глубину до 0,01 мм. В этом случае эксплуатационные свойства детали, чувствительные к надрезу (циклическая, ударная прочность), снижаются на 5—10%.

К параметрам режима ЭХО относятся: напряжение на электродах, ток, скорость подачи ЭИ, величина межэлектродного зазора, давление прокачи-

ваемого электролита и его состав. В качестве оборудования для размерной ЭХО используются станки, которые состоят из: источника тока в виде выпрямителя (ток 5000—30000 А); электрохимической ячейки, в которой происходит анодное растворение обрабатываемого материала; системы прокачки электролита с устройствами для термостабилизации и очистки; системы подачи катода, поддерживающей постоянным значением МЭП. Процесс ЭХО обеспечивает широкое регулирование режимов от черновых до чистовых без съема детали со станка.

В современных станках процессом обработки управляет система ЧПУ.

Она задает и контролирует значения напряжения и тока, постоянство рабочего зазора, скорость и концентрацию потока электролита. Универсальные электрохимические станки позволяют обрабатывать поверхности площадью; 600 см^2 и более с точностью ±(0,1—0,3) мм и производительностью по стали 5—25 см^3/мин.

Примеры технологических операций ЭХО. *Заготовительные операции.* Методы ЭХО используют для резки заготовок из труднообрабатываемых жаропрочных сталей и сплавов, титановых сплавов и высокопрочных сталей. Дисковым и ленточным металлическим инструментом разрезают ленточный прокат, а вырезку фасонных заготовок из листа выполняют на станках с ЧПУ (рис. 32.6, д). Положительной особенностью способа является отсутствие на заготовке заусенцев.

Формообразующие операции широко применяют при изготовлении деталей методами копирования, электрохимического точения и прошивания (рис 32.6, *а, б, в).*

Объемным копированием получают лопатки турбин из жаропрочных в титановых сплавов; рабочие элементы ковочных штампов и пресс-форм из высокопрочных инструментальных сталей; глухие полости, отверстия сложной формы в машиностроительных и приборных деталях из труднообрабатываемых металлов и сплавов (точность обработки ±0,1 мм).

Электрохимическое калибрование выполняют при подвижном и неподвижном ЭИ (рис. 32.6, *г).* Например, ЭХО после механической обработки шнеков, точность формы и размеров винтовых поверхностей возросла в 3—4 раза, а шероховатость снизилась до $^{0,1}\sqrt{}$—$^{0,8}\sqrt{}$

Отделочные операции —удаление заусенцев и полирования поверхностей — выполняют при неподвижных электродах. ЭХО позволяет удалять заусенцы в труднодоступных местах, например во внутренней полости при пересечении отверстий, полученных сверлением.

Электрохимическое полирование улучшает микрогеометрию деталей, снижая ее шероховатость на 2—3 класса, увеличивает прочностные характеристики обработанной поверхности, придает ей зеркальный блеск, получая шероховатость $^{0,025}\sqrt{}$.

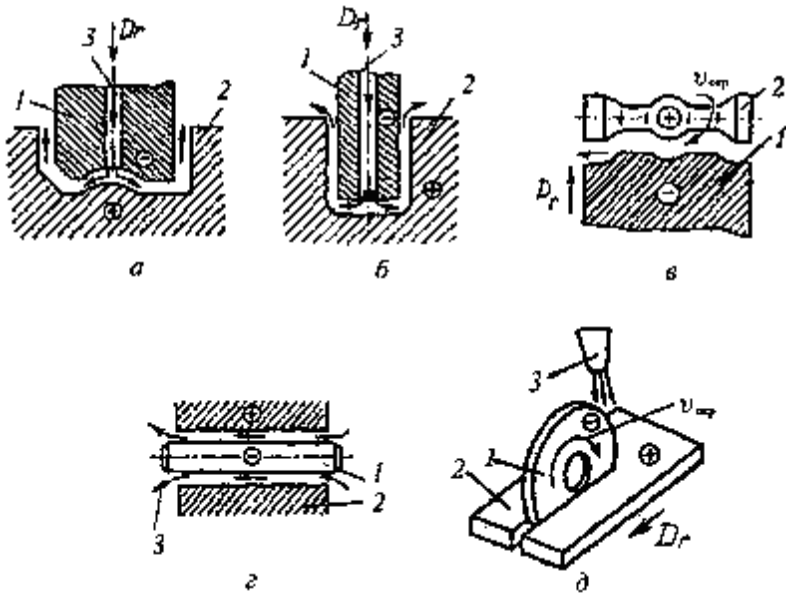

Рис. 32.6. Кинематическая схема операций ЭХО:
а — объемное копирование; *б* — прошивание; в — отрезка; *г* — калибрование;
д — вырезка; *1* — ЭИ; *2* — заготовка; *3* — подача электролита

Процесс широко используется при изготовлении ответственных деталей, металлической оптики и подготовке поверхности для нанесения покрытий.

32.3. Ультразвуковая абразивная размерная обработка

Ультразвуковая абразивная размерная обработка (УЗАО) заключается в изменении размеров, формы, шероховатости и свойств поверхности обрабатываемых заготовок за счет съема материала припуска хрупким скалыванием микрообъемов при импульсном ударном силовом воздействии частиц свободного абразива с ультразвуковой частотой f= 16—30 кГц.

Общие положения и схемы обработки. Ультразвуковая абразивная обработка эффективна при обработке заготовок из конструкционных материалов, имеющих низкую обрабатываемость резанием, электрофизическим и электрохимическим методами. Это заготовки из хрупких и твердых неэлектропроводных, химически стойких материалов, таких, как стекло, кварц, керамика, ситалл, алмаз , полупроводники (германий, кремний, арсенид галлия), азотированных и цементированных сталей и др.

При обработке используется энергия ультразвуковых колебаний (рис. 32.7).

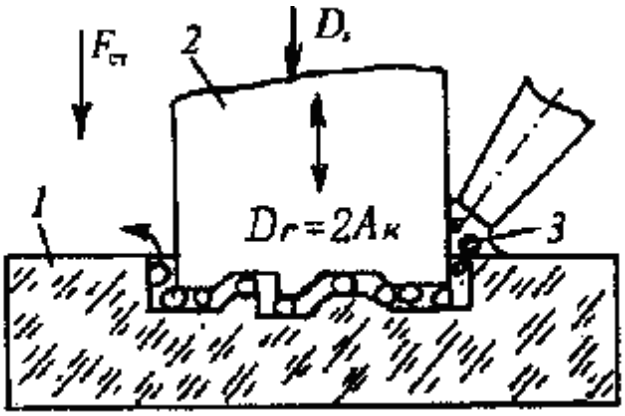

Рис. 32.7. Условная схема процесса УЗАО:
1 — заготовка; *2* — ультразвуковой инструмент; *3* — абразивная суспензия

Обрабатываемую заготовку *1* помещают в ванну под инструмент *2*. В зону обработки поливом или под давлением подают абразивную суспензию *3*, состоящую из абразивного материала и воды.

Главное движение при ультразвуковой обработке — продольные колебания торца инструмента с ультразвуковой частотой и амплитудой $A_к$. Движение инструмента относительно заготовки является вспомогательным движением подачи Ds, которая может быть различной: продольной $Ds_{пр}$, поперечной $Ds_{пл}$ и круговой $Ds_{кр}$ (при вращении детали или инструмента).

В ходе обработки инструмент обеспечивает постоянный прижим абразивных зерен к обрабатываемой поверхности детали с усилием $F_{ст}$, равным 1—60 Н.

Колеблющийся торец инструмента, ударяя по абразивным зернам, передает им энергию колебаний, а зерна, в свою очередь, из-за наличия острых граней откалывают частицы от хрупкого материала обрабатываемой заготовки.

Кавитационные явления, возникающие в жидкой суспензии при воздействии ультразвуковых колебаний, обеспечивают интенсивное перемещение абразивных зерен

под инструментом, замену изношенных зерен новыми и вынос сколотых частиц обрабатываемого материала из зоны обработки.

Источником механических колебаний, сообщаемых инструменту, является пьезоэлектрический или магнитоэлектрический преобразователь, преобразующий высокочастотные электрические колебания, вырабатываемые специальными генераторами, в механические колебания. Принцип работы преобразователя и генератора тока аналогичен соответствующим устройствам, используемым для сварки (см. разд. 4).

Изменяя форму инструмента и вид подачи, можно осуществить различные операции ультразвуковой обработки свободными абразивными зернами.

По кинематике процессы УЗАО полностью идентичны ЭЭО. Все схемы обработки делятся на три группы (рис. 32.8).

1. Получение поверхности заготовки копированием формы профильного инструмента. Инструмент внедряется в заготовку при своем поступательном движении (рис. 32.8, *а)*.

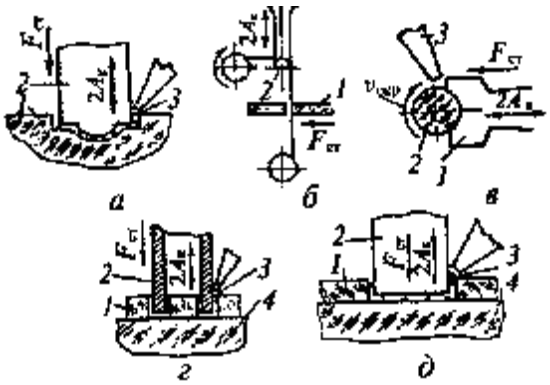

Рис. 32.8. Кинематические схемы операций УЗО:
а — копирование; *б* — вырезание непрофилированным инструментом; *в* — шлифование профилированным инструментом; *д* — вырезание от верстий, *1* — деталь; *2* — инструмент; *3* — по- дача абразивных зерен; *4* —стеклоподкладка

2. Формирование поверхности заготовки взаимным перемещением заготовки и непрофилированного инструмента (рис. 32.8, *б)*.

3. Формирование поверхности путем взаимного перемещения профильного инструмента и заготовки (рис. 32.8, *в)*.

Основы процесса УЗАО. Суспензия является фактическим инструментом, осуществляющим съем материалов при всех операциях УЗАО. Абразивная суспензия, применяющаяся при УЗАО, по массе включает 20—40% абразивного материала, 1—2% ингибитора — азотнокислого натрия ($NaN0_2$), остальное — вода. Высокое содержание воды в суспензии обеспечивает циркуляцию абразива в рабочей зоне и удаление продуктов обработки. В качестве абразивных материалов применяются эльбор (BN), алмазные порошки (С), карбид бора (B_4C), карбид кремния (SiC) и электрокорунд ($A1_20_3$).

Основной технологической характеристикой абразивных материалов являются их режущая способность относительно режущей способности алмазного порошка и размер абразивных зерен.

При УЗАО прецизионных деталей небольшой площади (до 30 мм^2) абразивную суспензию подают в рабочую зону вручную: пипетками, кисточками или резиновой грушей. Большие площади обрабатывают с принудительной подачей абразивной суспензии поливом, нагнетанием и вакуумным отсосом через технологические отверстия.

Инструменты при УЗАО представляют собой сменные элементы колебательной системы. Они обеспечивают передачу ультразвуковых колебаний абразиву и при этом быстро изнашиваются.

Форма и размеры рабочей части инструментов для большинства операций формообразования повторяют размеры и форму обрабатываемых элементов детали. Для снижения величины износа инструмент изготавливают из пластичных, но достаточно твердых отожженных сталей — У8, У10,40Х, 45. Инструменты со сложной формой рабочей части для операций объемного копирования и маркирования изготавливают из латуни.

Наиболее интенсивно изнашивается рабочий торец инструмента. Степень износа инструментальных материалов оценивается по отношению к износу заготовки.

Ориентировочные значения относительного износа при обработке инструментом из стали 45 различных материалов следующие: стекла — 0,5—1%; керамики — 2—10%; твердых сплавов — 40—150%. Таким образом, со снижением хрупкости обрабатываемого материала износ инструмента возрастает.

Для повышения износостойкости поверхность инструментов упрочняют закалкой, цементацией, азотированием и наклепом.

Характеристики размерной ультразвуковой обработки. Точность полученных размеров и значения шероховатости поверхности соответствуют значениям, получаемым при шлифовании (см. с. 582).

Производительность обработки можно оценивать в линейных $Q_л$ (мм/мин) или объемных Q_V (мм^3/мин) единицах. Она зависит от свойств обрабатываемого материала, используемого абразива, размеров его зерен, способа подачи абразива, режима ультразвукового воздействия.

На практике для определения производительности $Q_л$ процесса УЗАО пользуются следующей эмпирической формулой:

$$Q_л = \psi (A_к^2 F_{ст})^a f^b \quad (32.5)$$

где ψ — коэффициент, учитывающий вид обрабатываемого материала и абразивной суспензии; $A_к$ — амплитуда колебаний; a и b — коэффициенты, учитывающие скорость подачи суспензии и площадь обработки; F — относительное усиление рабочей подачи; f — частота колебаний.

Значения всех коэффициентов содержатся в справочных материалах по УЗАО. При УЗАО, так же как и при обработке резанием, и при ЭЭО увеличение производительности вызывает снижение точности обработки, поэтому обработку следует выполнять как минимум за два прохода — черновой, обеспечивающий высокую производительность, и затем чистовые, позволяющие обеспечить требуемую точность.

Основные технические характеристики размерной ультразвуковой абразивной обработки приведены в табл. 32.3.

Таблица 32,3. **Основные характеристики размерной ультразвуковой обработки**

Обрабатываемый материал	Производительность, мм/мин	Чистота поверхности	Точность обработки, мм	Относительный износ инструмента, %
Стекло, кварц, ситалл	5—20	4—6	0,05—0,1	0,5—1
Ферриты	3—8	6—7	0,03—0,1	1—2
Твердые сплавы	0,05—0,3	6—8	0,02—0,05	40—100

Станки для УЗАО по своему исполнению аналогичны станкам для ультразвуковой сварки, приведенным в разд. 4.

Примеры технологических операций УЗАО. Перед УЗАО заготовки из твердых, хрупких материалов приклеивают к подкладке из оконного стекла, что предотвращает образование сколов при выходе инструмента из заготовки в конце обработки.

Ультразвуковую вырезку (рис. 32.8, *г)* используют для формообразования заготовок

по наружному контуру. Плоские заготовки вырезаются из пластин полыми, одно- или многоместными инструментами. При групповой вырезке часовых камней из рубина многоместным инструментом в виде набора трубок одновременно вырезается 35 заготовок диаметром 1,6 мм и толщиной 1 мм. Используя абразивную эмульсию с карбидом бора, вырезку осуществляют за 3,5 мин.

Ультразвуковая прошивка (см. рис. 32.8, *д)* является наиболее распространенной операцией при получении сквозных отверстий различной формы с прямыми и криволинейными осями, пазов и щелей.

Прошивка сквозных отверстий осуществляется полым инструментом с прокачкой абразивной суспензии под давлением через центральное отверстие.

В серийном производстве при прошивке используется многоместный инструмент. Так, в пластине из феррита толщиной 1 мм одновременно получают 256 отверстий за 1 мин.

Ультразвуковое шлифование (рис. 32.8, *в*) используют преимущественно для чистовой обработки плоских наружных поверхностей вместо шлифования алмазным инструментом. При этом исключаются дефекты, присущие шлифованию, такие, как прижоги и трещины, достигается высокая точность ~ 0,01 мм, примерно в 2 раза возрастает производительность, снижается шероховатость поверхности.

Ультразвуковое удаление заусенцев основано на кави-тационном и абразивном разрушении заусенцев. Обработка ведется в рабочей жидкости, где обрабатываемые заготовки и абразивные зерна удерживаются во взвешенном состоянии под действием акустических течений, возбуждаемых ультразвуковыми колебаниями. Ультразвуком успешно обрабатываются заусенцы металлических деталей, полученные при штамповке методами вырубки, литые детали из пластмасс при снятии облоя.

32.4. Лучевые методы размерной обработки

К лучевым методам электрофизической обработки относятся электроннолучевая (ЭЛО) и светолучевая (СЛО) обработки. Различие носителей энергии обусловило технологические особенности методов лучевой обработки.

Электронно-лучевая размерная обработка (ЭЛО). При электроннолучевой размерной обработке для съема материала при формообразовании используют кинетическую энергию сфокусированного пучка электронов (рис. 32.9). Процесс ЭЛО осуществляется в вакууме при остаточном давлении газа $5 \cdot 10^{-2}$—10^{-3} Па.

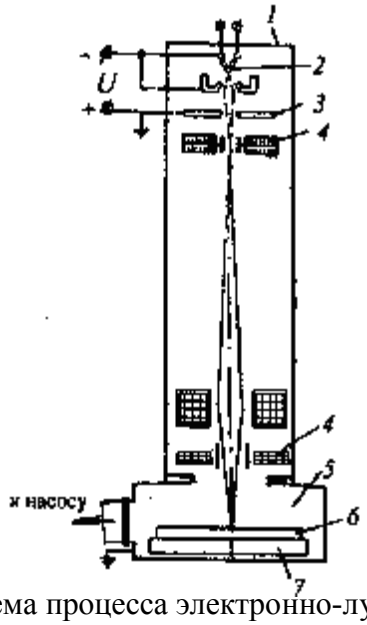

Рис. 32.9. Условная схема процесса электронно-лучевой обработки:
1 — электронно-лучевая пушка; *2* — катод; *3*— анод; *4* — фокусирующие и отклоняющие катушки; *5* — вакуумная камера; *б* — обрабатываемая деталь; 7 — координатный стол

Формирование, фокусировка и управление электронным лучом осуществляются в электронной пушке. Электроны, эмиттируемые катодом, ускоряются напряжением до 150 кВ, в результате скорость электронов в луче достигает $20 \cdot 10^4$ м/с. После фокусировки плотность энергии в пучке составляет 10^8— 10^9 Вт/см^2. Сфокусированный пучок электронов проходит в рабочую камеру и бомбардирует обрабатываемую поверхность. При бомбардировке кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую энергию обрабатываемого вещества. Преобразование происходит при неупругих столкновениях быстрых электронов с электронами атомов вещества и последующем взаимодействии возбужденных атомов с атомной решеткой, вызывающем увеличение температуры вещества.

Электронно-лучевой нагрев ведется в импульсном режиме. При используемой удельной мощности тепловое воздействие луча приводит к разрушению нагреваемого микрообъема материала за время одного импульса. Разрушение происходит по механизму взрывного вскипания с выносом материала из
зоны обработки в виде паров и капель. В результате на бомбардируемом электронным лучом участке поверхности формируется лунка.

На поверхности лунки образуется слой оплавленного металла, снижающий точность обработки. Размеры лунки, нагрев и доля жидкого металла на ее стенках регулируются мощностью и длительностью импульса, а также диаметром луча.

Формируемые в результате электронно-лучевой обработки поверхности определяются траекторией взаимного перемещения луча и детали. Устанавливаемый в рабочей камере манипулятор позволяет придавать заготовке поступательное и вращательное движение, а установленная в электронной пушке электромагнитная система развертки позволяет сканировать (перемещать) электронный пучок по заданному контуру.

Основные операции обработки — сверление глухих и сквозных отверстий, в том числе под углом к поверхности, — выполняются при неподвижном изделии и луче; фрезерование сквозных и глухих пазов, контурная резка листового материала выполняются при перемещении изделия относительно неподвижного луча или сканировании луча по контуру реза при неподвижном изделии.

Технологические параметры. Параметрами режима ЭЛО являются: ток луча I, ускоряющее напряжение U, ток фокусирующей системы $I_ф$ (определяющий диаметр электронного пучка d), рабочее расстояние (фокусное расстояние от центра фокусирующей системы до поверхности детали), скорость перемещения электронного луча относительно изделия v.

Одним из определяющих параметров процесса является удельная мощность q (Вт/см^2):

$$q = \frac{IU}{\pi D^4/4}, \qquad (32.6)$$

где D — диаметр лунки (обычно на 10—15 % больше d).

При ЭЛО применяют исключительно импульсные режимы, снижая количество расплавленного металла на обрабатываемой поверхности.

Для размерной ЭЛО характерны следующие режимы: моноимпульсный — обработка ведется одиночным импульсом, т. е. отверстие получается за время одного импульса; многоимпульсный — отверстие формируется в результате последовательного воздействия нескольких импульсов; режим обработки с перемещением электронного луча относительно заготовки с заданной скоростью.

Установлены следующие эмпирические соотношения параметров режима с геометрическими параметрами образующихся отверстий и пазов.

Диаметр $d_к$ и глубина H отверстия увеличиваются с ростом энергии W линейно, а зависимость $d_к$ и H *от* длительности импульса τ и тока луча имеет степенной характер:

$$d_K = k_E W;\ H = c_E W;$$

$$d_K = \kappa_1 I^n;\ H = (a1^2 + b1 + c1)^{-1}; \qquad (32.7)$$

$$d_\kappa = k_\tau \tau^m;\ \ H = c_\tau \tau^N,$$

где k_E, k_1, k_τ, c_τ c_E, a,b, c — коэффициенты, зависящие от свойств обрабатываемого материала, приводятся в справочной литературе.

Угол сходимости луча и положение фокуса луча относительно обрабатываемой поверхности определяют размеры и форму отверстия. Наибольшую глубину и наименьший диаметр отверстия в результате воздействия единичного импульса достигают при заглублении фокуса на 0,1—0,3 мм относительно обрабатываемой поверхности. В этом случае глубина обработки возрастает на 30%. При оптимальном положении фокуса и длительности единичных импульсов, обеспечивающих максимальную производительность обработки, глубина микроотверстий в зависимости от тока луча, напряжения и числа единичных импульсов выражается эмпирической зависимостью:

$$H = 4{,}4 \cdot 10^{-13} U^{6{,}02} I^{1{,}2} n^{0{,}6}. \qquad (32.8)$$

Процесс импульсной ЭЛО на оптимальных режимах характеризуется наличием минимального количества жидкой фазы и, как следствие, высокой точностью обработки.

Область применения ЭЛО. Электронным лучом обрабатываются как электропроводные, так и неэлектропроводные материалы. Их обрабатываемость не зависит от механических свойств материала, а определяется его физическими характеристиками: температурой плавления, теплоемкостью, удельной теплотой испарения и упругостью пара.

В первую очередь электронный луч применяют для размерной обработки твердых труднообрабатываемых материалов, таких, как алмаз, вольфрам, титан, твердые и высоколегированные сплавы, ковар, инвар, кварц, керамика, рубин, кристаллы кремния, германия, резистивные пленки на ситалловой и кварцевой подложках.

В качестве эффективных примеров применения ЭЛО можно назвать следующие. Перфорация отверстий (рис. 32.10, *а* — получение сквозных и глухих отверстий) в различных материалах используется при изготовлении фильтров, «потеющих» поверхностей для охлаждения камер сгорания и лопаток турбин. ЭЛО при моноимпульсном режиме обеспечивает получение отверстий диаметром 0,015—0,3 мм с максимальной глубиной 3—5 мм со скоростью перфорации до 5000 отв./с.

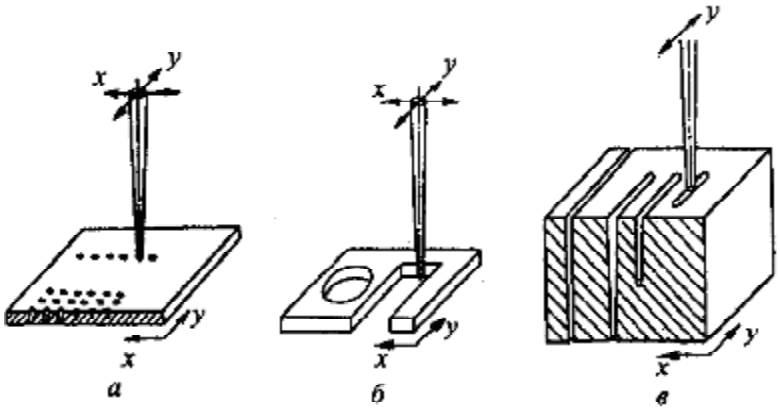

Рис. 32.10. Схемы ЭЛО: *а* — перфорация отверстий; *б* — контурная резка; в — фрезерование сквозных и глухих пазов

Изготовление единичных сквозных и глухих отверстий при сверлении кремниевых и ситалловых подложек, рубиновых часовых камней, черновом сверлении алмазных волок, при изготовлении топливной аппаратуры двигателей внутреннего сгорания и других изделий. Метод обеспечивает получе ние отверстий диаметром 0,01—0,5 мм с максимальной глубиной 10 мм (для металлов) и 15—20 мм (для диэлектриков).

Формообразование деталей сложной формы из листа и пластин с использованием контурной резки (рис. 32.10, *б)*. Метод позволяет получать детали из феррита, кремния, германия и фильеры с шириной реза 0,015—0,4 мм при наибольшей глубине обработки 3 мм. Фрезерование сквозных и глухих пазов приведено на рис. 32.10, *в*.

ЭЛО обеспечивает высокую точность и малую шероховатость обработанной поверхности. Так, шероховатость составляет: при сверлений отверстий — $^{0,4}\sqrt{}$—$^{1,6}\sqrt{}$; контурной резке — $^{0,8}\sqrt{}$—$^{Rz8/0}\sqrt{}$, а точность получаемых отверстий составляет ~1 % от диаметра.

К недостаткам метода относятся: необходимость использования вакуумной среды при обработке любых материалов; ограниченный круг выполняемых операций; высокая стоимость высоковольтного и вакуумного оборудования.

Светолучевая (лазерная) размерная обработка использует для съема материала при формообразовании деталей сфокусированный поток электромагнитной энергии высокой мощности, сформированный оптическим квантовым генератором (ОКГ). Светолучевая (лазерная) обработка (СЛО) во многих случаях заменяет электронно-лучевую, так как лазерная обработка ведется на воздухе и не требует специальных вакуумных камер. Она позволяет обрабатывать любые материалы независимо от их твердости и вязкости. Метод используется для сверления отверстий, вырезания заготовок, фрезерования пазов и т. д.

Благодаря созданию мощного промышленного оборудования лазерная размерная обработка используется не только для обработки прецизионных деталей, но и в машиностроении.

Схемы процессов приведены на рис. 32.11, *а*, *б*.

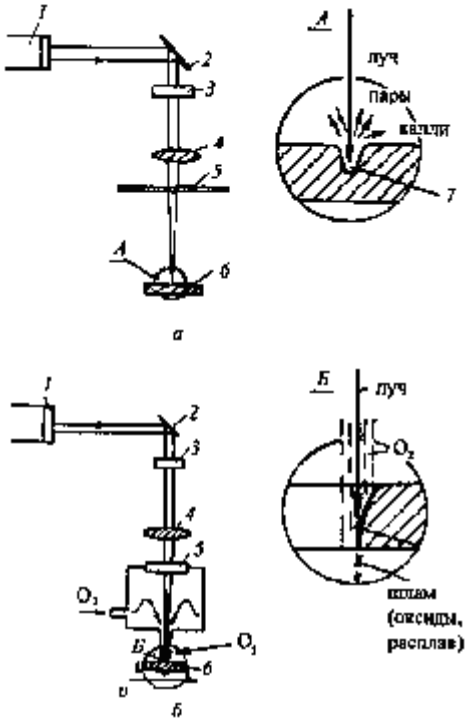

Рис. 32.11. Условные схемы лазерной обработки (а) и газолазерной резки (б): *1* — оптический квантовый генератор; *2* — зеркало; *3* — затвор; *4* — линза; *5* — окно; *6* — обрабатываемое изделие; *7*—лунка (кратер)

Интенсивный поток электромагнитной энергии формируется оптическим квантовым генератором (ОКГ). В зависимости от технологической задачи диаметр луча в фокусе

оптической системы составляет 0,001—0,2 мм и удельная мощность $1 \cdot 10^6$—$1 \cdot 10^9$ Вт/см^2.

Падающий на поверхность обрабатываемого материала световой поток частично отражается, а основная часть его поглощается электронами проводимости в поверхностном слое материала, увеличивая их энергию. Электроны передают энергию кристаллической решетке, вызывая нагрев, плавление и испарение металла. Нагрев при СЛО ведется в импульсном режиме. При удельной мощности 10^7—10^8 Вт/см^2 тепловое воздействие луча вызывает разрушение нагреваемого материала за время одного импульса. Разрушения происходят по механизму взрывного объемного вскипания с выносом материала в виде паров и капель. Вскипанию способствуют растворенные в материале газы. В результате на участке воздействия лазерного луча формируется лунка.

Практическое использование разрушения металлов объемным выкипанием и особенно испарением требует высоких энергозатрат. Заметное снижение энергозатрат достигается использованием вспомогательного газа для удаления продуктов разрушения из зоны обработки.

При лазерной резке излучение ОКГ обеспечивает локальное плавление металла, а удаление расплава из канала реза осуществляется динамическим воздействием газа (см. рис. 32.11,6).

В процессе облучения часть падающего светового луча отражается от обрабатываемой поверхности. Для снижения отражения при СЛО используется чернение обрабатываемой поверхности.

Эффективным способом повышения КПД процесса газолазерной резки металлов и горючих материалов (полимеров, дерева и т. п.) является использование в качестве газа
струи кислорода или воздуха. Этот процесс получил название газолазерной резки. Струя кислорода способствует предварительному окислению металла и уменьшению его отражательной способности; вступая в газотермическую реакцию с нагреваемым материалом, усиливает термические воздействия светового излучения и способствует удалению расплава из зоны реза.

Технологические основы процесса СЛО. Для размерной СЛО характерны следующие схемы обработки: моноимпульсная — обработка ведется одиночным импульсом ОКГ и отверстие получают за один импульс; многоимпульсная — отверстие получают при последовательном воздействии не- скольких импульсов; режим импульсной обработки с перемещением светового луча относительно заготовки; режим фрезерования и газолазерной резки с перемещением светового луча относительно заготовки.

Установлены основные соотношения параметров режима с геометрическими параметрами образующихся отверстий, пазов и резов, выполняемых СЛО. При прошивке отверстий лазером с заданной длительностью импульса глубина отверстия и его диаметр определяются из следующих соотношений:

$$h = n\sqrt[3]{\left(\frac{r_f}{\mathrm{tg}(\varphi/2)}\right)^3 + \frac{3W_и}{n\,\mathrm{tg}^2(\varphi/2)L_и}} - r_f\,\mathrm{tg}(\varphi/2); \qquad (32.9)$$

$$d = 2\sqrt[3]{r_f + \frac{3W_и\,\mathrm{tg}(\varphi/2)}{nL_и}}, \qquad (32.10)$$

где $W_и$ — энергия излучения в импульсе; $L_и$ — удельная энергия испарения вещества; r_f — радиус сфокусированного пятна; $\varphi/2$ — половинный угол раствора светового конуса; n — число импульсов при многоимпульсной прошивке.

Повышение качества и точности обработки обеспечивается уменьшением количества образующейся в процессе формирования отверстия жидкой фазы за счет обработки короткими импульсами и многоимпульсной обработки при минимальной энергии в импульсе.

При газолазерной резке взаимосвязь геометрических параметров реза с параметрами режима качественно оценивается из баланса энергии при резке:

$$h\,\upsilon b(c_{\text{р}}T_{\text{пл}} + L_{\text{пл}}) = \eta P, \qquad (32.11)$$

где b и h —глубина и ширина реза соответственно; v — скорость резки; $L_{\text{пл}}$ — удельная энергия плавления металла; η — эффективность процесса, равная произведению эффективного и термического КПД; P — суммарная мощность лазерного излучения и экзотермической реакции окисления.

Так как при лазерной резке и фрезеровании пазов ширина реза близка по своему значению к диаметру лазерного луча, то из уравнения (32.11) следует, что при резке листа толщиной h скорость резания υ пропорциональна мощности P. Из того же соотношения следует, что скорость резания υ обратно пропорциональна толщине листа.

Операции СЛО включают операции резки и контурной обработки листового материала, перфорации и сверления отдельных отверстий, фрезерования сквозных и глухих пазов, скрайбирования, обработки покрытий и пленочных структур.

Операции сверления прецизионных отверстий, перфорации и фрезерования пазов и скрайбирования производятся преимущественно с помощью импульсных лазеров на гранате и $C0_2$-лазеров, работающих в импульсном периодическом режиме.

Технологические возможности лазерной технологии на указанных операциях сравнимы с возможностями электронно-лучевой технологии.

При выполнении указанных операций обрабатывают практически любые материалы; получают отверстия малых диаметров (от нескольких микрометров до 0,3 мм) с соотношением глубины к диаметру, равным 10—25; метод используется при получении отверстий, ось которых расположена под углом к обрабатываемой поверхности; метод обеспечивает получение как глухих, так и сквозных отверстий пазов.

По своей производительности СЛО успешно конкурирует на прецизионных операциях с ЭЛО. На сегодняшний день, при выполнении прецизионных операций, СЛО уступает ЭЛО по точности, поэтому СЛО часто используют в качестве черновой обработки с последующим повышением точности методами механической, ультразвуковой или электрохимической обработки.

Наибольшее применение в промышленности среди операций СЛО нашли операции газолазерной контурной обработки и резки листовых материалов толщиной 0,2—10 мм. В этом диапазоне лазерная резка успешно конкурирует с существующими газоэлектрическими методами, обеспечивая качество реза, достаточное для того, чтобы либо полностью, либо частично исключить последующую обработку кромки. Наиболее целесообразно ее использование для получения деталей сложного контура в условиях мелкосерийного производства из наиболее применяемых конструкционных сплавов: углеродистых и нержавеющих сталей, титана и алюминия.

Ориентировочные режимы резания $C0_2$-лазером (d_r = 0,2 мм) различных металлических материалов приведены в табл. 32.4.

Таблица 32.4. Режимы и параметры резов конструкционных материалов и сплавов

Материал	Толщина листа, мм	Мощность лазера, Вт	Скорость резки, м/мин	Давление газа, МПа	Параметры резов		
					ширина, мм	глубина ЗТВ, мм	шероховатость, мкм
Углеродистая сталь	1,0 10,0	1000 1000	6,0 0,37	0,15 0,15	0,41 0,82	0,08 0,4	- 80
Нержавеющая сталь	2,0	1000	3,5	0,25	0,39	0,98	—
Титан	2,0	1000	2,2	0,15	0,344	—	—
Алюминий	2,0	1000	0,2	0,15	0,377	—	—

В зоне термического влияния на поверхности реза располагается литой оплавленный металл, насыщенный газом с измененным химическим составом из-за выгорания и диффузии химических элементов. В литой зоне наблюдаются поры, трещины и внутренние напряжения. Далее следует зона

металла, испытывающего воздействия высоких температур, с измененным химическим и структурным составом.

Толщина слоя зоны термического влияния не превышает 0,2—0,5 мм, но ее наличие необходимо учитывать при оценке эксплуатационных свойств получаемых деталей. Так, обработанная поверхность сталей и титановых сплавов в результате резки упрочняется вследствие закалки, поверхность высоколегированных сталей изменяет механические свойства (коррозионную стойкость, жаропрочность и т. п.). Поэтому вопрос о необходимости последующей обработки дефектного слоя решается в каждом конкретном случае исходя из эксплуатационных требований к деталям.

Для прецизионной резки тонколистовых конструкций, прошивки отверстий и фрезерования пазов в конструкционных материалах используют импульсно-периодическое излучение твердотельных лазеров. В этом случае получают более точные и качественные резы, однако производительность резки в этом случае намного ниже. Расширяется применение лазерной и газолазерной резки и контурной обработки неметаллических материалов. Обрабатываемые материалы и режимы обработки приведены в табл. 32.5.

Таблица 32.5. Режимы лазерной и газолазерной резки неметаллических материалов

Материал	Толщина обрабатываемого материала, мм	Скорость резки, м/с	Мощность излучения, кВт	Используемый газ
Стеклопластик	2,4	0,01	0,2	Воздух
Кожа	3,2	0,01	0,2	»
искусственная	50,0	0,002	0,2	»
Древесина	10	0,05	0,25	
Ткань				

При выполнении операции резки края реза остаются чистыми, а качество краев сравнимо с получаемыми при механической резке.

32.5. Комбинированные методы размерной обработки

Комбинированными называют методы, одновременно совмещающие в одном процессе размерной обработки заготовки несколько (два и более) традиционных методов, рассмотренных выше, например химическую и механическую обработку резанием.

Комбинированные методы являются результатом научно-технического совершенствования процессов размерной обработки. Они повышают производительность, точность обработки и ее экономические показатели.

Рассмотрим возможности разработанных на сегодняшний день и освоенных промышленностью комбинированных методов на примере ультразвуковой обработки резанием, плазменно-механической обработки и электрохимического шлифования.

Ультразвуковая механическая обработка (УЗМОР) включает операции точения, фрезерования, строгания, протягивания, сверления, зенкерова-ния и нарезания резьб.

Ультразвуковые колебания прикладываются к инструменту в осевом направлении подачи. В

зависимости от кинематики движений заготовки относительно режущей кромки они могут быть продольными, крутильными и изгибными. Механизм воздействия ультразвука на процесс обработки заключается в снижении сопротивления обрабатываемого материала пластической деформации в зоне стружкообразования, снижении трения в контактных зонах и облегчении поступления смазочно-охлаждающих веществ (СОВ).

Под действием приложенных к инструменту ультразвуковых колебаний напряжения в пластически деформируемой зоне резания приобретают пульсирующий характер. Под действием пульсирующих напряжений дислокации перемещаются (также меняя знак), отходя от препятствий и преодолевая их. В результате происходит разблокировка дислокаций, число одновременно преодолеваемых препятствий снижается, повышая подвижность дислокации. И, как следствие, происходит снижение сопротивления пластической деформации в зоне резания — снижается сила резания.

Колебания инструмента улучшают подвод СОВ в контактные зоны и, повышая скорость перемещения относительно обрабатываемой поверхности, снижают коэффициент трения. Результатом этого являются снижение температуры в контактных зонах и исключение образования нароста, снижение пластической деформации обрабатываемой поверхности, ее наклепа и значения остаточных напряжений, улучшение условий схода стружки, повышение износостойкости режущего инструмента.

При точении режущая кромка совершает колебания перпендикулярно обрабатываемой поверхности со значением амплитуды 2А = 18 мкм. При фрезеровании торцевыми и концевыми фрезами используют крутильные УЗК, а при протягивании — продольные. Черновое сверление выполняется с продольными, а рассверливание — с крутильными УЗК. Наиболее эффективно использование УЗК при нарезании наружных и внутренних резьб. При нарезании резьбы метчиком и плашками оно выполняется с наложением продольных колебаний и позволяет уменьшить в 6—8 раз момент резания, предотвратить налипание стружки на режущие кромки при обработке титана, повысить стойкость инструментов, снизить наклеп металла в зоне обработки, сократить трудоемкость операции, производя нарезку меньшим числом метчиков (например, сразу вторым).

В качестве оборудования при ультразвуковом механическом резании используются стандартные станки, оснащенные сменными ультразвуковыми головками. Эффективность применения способа определяется надежностью работы ультразвуковых головок и качеством акустических контактов.

Плазменно-механическая обработка включает локальный нагрев срезаемого слоя плазменной струей и последующий съем этого слоя режущим инструментом.

Основные затраты энергии при резании идут на пластическую деформацию обрабатываемого металла выше поверхности среза. Установлено, что в зоне стружкообразования в процессе пластической деформации углеродистая сталь нагревается до температур, не превышающих 300 °С. Термический нагрев зоны до 800—1000 °С увеличивает ее пластичность. При этом снижается усилие деформаций — усилие резания — и уменьшается объем металла, вовлеченного в упругопластическую деформацию при резании.

Удаляемый при резании металл нагревают плазменным электрическим разрядом на расстоянии, исключающем разогрев режущего инструмента. Регулированием тока разряда обеспечивается нагрев металла на глубину резания до высоких температур.

Увеличение пластичности материала и снижение его сопротивления деформированию позволяют увеличить производительность процесса резания, при этом в 2—3 раза возрастает стойкость режущего инструмента. Режимы плазменно-механической обработки некоторых материалов приведены в табл. 32.6. Из приведенных результатов следует, что при черновом точении нагрев увеличивает производительность обработки в 4—8 раз.

Таблица 32.6. Режимы плазменно-механической обработки сталей

Обрабатываемая заготовка	Режимы				Повышение производи-тельности, %
	нагрева		резания		
	Ток, А	Напряжение, В	Скорость резания, м/мин	Глубина резания, мм	
	Точение				
Слиток 10ГН2МФА	300	400	18	25	700
Отливка 110Г13Л	600	130	10	5	800
Поковка 15Ч2Н2МФА	260	140	100	7	400

Процесс чистовой обработки проводится на тех же станках, но уже без использования плазменного нагрева. Для плазменно-механической обработки используются стандартные станки, оснащенные плазменной установкой мощностью 150 кВА с рабочим током 200—500 А, напряжением 100—270 В. В качестве плазмообразующего газа в плазматроне используют воздух.

Электрохимическое шлифование (ЭХШ) выполняют токопроводя-щим алмазным или абразивным кругом на металлической связке, являющимся катодом в электролите. Преимущества ЭХШ по сравнению с традиционным шлифованием следующие:

- исключаются сколы и трещины в металле при обработке хрупких сплавов (типа ЮНДК35Т);
- исключаются прижоги при обработке вязких сталей (типа 12Х18Н9Т);
- резко повышается производительность.

Чистовое ЭХШ позволяет выйти на предельно возможную чистоту обработки обычным методом $^{0,1}\sqrt{}$

При электрохимическом шлифовании несколько снижается износ круга и его засаливание, обеспечивается обработка материалов, образующих нерастворимые пленки, исключающие обработку материала методами ЭХО.

Контрольные вопросы

1. Какова физическая сущность электрофизических методов размерной обработки?
2. Каковы сущность электрохимической обработки и область ее применения?
3. Назовите основные параметры электроэрозионной обработки и требования к материалу изделия!
4. Назовите механизм разрушения и пути снижения износа электрода-инструмента при ЭЭО и ЭХО.
5. Чем определяются точность и качество поверхности при ЭЭО?
6. Назовите технологические возможности лазерной обработки (обрабатываемый материал, операции обработки).

Возможны ли ЭЭО и ЭХО керамики?