

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра технологии машиностроения

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторно-практических работ по дисциплине «Теория электрофизических и электрохимических методов обработки» для студентов направления 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль «Технология машиностроения»



Воронеж 2016

Составители: д-р. техн. наук В.П. Смоленцев,  
д-р. техн. наук О.Н. Кириллов,  
д-р. техн. наук Е.В. Смоленцев,  
С.С.Юхневич

УДК 621.9.047

Методическое указания к выполнению лабораторно-практических работ по дисциплине «Теория электрофизических и электрохимических методов обработки» предназначено для студентов направления 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, Е.В. Смоленцев, С.С. Юхневич. Воронеж, 2016. 71 с.

В методических указаниях изложены требования, рекомендации и основные материалы к выполнению лабораторно-практических работ по дисциплине «Теория электрофизических и электрохимических методов обработки».

Предназначены для студентов 2 курса.

Табл. 11. Ил. 23. Библиогр. назв. 7.

Рецензент д-р. техн. наук, проф. А.В. Кузовкин  
Ответственный за выпуск зав. кафедрой канд. техн.  
наук, доц. И.Т. Коптев

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2016

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методические указания направлены на углубленное изучение теоретических вопросов по электрическим методам обработки материалов и выработку практических навыков использования расчетных методик для изготовления инструмента и технологической оснастки, используемых на современном оборудовании для электроэрозионной, электрохимической и комбинированной обработки сложнопрофильных деталей наукоемких изделий.

Методические указания содержат большое количество вариантов заданий, что позволяет преподавателю выявить индивидуальный уровень подготовки обучающихся.

Приведенная в методических указаниях литература достаточно полно обеспечивает обучающегося информацией для проведения занятий. Часть справочного материала приведена в приложениях к работе.

Методические указания содержат два раздела: первый – по теории электроискровой и комбинированной электроэрозионно-химической обработки, второй – по теории электрохимической размерной обработки.

# РАЗДЕЛ 1. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

## 1. Механизм электроискровой обработки

### 1.1. Описание процесса

Удаление металла с заготовки происходит в среде диэлектрика за счет микрозарядов, расплавляющих часть металла. Рассмотрим основные стадии протекания электроэрозионного процесса снятия припуска. По мере сближения электрода-инструмента с заготовкой напряженность  $E$  электрического поля возрастает обратно пропорционально расстоянию между электродами:  $E = U/S$ , где  $U$ -разность потенциалов электрода-инструмента и заготовки;  $S$ - зазор между электродами.

Наибольшая напряженность возникает на участке, где межэлектродный зазор минимален. Расположение этого участка зависит от местных выступов, неровностей на инструменте и заготовке, от наличия и размеров электропроводных частиц, находящихся в межэлектродном промежутке. На рис. 1 показано формирование расчетного зазора  $S$  между электродом-инструментом 3 и заготовкой 4. Зазор зависит от высоты  $h_b$  местного микро- или макровыступа на заготовке. Напряженность поля в районе выступа будет наибольшей, что повышает вероятность пробоя межэлектродного промежутка в этой точке. Кроме того, напряженность будет зависеть от наличия электропроводных частиц в диэлектрике 2.

Частица 1 уменьшает расчетный зазор до размера  $S_1 + S_2$ . Если не учитывать возможности присутствия в промежутке таких частиц, то следовало бы в расчетах принять зазор равным  $S$ . Поскольку истинный зазор будет меньше, чем расстояние между электродами, то напряженность поля на участках, где моются электропроводные частицы, окажется выше.

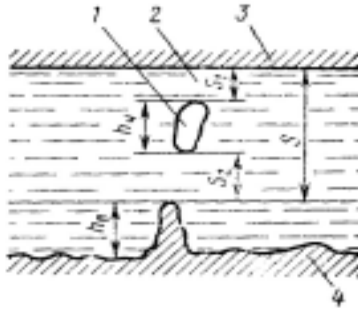


Рис. 1. Формирование расчетного зазора между электродом-инструментом и заготовкой

Если электроды сблизить до расстояния нескольких десятков микрометров, то в отдельных местах напряженность поля может достигнуть значения, при котором в месте наименьшего зазора возникает электрический разряд, через промежуток протекает ток, т.е. имеет место направленное движение электронов. В электрическом поле, возникшем в межэлектродном пространстве, в направлении, обратном движению электронов, происходит перемещение более тяжелых частиц - ионов. Электроны, имеющие меньшую массу, быстро достигают положительно заряженной поверхности заготовки и нагревают металл, вызывая расплавление и испарение его в месте прохождения тока. В результате образуется углубление в форме сферической лунки (рис. 2, а) радиусом  $R$ .



Рис. 2. Образование единичной (а) лунки и серии лунок (б), формирующих микроповерхность

Вылетевшие из лунки частицы металла охлаждаются жидкостью, которая находится в зазоре, и застывают в виде шариков. В качестве жидкости используют различные диэлектрики: дистиллированную деионизированную воду, масла, керосин. При воздействии серии разрядов обрабатываемая поверхность приобретает явно выраженные углубления в виде лунок (рис. 2, б). Такие лунки формируют микрорельеф, характеризующий шероховатость поверхности.

Поверхностный слой дна лунок испытывает воздействие термического цикла нагрева и быстрого охлаждения жидкостью. Свойства этого слоя отличны от свойств металла в глубине заготовки.

В электроискровом режиме большинство ионов, имеющих значительную массу, не успевает достичь отрицательно заряженного электрода и вызвать удаление материала с его поверхности. Съем металла происходит преимущественно с анода, который выбирают в качестве заготовки. Количество ионов, достигающих поверхности инструмента, определяет интенсивность его износа. Очевидно, чем меньше будет износ инструмента, тем точнее можно получить деталь. Для этого стремятся сформировать импульс с меньшей длительностью, чтобы ионы не успевали достичь катода. Однако при этом возрастает время обработки и снижается производительность. Полярность, при которой заготовка является анодом, называют прямой. Электроэрозионная обработка, при которой используют электроискровой режим, обычно осуществляется при прямой полярности включения электродов.

### 1.2. Стадии и закономерности протекания процесса

Первой стадией эрозионного процесса является пробой межэлектродного промежутка в результате образования зоны с высокой напряженностью поля. Для диэлектрических жидкостей, применяемых при электроэрозионной обработке, напряженность поля в момент разряда достигает десятков

мегавольт на метр. Под действием разряда происходит ионизация промежутка, через который между электродами 1 и 2 (рис. 3) начинает протекать электрический ток, т.е. образуется канал проводимости 3- *сравнительно узкая цилиндрическая область, заполненная нагретым веществом (плазмой), содержащим ионы и электроны.* Через канал проводимости протекает ток, при этом скорость нарастания его силы может достигать сотен килоампер в секунду. На границах канала происходит плавление металла, образуются лунки. На этой стадии форма лунки близка к сферической.

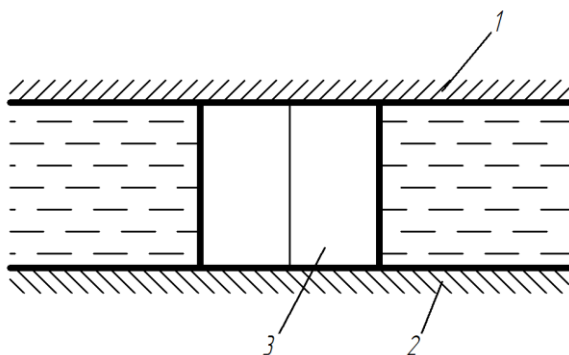


Рис. 3. Стадия пробоя межэлектродного промежутка

Второй стадией является образование около канала проводимости газового пузыря из паров жидкости и металлов. Вследствие высокого давления (до  $2 \cdot 10^7$  Па) канал проводимости стремится расшириться, сжимая окружающую его газовую фазу. Вследствие инерции сначала газовый пузырь и окружающая его жидкость неподвижны. Затем начинается их расширение. Граница канала проводимости движется с высокой скоростью в радиальном направлении (рис. 4).

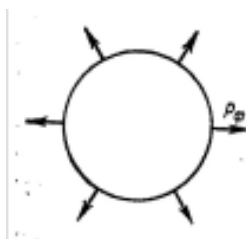


Рис. 4. Образование в канале проводимости газового пузыря

Скорость расширения пузыря может достигать 150 ... 200 м/с. На наружной границе образуется так называемый фронт уплотнения, в котором давление скачкообразно меняется от исходного в жидкости до высокого его значения на границе  $p_{\phi}$ .

Третьей стадией будет прекращение тока, отрыв ударной волны от газового пузыря и продолжение его расширения по инерции. Ударная волна гасится окружающей жидкостью. В начале этой стадии (рис. 5) в межэлектродном промежутке находятся жидкий металл 2 в углублениях электродов 1 и 6; газовый пузырь 3, внутри которого имеются пары 4 металлов заготовки и инструмента; жидкий диэлектрик 5.

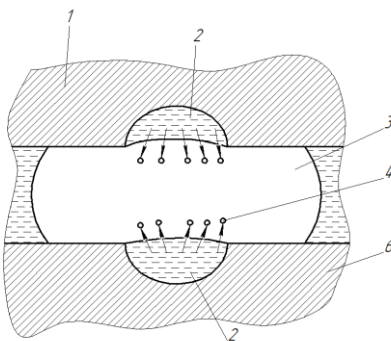


Рис. 5. Образование в лунках жидкого металла и плазмы с последующим выбросом металла в межэлектродное пространство



Когда газовый пузырь достигнет наибольшего размера, давление внутри него резко падает. Содержащиеся в лунках расплавленные капли металла вскипают, частично переходят в состояние неустойчивой плазмы, а затем за счет вакуума в пузыре и взрыва плазмы выбрасываются в межэлектродный промежуток, где застывают в холодной рабочей среде.

Не всякий импульс, вырабатываемый генератором, вызывает эрозию электродов. Может оказаться, что в момент наступления импульса велик межэлектродный зазор, напряжение, создаваемое генератором, мало для пробоя зазора, проявляется влияние и других факторов. При большом удалении лунки от выхода из межэлектродного промежутка, например в крупногабаритных заготовках, вынос твердых частиц из межэлектродного промежутка становится замедленным и процесс эрозионной обработки может прекратиться. Для его поддержания применяют принудительное прокачивание диэлектрической жидкости через зону обработки.

Если материал заготовки хрупкий, то под действием высоких температур возможно не только расплавление металла, но и его скалывание и удаление достаточно крупными частицами.

При изготовлении углублений разряды возникают не только на рабочей стороне электрода-инструмента, но и на его боковых поверхностях. Поэтому кроме рабочего торцевого зазора, регулируемого скоростью подача инструмента, формируется боковой зазор  $S_b$ , зависящий от размера, износа электрода-инструмента. Боковой зазор влияет на точность прошивки и должен учитываться при расчете электрода-инструмента (ЭИ).

Основные технологические показатели процесса (точность, качество поверхности, производительность) зависят от количества металла, выплавленного из лунки за один импульс, определяемого энергией импульса, временем действия импульсов и частотой их следования.

Энергия импульса  $A_{и}$  как работа электрического тока зависит от произведения силы тока  $I$  на напряжение  $U$  за время  $\tau$ .

$$A_{и} = \int_0^{\tau_{и}} IU dt \quad (1)$$

В первом приближении энергию  $A_{и}$  можно рассчитывать по длительности импульса  $\tau_{и}$  средним значениям силы тока и напряжения:

$$A_{и} = I_{ср} U_{ср} \tau_{и} \quad (2)$$

Среднее значение напряжения пробоя  $U_{ср}=(0,5...0,75)U_0$ , где  $U_0$  - напряжение холостого хода при разомкнутых электродах. Напряжение  $U_0$  легко контролировать в процессе обработки по показаниям вольтметра.

При электроискровом режиме принимают  $U_0=40...180В$ . В случае комбинированного электроэрозионно-химического процесса берут меньшие значения напряжения.

Среднюю силу тока определяют через ее значение  $I_{к}$ , при коротком замыкании электродов:  $I_{ср}=(0,5... 0,75)I_{к}$ . Силу тока короткого замыкания можно устанавливать и контролировать по приборам станка. Ее выбирают в зависимости от обрабатываемого материала и получения требуемой шероховатости поверхности. Для стали при чистовой обработке  $I_{к}=0,5...5 А$ , для твердых сплавов  $I_{к}=0,05...0,2 А$ .

Длительность импульсов  $\tau_{и}$  обратно пропорциональна частоте  $f$  их следования. Поскольку между импульсами имеются паузы, то при расчете  $\tau_{и}$  необходимо учитывать скважность  $q$  – отношение периода  $\tau_0$  повторения импульсов к их длительности  $\tau_{и}$  ( $q = \tau_0/\tau_{и}$ ):

$$\tau_{и} = 1/qf \quad (3)$$

Длительность импульса для черновой обработки сталей  $\tau_{и}=200...10^5$ мкс, для чистовой обработки  $\tau_{и}=5...200$  мкс. Для твердых сплавов длительность импульса еще на 2...3 порядка ниже.

При электроэрозионной обработке используются импульсы различной формы (рис. 6), но одной полярности (униполярные).

Кроме импульсов, приведенных на рис. 6, в генераторах типа ШГИ используют гребенчатые импульсы, где прямоугольные импульсы содержат просветы напряжения до половины и более их максимального значения.

Форма импульсов подбирается такой, чтобы при определенных параметрах импульса получить наибольшее углубление на заготовке, т.е. достичь наиболее эффективного использования подводимой энергии. Так увеличение тока в импульсе в два раза позволяет для определенного диапазона режимов поднять скорость эрозии в 2,5...3 раза. В рабочем диапазоне режимов выбирают определенное соотношение максимального значения силы тока в импульсе к его длительности [1; 3; 4].

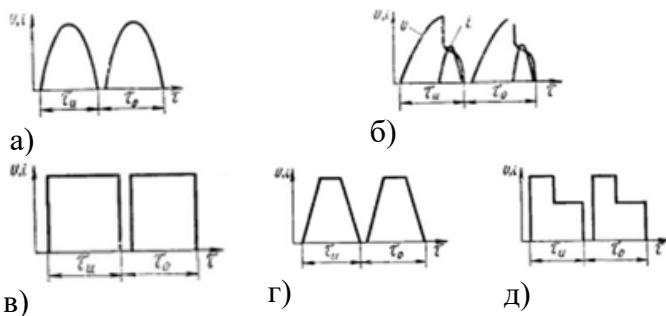


Рис. 6. Форма импульсов напряжения и тока (i) при обработке: а) полупериод переменного тока; б) от RC-генератора; прямоугольные (в), трапецидальные (г) и ступенчатые (д) импульсы, вырабатываемые электронным генератором.

### 1.3. Процессы, протекающие на электроде-инструменте (ЭИ)

Точно рассчитать температуру в окрестностях области разряда не представляется возможным, так как нет сведений о тепловых потоках, начальной конфигурация поверхности электрода и другой информации. Поэтому решение носит приближенный характер. Разряд, в частности, принимают стационарным точечным источником теплоты, теплофизические параметры - неизменными в течение времени протекания процесса, усредняют по времени тепловые потоки. Методика нахождения температуры одинакова для обоих электродов.

Распределение температуры в лунке показано на рис. 7.

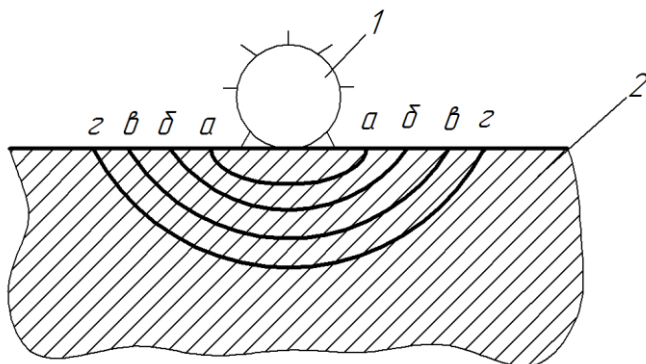


Рис. 7. Изотермы в зоне лунки в конце разряда

Точечный источник  $1$  (*разряд*) излучает теплоту равномерно во все стороны. Из-за малых размеров зазора большая его часть попадает на электрод  $2$ . Граница нагрева металла будет перемещаться по сфере, принимающей последовательные положения,  $a$ ,  $б$ ,  $в$ ,  $г$  до окончания действия тепла от импульса напряжения. Для расчета принимаем, что потеря теплоты в межэлектродном пространстве не

происходит. Из теории теплопередачи известно, что приращение температуры твердого тела зависит от энергии импульса  $A_{и}$ , расстояния  $r$  до источника теплоты, удельной теплоемкости  $c$  и плотности  $\gamma$  материала электрода, потерь энергии:

$$T = T_0 \theta \eta_{и} A_{и} / (c \gamma r^3), \quad (4)$$

где:  $T$ -температура в точке, находящейся в зоне действия импульса;  $T_0$ -начальная температура электрода;  $\eta_{и}$ -коэффициент полезного использования энергии импульса;  $\theta$ -безразмерный параметр температуры, учитывающий температуропроводность  $\alpha$  электрода, время  $\tau_{и}$  действия источника тепла:

$$\theta = e^{-1/4F_0} / (8\pi F_0 \sqrt{\pi F_0})$$

Здесь  $F_0 = \alpha \tau_{и} / r^2$ - критерий Фурье.

Для расчета необходимо знать значение коэффициента  $\eta_{и}$ , который характеризует долю энергии импульса, используемую на расплавление металла. Он учитывает следующие потери теплоты:

- на нагрев и испарение жидкости, образование ударной волны и газового пузыря. Эти потери оцениваются коэффициентом  $K_1$ : при электроискровом режиме  $K_1 \approx 0,5$  при электроимпульсном режиме  $K_1 \approx 0,47$ ;

- потери на нагрев второго электрода учитываются коэффициентом  $K_2$ . Его значение зависит от теплопроводности, теплоемкости, плотности материалов электродов, их расположения, причем большая часть энергии перейдет в электрод с большей теплопроводностью. При вертикальном движении подачи для верхнего электрода  $K_2 = 1 - 2m / (m + 1)$ , для нижнего  $K_2 = 1 - 2 / (m + 1)$ , где  $m = \sqrt{\lambda_{в} c_{в} \gamma_{в} / \lambda_{н} c_{н} \gamma_{н}}$ . Здесь  $\lambda_{в}$  и  $\lambda_{н}$  - коэффициенты теплопроводности электродов;  $c_{в}$  и  $c_{н}$  - удельные теплоемкости;  $\gamma_{в}$  и  $\gamma_{н}$  - плотности материалов соответственно верхнего и нижнего электродов;

-коэффициент  $K_3$  зависящий от свойств среды, в которой происходит обработка; для разных диэлектрических жидкостей он принимает значения от 0,2 до 0 (для керосина  $K_3 = 0,2$ ; для масел  $K_3 = 0$ );

-коэффициент  $K_4 = \pm 0,1$  зависящий от изменения напряжения. Если напряжение ниже номинала, то берется знак «-», если выше – знак «+».

Коэффициент полезного использования энергии

$$\eta_{и} = (1 - K_1)(1 - K_2)(1 - K_3)(1 - K_4) \quad (5)$$

Расчет температуры позволяет определить границу жидкого металла, зоны фазовых превращений в лунке и прилегающей к ней области. На рис. 8 показан пример распределения температуры в виде изотерм в конце действия импульса с энергией 0,54Дж длительностью 0,008

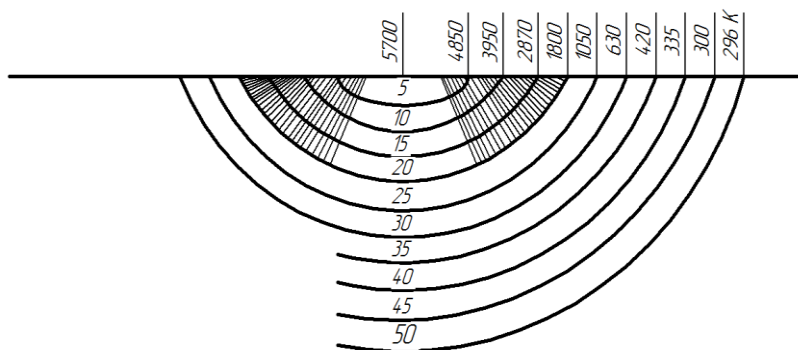


Рис. 8. Пример распределения температуры по глубине лунки

Расстояние между соседними изотермами составляет 5 мкм; значения температуры показаны на выносках. Температура плавления металла с учетом его перегрева на 80 К принята 1800 К. Перегрев необходим для обеспечения жидкотекучести металла при выбрасывании его из лунки. Глубина лунки, обозначенная радиальной штриховкой,

составит при этих условиях около 20 мкм. Зная распределение температуры, можно найти толщину слоя металла с изменившимися в результате термического цикла свойствами.

В процессе электроэрозионной обработки удаление металла с заготовки происходит за счет серии импульсов, действующих на смежные участки поверхности. Поэтому форма и размеры лунки будут отличаться от углубления после единичного разряда. На рис. 9 показано изменение диаметра  $d_{л}$  и глубины  $h_{л}$  лунки по сравнению с теми же параметрами ( $d_1$ ,  $h_1$ ) после единичного разряда. Эта разница будет зависеть от расстояния  $l$  между центрами соседних лунок. Взаимное влияние импульсов оценивают коэффициентом перекрытия  $\beta = l/d_1$ .

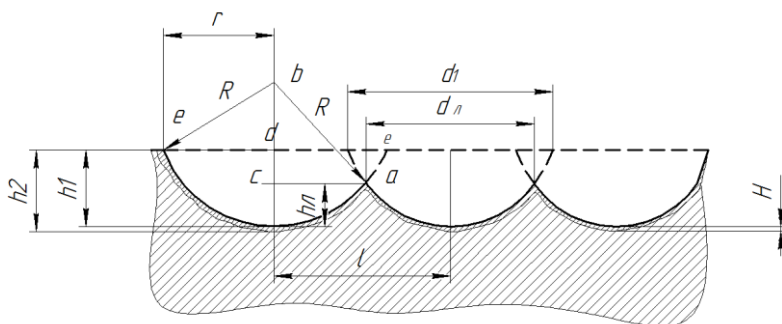


Рис. 9. Изменение размеров и характеристик лунки после действия серии разрядов:  $r$  - радиус единичной лунки;  $l$  - шаг между лунками;  $H$  - глубина измененного слоя

Условия протекания разрядов различаются, и размеры каждой лунки будут разными. Поэтому для расчета берут средние размеры углубления, которые находят из статистических данных.

#### 1.4. Особенности обработки непрофилированным электродом

Величина минимального натяжения проволоки может быть получена из [6]:

$$P_{н\ min} = \frac{k_0 \sigma(A_n)^{2/3}}{\sin \arctg \frac{2\varepsilon}{A}}, \quad (6)$$

где:  $P_{н\ min}$  - наименьшее натяжение проволоки, при котором электрод под действием силы единичного разряда колеблется с амплитудой, меньшей ширины прорезаемого паза;  $\sigma$  - предел прочности материала проволоки на растяжение;

Анализ формулы (6) показывает, что при расстоянии между опорами проволоки  $A$  величина прогиба  $\varepsilon$  (амплитуда колебаний) натянутой проволоки должна быть равна нулю, но тогда  $P_{н} \rightarrow \infty$ , что практически невыполнимо, так как в этом случае сила натяжения проволоки всегда превышает силу, необходимую для ее разрыва. Поэтому допускаются колебания проволоки на величину  $\varepsilon$ , гарантирующую стабильное протекание процесса без замыканий между катодом и стенками паза в детали

$$\varepsilon \leq \frac{1}{2} S_6$$

Для рекомендуемого диапазона электрических режимов величина межэлектродного зазора изменяется в широком интервале: для сталей  $S_6 = 0,0075 \dots 0,014$  мм; а для твердых сплавов  $S_6 = 0,0085 - 0,015$ .

Практически следует брать прогиб проволоки  $\varepsilon = 0,003 \dots 0,004$  мм.

Вследствие малой величины  $\frac{2\varepsilon}{A}$  с незначительной погрешностью можно принять в формуле (6)  $\sin \arctg \frac{2\varepsilon}{A} \approx \frac{2\varepsilon}{A}$ .

Тогда формула (6) в окончательном варианте примет вид

$$P_{н\ min} = \frac{k_0 \sigma (A_n)^{2/3}}{2\varepsilon} + P_{н0} \quad (7)$$

где:  $P_{н0}$  - начальное натяжение проволоки, необходимое для ее выпрямления и для компенсации сил упругости.



При использовании мягкой отожженной проволоки, где упругие напряжения невелики, начальная сила значительно ниже начальной силы натяжения твердой проволоки (табл. 1).

Таблица 1

Величина начального натяжения  $P_{H0}$ , Н проволоки-электрода (материал проволоки – Л62)

Проволока-электрод	Начальное натяжение для диаметра проволоки				
	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
Твердая	2-3	6-7	15-16	25-27	40-42
Мягкая	-	2,5-3	5-6	17-18	28-29

Большие значения  $P_{H0}$ , берут для более толстых заготовок, когда расстояние между опорами А и длина свободного участка проволоки велики.

Полученная величина натяжения устанавливается (на станке типа 4531) с помощью автотрансформатора, регулирующего момент сопротивления электродвигателя натяжения проволоки.

При расчетном натяжении (по формуле (7)) сечение проволоки должно быть достаточным, чтобы исключить возможность ее обрыва. В процессе обработки на катоде наблюдаются очаги концентрации напряжений в виде следов эрозии, поэтому действительная величина удельной силы разрыва будет ниже, чем расчетная. Тогда наименьшее сечение проволоки  $S_{min}$ , необходимое для работы ее без отрыва,

$$S_{min} = k_s \frac{P_{H \min}}{\sigma} \quad (7)$$

где:  $\sigma$ - удельная сила разрыва для проволоки в н/мм<sup>2</sup>;  $k_s$ - коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений от воздействия эрозии.

Для исследуемого диапазона диаметров проволоки величина коэффициента  $k_s$  меняется в пределах 1,15-1,20. С учетом формулы (7) получим:

$$S_{min} = \frac{k_s [k_0 A (A_H)^{2/3} + 2 P_{H0} \varepsilon]}{2 \varepsilon} \quad (8)$$

Для получения на выходе проволоки из детали минимального ее сечения необходимо назначить такую скорость перемотки проволоки, при которой износ катода не превышал бы предельной величины, вызывающей обрыв проволоки

$$\Delta V = V_{\text{пр min}}(F - F_{\text{min}})$$

где:  $\Delta V$ - наибольший допустимый износ катода в единицу времени в  $\text{мм}^3/\text{сек}$ ;  $V_{\text{пр min}}$ - наименьшая скорость перемотки проволоки в  $\text{мм}/\text{сек}$ , которая гарантирует при величине натяжения, рассчитанной по формуле (7), прочность проволоки (после прохождения ее через зону обработки) не ниже прочности на разрыв;  $(F - F_{\text{min}})$ - разность сечений проволоки на входе ее в деталь и на выходе из нее. Эта величина достаточно точно характеризует при заданной минимальной скорости перемотки объем снятого материала с проволоки за счет износа в процессе обработки:

$$V_{\text{пр min}} = \frac{\Delta V}{(F - F_{\text{min}})} \quad (9)$$

Сечение проволоки на входе ее в деталь может быть определено как площадь круга диаметром  $d_{\text{пр}}$

$$F = \frac{\pi d_{\text{пр}}^2}{4}$$

Износ катода определяется через энергию единичного импульса  $A_{\text{и}}$  и частоту следования импульсов  $f$ :

$$\Delta V = k_5 A_{\text{и}} f, \text{ мм}^3/\text{сек} \quad (10)$$

где  $k_5$  - коэффициент, зависящий от рабочей среды, материала, размеров электродов и продолжительности импульсов.

На оптимальных, с точки зрения производительности, режимах обработки величина коэффициента  $k_5$  изменяется в пределах: для сталей  $k_5 = (0,005 - 0,008) d_{\text{пр}}$ , для твердых сплавов  $k_4 = (0,0058 - 0,0067) d_{\text{пр}}$ ,  $\text{мм}^3/\text{Дж}$ .

Величина  $k_5$  зависит от диаметра катода, так как с его ростом повышается коэффициент использования подводимой энергии и объем материала, снимаемого с электродов, причем изменение объема материала в зависимости от диаметра катода происходит почти по линейному закону. Меньшие значения коэффициента  $k_5$  необходимо брать при обработке тонких деталей, особенно в тех случаях, когда раскрытие скобы станка, характеризуемое в формуле (7) величиной  $A$ , значительно больше толщины деталей.

Частота следования импульсов может быть определена экспериментально с помощью частотомеров, осциллографов или же с достаточной точностью рассчитана по формуле:

$$f = \frac{1}{2,3 RC \lg \frac{U-U_k}{U-U_{np}}} [\text{Гц}],$$

где:  $U$  - напряжение источника питания станка;  $U_k$  - напряжение в конце разряда;  $U_{np}$  - напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного пространства;  $R$  - сопротивление генератора;  $C$  - ёмкость конденсаторов;  $RC$  - генератора.

Таким образом, формулу (9) можно показать в виде:

$$V_{np \min} = \frac{\Delta k_5 A_n f}{\frac{\pi d_{np}^2}{4} - F_{\min}} \quad (11)$$

Степень влияния различных допущений на точность формул (7), (8) и (11) можно оценить при сравнении результатов, полученных расчетным и экспериментальным путем (табл. 2).

Следовательно, расчеты, выполненные по формулам (7), (8) и (11), позволяют с погрешностью не более 10-11% определить натяжение и скорость перемотки для всего диапазона используемых диаметров проволоки. Во всех случаях наблюдается некоторое превышение расчетного натяжения над экспериментальным, что гарантирует стабильное протекание процесса обработки без обрывов электрода.

Таблица 2

Сходимость расчетных и экспериментальных величин минимальной скорости перемотки и натяжения проволоки (материал анода – ВК20, материал катода – Л62, проволока твердая,  $W_{и}=5 \cdot 10^{-3}$  Дж,  $f=5 \cdot 10^3$  Гц,  $A=40$  мм,  $\varepsilon=0,003$  мм)

Диаметр проволоки, мм	Минимальное натяжение, Н		Отклонение расчетной величины от экспериментальной, %	Минимальная скорость перемотки, мм/сек		Отклонение расчетной величины от экспериментальной, %
	расчетное	экспериментальное		расчетное	экспериментальное	
0,10	1,15	1,2-1,3	8,9	5,67	5,17-5,5	6,3
0,15	2,92	2,6-2,7	10,2	2,12	2,17-2,33	5,9
0,20	5,08	5,2-5,3	3,5	1,42	1,5-1,67	10,5
0,25	17,5	17-18	0	1,07	1,17-1,2	7,0
0,30	28,3	28-29	0	0,875	0,83-0,917	0,0
Примечание. Расчет отклонений выполнен относительно среднеарифметических экспериментальных величин						

Возможно получение величины  $V_{\text{прmin}}$ , выходящей за пределы ее регулирования на станке. В таком случае необходимо в качестве электрода применить проволоку большего диаметра. Практически целесообразно ограничить скорость перемотки величиной 11,7-13,3 мм/сек. При расчете минимальной скорости перемотки может быть  $(F - F_{\text{min}}) < 0$ , т.е. наименьшее необходимое сечение электрода будет больше, чем сечение поступающей в зону обработки проволоки.

Это показывает, что при работе на выбранном электрическом режиме сечение проволоки недостаточно для создания минимального натяжения, необходимого для стабильного протекания процесса. В таком случае требуется взять электрод большего диаметра или же сделать режимы обработки более мягкими так, чтобы обеспечить возможность получения стабильного процесса.

Износ проволоки определяет достижимый радиус скругления углов на детали. Величина износа зависит, как видно из формулы (10), от энергии единичных импульсов и частоты их следования. Если при частоте  $0,5 \text{ кГц}$  эрозия происходит в виде отдельных лунок, то при той же энергии и частоте  $2 \text{ кГц}$  лунки частично перекрывают друг друга, причем наблюдается резкая граница между частью периметра сечения проволоки, участвовавшей в процессе обработки, и поверхностью, находившейся с прорезанной стороны паза. На стороне паза, не участвующей в процессе, имеются отдельные лунки от единичных разрядов через продукты эрозии в пазе.

При использовании импульсов той же энергии частотой  $6 \text{ кГц}$  происходит сплошная эрозия проволоки, при этом выделить отдельные лунки практически не удастся. Однако граница между рабочей и нерабочей частью выражена очень резко. На нерабочей стороне наблюдаются следы единичных разрядов через продукты эрозии, плотность которых заметно возрастает.

На рис. 10 показано сечение проволоки-электрода. Нерабочая часть периметра совпадает с исходным контуром проволоки; в остальной части, участвующей в процессе обработки, размеры проволоки до обработки и после обработки значительно различаются. Очевидно, что минимальный радиус скругления внутренних углов, который может быть получен в детали, не может быть меньше, чем радиус рабочей части проволоки  $r_n$  и межэлектродный зазор  $r_d \geq r_n + a$ .

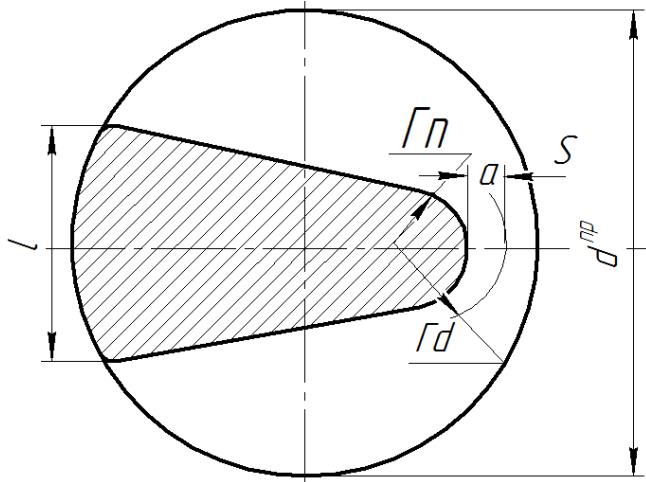


Рис. 10. Сечение проволоки-электрода через зону обработки:  $d_{пр}$  - диаметр исходной проволоки;  $l$  - размер проволоки в направлении, перпендикулярном стенкам паза;  $r_n$  - радиус скругления проволоки;  $r_d$  - радиус скругления детали;  $S$  - межэлектродный зазор на выходе проволоки на детали.

С незначительной погрешностью для исследуемого диапазона диаметров можно принять радиус скругления внутренних углов детали, как радиус круга с площадью, равновеликой сечению проволоки  $F_{min}$ , определенной по формуле (8):

$$r_d \approx \sqrt{\frac{F_{min}}{\pi}} \quad (12)$$

Проведенные исследования показали достаточную сходимость результатов, рассчитанных по формуле (12) с экспериментальными данными.

Для других режимов обработки и материалов соотношение между расчетными и экспериментальными величинами радиусов может быть другим, но во всех случаях погрешность расчета не превышает 10-12%. Для твердой и мягкой проволоки существенных различий величин радиусов не наблюдается.

## 1.5. Расчет рабочей части электрода-инструмента для комбинированной обработки полостей

### 1.5.1. Механизм комбинированной электроэрозионно-химической обработки

К комбинированным методам относится электроэрозионно-химическая обработка (рис. 11).

Электрод-инструмент и заготовку подключают к двум источникам: генератору постоянного напряжения, применяемому для размерной электрохимической обработки, и генератору импульсов. Иногда используют один источник питания, в котором формируется требуемая форма напряжения. В качестве рабочей среды применяют электролит.

Электрод-инструмент и заготовку подключают к двум источникам: генератору постоянного напряжения, применяемому для размерной электрохимической обработки, и генератору импульсов. Иногда используют один источник питания, в котором формируется требуемая форма напряжения. В качестве рабочей среды применяют электролит.

С помощью этого метода получают отверстия, углубления, пазы. Скорость  $v_n$  подача электрода-инструмента в несколько раз выше, чем при электроэрозионном или электрохимическом прошивании. Электролит через промежуток прокачивают со скоростью  $v_3$ .

Комбинированный метод электроэрозионно-химической обработки (см. рис. 11) представляет сочетание двух процессов, которые оказывают взаимное влияние друг на друга, значительно превышая производительность и снижая износ инструмента. Исследования показывают, что при каждом импульсе последовательно осуществляется сначала анодное растворение, а затем электрическая эрозия металла. Скорость съема определяется зависимостью  $Q = Q_1 + Q_3$ , где  $Q_1$  - скорость съема металла за счет анодного растворения,  $Q_3$  - скорость съема за счет эрозии.

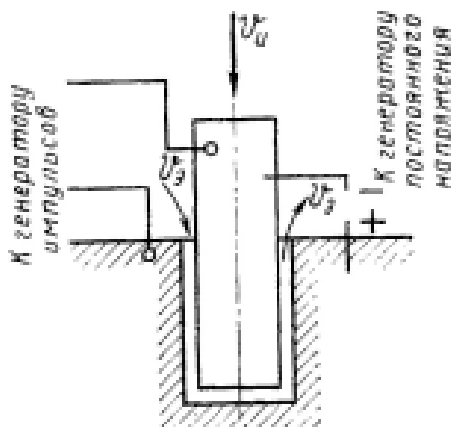


Рис. 11. Схема электроэрозионно-химической обработки

Процесс анодного растворения создает хорошие условия для пробы промежутка, так как на катоде-инструменте имеется парогазовый слой. Эрозия обрабатываемой поверхности, в свою очередь, способствует удалению пассивирующей пленки, значительно ускоряет диффузию и вынос продуктов обработки. Процесс наиболее эффективен при благоприятных условиях удаления продуктов обработки: малой площади рабочей поверхности электрода-инструмента, небольшом размере углубления. Так, при прошивании отверстий скорость подачи электродов после углубления на несколько миллиметров снижается в несколько раз.

Электрическая эрозия сильно сказывается на размерах шероховатости поверхности. На ней возникают углубления, которые несколько сглаживаются анодным растворением, но качество обработки все же хуже, чем при электрохимической размерной обработке (ЭХО). Износ электрода-инструмента от воздействия эрозии может быть снижен, если изготавливать его из эрозионностойких материалов (графита, вольфрама).



Энергоемкость такого метода значительно ниже, чем электроэрозионного. Это объясняется лучшими условиями протекания процесса, и за счет этого снижением числа разрядов, не производящих удаления металла.

### 1.5.2. Проектирование ЭИ

Инструмент имеет форму, обратную обрабатываемому контуру на детали, его размеры берутся с учетом межэлектродных зазоров. Исключением являются непрофилированные электроды, для проектирования которых требуется определить только диаметр и материал проволоки или стержня. В этом случае рассчитывают натяжение проволоки, а для стержня – устойчивость при условиях обработки. Все виды электродов-инструментов изнашиваются, и это следует учитывать при определении их начальных размеров.

При проектировании необходимо учесть возможность создания электродов-инструментов для черновой и чистовой обработки, их количество, оценить целесообразность использования на черновых операциях инструмента, ранее примененного для чистовой обработки. Если предусматривается доводка, электроды-инструменты корректируют на размер припуска последующей операции.

При проектировании следует учитывать требования к материалам, из которых изготовлен электрод-инструмент, их стоимость и дефицитность. Если площадь обрабатываемой поверхности  $F > 5 \cdot 10 \text{ мм}^2$ , то для снижения массы электрод-инструмент выполняют пустотелым (рис.13). В случае принудительной прокачки рабочей жидкости в электроде должны быть предусмотрены каналы, выходящие в зону обработки. На рис. 12 показана конструкция электрода-инструмента для прошивания полостей в матрицах для прессования.

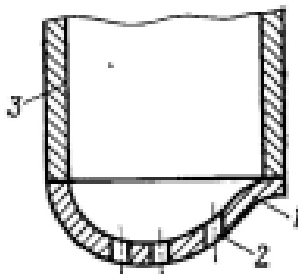


Рис. 12. Конструкция электрода-инструмента для прошивания полостей

Рабочая часть 1 выполнена из эрозионностойкого материала. В ней имеются отверстия 2 для прокачки жидкости из внутренней полости в зону обработки. Рабочая часть соединена с технологической 3, которая служит для закрепления инструмента, подвода тока и выполняется из дешевых конструкционных материалов.

Если электрод-инструмент имеет небольшие габариты, то его изготавливают цельным из материала, применяемого для рабочей части.

### 1.5.3. Выбор материалов

При выборе материала принимают во внимание его эрозионную стойкость, удельную проводимость, возможность изготовления инструмента требуемой формы с минимальными затратами, стоимость, прочность, коррозионную стойкость, отсутствие вредных для здоровья обслуживающего персонала выделений под действием высоких температур при разряде.

Для чистовой обработки, осуществляемой обычно на электроискровом режиме, наиболее часто используют инструменты из обычной и пористой меди, латуни. Медь должна быть без примесей, так как даже минимальные включения других элементов резко снижают электроэрозионные свойства, повышают износ.

Для черновых операций, выполняемых на электроимпульсном режиме, в качестве материала электродов-инструментов применяют графитовые и медно - графитовые композиции, алюминий, цинковые сплавы. Графитовые материалы стремятся выбирать мелкозернистой структуры – они обладают повышенной механической прочностью. Из таких материалов можно создать инструменты с острыми углами и тонким перемычками, эффективные на чистовых операциях. К недостаткам следует отнести повышенную стоимость по сравнению с материалами с более крупными зёрнами и более низкую производительность процесса. Для черновых операций чаще применяют дешёвые и стойкие графитовые материалы с укрупненным зёрном.

Для изготовления мелких отверстий используют инструменты из вольфрама, молибдена, латуни. Вольфрам и молибден обладают высокой эрозионной стойкостью в широком диапазоне режимов. Но это дорогие, дефицитные, трудно поддающиеся обработке материалы.

#### 1.5.4. Пути снижения износа ЭИ

Одним из путей снижения износа электрода-инструмента является использование материалов, имеющих высокую эрозионную стойкость. Если расположить известные материалы, используемые для изготовления электродов-инструментов, в порядке возрастания их эрозионной стойкости, то перечень будет выглядеть так: алюминий и его сплавы, серый чугун, латунь, медь, вольфрам, графитированные материалы.

Износ электродов зависит от формы и энергии импульсов, причем для различных материалов форма импульсов, обеспечивающая минимальный износ, различна. Значительное влияние на износ оказывает прокачка жидкости. У медных электродов - инструментов с уменьшением скорости прокачки износ снижается, у медно - графитовых композиций – повышается. Наиболее интересным решением

проблемы является создание условий, при которых износ электрода - инструмента компенсируется слоем углерода, осаждающегося на рабочей поверхности инструмента в результате разложения углеродосодержащих рабочих жидкостей. Если добиться равновесия между удаляемым за счет эрозии и осаждающимся на электрод - инструменте материалом, то износ полностью прекратится. Этого удастся достичь за счет особой формы импульса, вырабатываемого генератором. Импульсу придают крутой передний фронт с большим амплитудным значением напряжения, что обеспечивает нормальный разряд; далее напряжение снижают и ведут процесс в течение времени, необходимого для разложения рабочей среды и осаждения графита (так называемый импульс «гребенка»). Таким путем удастся сохранить достаточно высокую производительность и устранить или снизить до минимума износ электрода-инструмента. Например, у инструмента из меди, покрытой слоем графита, осажденного из рабочей жидкости, износ снижается в десятки раз по сравнению с медным электродом-инструментом.

При использовании проволочного электрода износ инструмента не оказывает влияния на точность вырезания профиля, так как при неизменном режиме обработки сечения электрода-инструмента на воде в заготовку и на выходе из нее постоянны в течение всего процесса изготовления детали.

## РАБОТА № 1. РАСЧЕТ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ЭИ ДЛЯ ПРОШИВКИ СКВОЗНОГО КРУГЛОГО ОТВЕРСТИЯ

2.1. Цель работы: обосновать выбор конструкции, материала, выполнить расчет размеров инструмента, выполнить обработку на оборудовании для электроэрозионной прошивки отверстий, произвести измерение полученного отверстия, внести корректировку в размеры ЭИ, произвести апробацию ЭИ на станке, внести изменения в методику расчета ЭИ.

### 2.2. Оборудование, приборы, инструменты:

- станок для электроэрозионной прошивки отверстий;
- электрод-инструмент;
- штангенциркуль с ценой деления 0,05 мм;
- микрометр с ценой деления 0,01 мм;
- средства вычислительной техники.

### 2.3. Методика расчета ЭИ

При прошивании отверстия постоянного сечения размеры электрода-инструмента определяют, исходя из размеров отверстия. Для круглых отверстий:

$$d_э = d_д - 2S_б, \quad (13)$$

где  $d_э$  – диаметр электрода-инструмента,  $d_д$  – диаметр отверстия в детали,  $S_б$  – боковой зазор, т.е. расстояние между противоположными участками поверхностей электрода и заготовки, параллельных направлению их движения.

Боковой зазор зависит от энергии импульсов, материалов электродов, состава и направления движения рабочей среды, размеров отверстия. На чистовых режимах  $S_б=0,005...0,05$  мм (Приложение 1). Если после электроэрозионной обработки предусмотрена дополнительная операция, то формула (13) примет вид:

$$d_э = d_д - 2(S_б + z), \quad (14)$$

где:  $z$  - припуск на последующую обработку. Припуск  $z$  должен быть не менее суммы значений шероховатости поверхности, глубины измененного слоя, погрешности в результате электроэрозионной обработки и погрешностей установки и базирования на последующей операции. Если электрод-инструмент ступенчатый, то расчет производят только для калибрующей части.

Минимальная длина электрода-инструмента:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4, \quad (15)$$

где:  $L_1$  – длина участка закрепления в электрододержателе;  $L_2$  – глубина отверстия;  $L_3$  – сокращение длины ЭИ за счет износа;  $L_4$  – длина участка, необходимого для калибровки отверстия, если оно сквозное. Для расчета берут  $L_1 \geq (2 \dots 3)d_d$ ; сокращение длины  $L_3$  можно оценить как износ  $\gamma_{И}$  в процентах от длины отверстия  $L_2$ , т.е.  $L_3 = L_2\gamma_{И}/100$ . Здесь для диаметров отверстий до 1 мм износ можно принять 30%; более 1 мм – 6...18%.

$$L_4 = (1,2 \dots 1,8)L_2.$$

Тогда:

$$L = (2 \dots 3)d_d + (2,2 \dots 2,8)L_2 + L_2\gamma_{И}/100, \quad (16)$$

Рассчитанную по зависимостям (16;17) длину увеличивают до предельного значения, при этом для сохранения устойчивости ЭИ необходимо длину консольной части следует ограничить величиной 10-12 диаметров отверстий.

Если отверстие глухое, то потребуются электроды-инструменты длиной  $L'$  для черновой и длиной  $L''$  для чистовой обработки:

$$L' = (2 \dots 3)d_d + L_2 + L_2\gamma_{И}/100 \quad (17)$$

$$L'' = (2 \dots 3)d_d + L_2 \quad (18)$$

В тех случаях, когда калибровки электрода-инструмента для калибровки глухого отверстия повышенной точности недостаточно, применяют несколько калибрующих электродов-инструментов с рабочей частью, имеющей длину

$L^i > L''$ . При смене электрода-инструмента следует сохранять единичные установочные базы; это позволяет устранить погрешности базирования.

#### 2.4. Порядок выполнения работы

А – анализируется индивидуальное задание на выполнение работы – 0,5 часа;

- изучается материал по механизму обработки – 1,5 часа;

- обосновывается выбор конструкции и материала ЭИ – 1 час;

- выполняется расчет рабочей части ЭИ – 2 часа;

- выполняется чертеж ЭИ – 1 час.

Б – изготавливается ЭИ – 1 час;

- выполняется настройка станка под одно из заданий – 1 час;

- обрабатывается отверстие – 1 час.

В – измеряются ЭИ после обработки – 0,5 часа;

- выполняется анализ полученных измерений и сравнение их с расчетными параметрами – 0,5 часа;

- корректировка размеров ЭИ, уточнение чертежа ЭИ и подготовка отчета по работе – 2 часа.

## 2.5. Задание на выполнение работы

Шифр задания	Характеристики детали				Режимы обработки		Расчетные параметры ЭИ, мм					Источник информации	
	Материал	Степень точности	Размеры отверстия, мм		Напряжение холостого хода	Частота импульсов, кГц	Диаметр	Длина					
			Диаметр	Глубина				L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>		L
1	Сталь	8	0,3	1,0	70	1							
2	Сталь	7	0,5	1,5	70	1							
3	Гв. сплав	12	0,5	1,5	120	68							
4	Гв. сплав	14	1,0	2,0	120	68							
5	Сталь	12	2,0	5,0	150	80							
6	Сталь	14	3,0	5,0	150	80							
7	Гв. сплав	14	4,0	10	90	22							
8	Гв. сплав	8	4,0	8,0	90	22							
9	Сталь	14	0,5	2,5	70	1							
10	Сталь	12	1,0	5,0	70	1							
11	Гв. сплав	12	0,3	1,5	120	68							
12	Гв. сплав	14	0,5	1,0	120	68							
13	Сталь	8	4,0	5,0	90	22							
14	Сталь	7	5,0	6,0	90	22							
15	Гв. сплав	14	3,0	5,0	70	1							
16	Гв. сплав	9	4,0	5,0	70	1							
17	Сталь	10	4,0	12	150	80							
18	Сталь	14	3,0	9,0	150	80							
19	Гв. сплав	14	2,0	7,0	90	44							
20	Гв. сплав	12	3,0	7,0	90	44							

Приложение 1. Источники [1;3]



## РАБОТА № 2. РАСЧЕТ ЭИ ДЛЯ ПРОШИВКИ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ

3.1. Цель работы: обосновать выбор конструкции, материала, выполнить расчет размеров инструмента, выполнить обработку на оборудовании для электроэрозионной прошивки отверстий, произвести измерение полученного отверстия, внести корректировку в размеры ЭИ, произвести апробацию ЭИ на станке, внести изменения в методику расчета ЭИ.

### 3.2. Оборудование, приборы, инструменты:

- станок для электроэрозионной прошивки отверстий;
- электрод-инструмент;
- штангенциркуль с ценой деления 0,05 мм;
- микрометр с ценой деления 0,01 мм;
- глубиномер с ценой деления 0,1 мм;
- средства вычислительной техники;

### 3.3. Методика расчета ЭИ

В рассматриваемом случае диаметр электрода-инструмента рассчитывается по методике, аналогичной приведенной в 2.3. Однако длину  $L$  следует выполнять по зависимостям, где учитывается только глубина отверстия, износ ЭИ (формула (18)).

Если после прошивки диаметр отверстия в донной части становится меньше допустимого, рассчитывают и изготавливают калибрующий электрод, для чего можно использовать ЭИ, рассчитанный по (16), где  $L_4$  заменяется участком подрезки  $L_5$ . Для уточнения длины  $L_5$  ЭИ для подрезки конца следует:

- рассчитать объем  $V_M$  металла, удаляемого из отверстия. Расчет выполняют по чертежу детали без учета изменения диаметра  $d_d$  отверстия по глубине  $L_2$ :

$$V_M = \pi \cdot d_d \cdot L_2 \quad (19)$$

- по износу  $\gamma_{И}$  ЭИ находят объем металла, удаленного с ЭИ  $V_{И}$ . В расчетах для латунного ЭИ можно принять  $\gamma_{И}=0,3$ .

$$V_{И} = V_{М} \cdot \gamma_{И} \quad (20)$$

- рассчитывают диаметр  $d_{эк}$  ЭИ на конце ЭИ. При этом не учитывают укорачивания ЭИ за счет износа со стороны торца. Принимая изношенный участок в качестве усеченного конуса с диаметром в основании  $d_{д}$ , у вершины  $d_{эк}$  и высотой  $L_2$ , по известным формулам находят:

$$d_{эк} = -\frac{d_{д}}{2} + \sqrt{\frac{d_{д}^2}{4} - d_{д}^2 + \frac{12V_{И}}{\pi L_2}} \quad (21)$$

- из чертежа детали находят минимально допустимый диаметр в донной части отверстия:

$$d_{д min} = d_{д} - \Delta d_{д min} \quad (22)$$

где:  $\Delta d_{д min}$  - нижнее предельное отклонение диаметра отверстия для заданной степени точности;

- если  $d_{эк} \geq d_{д min}$ , то требуется найти длину  $L_5$  участка ЭИ, подвергаемого подрезке:

$$L_5 = \frac{d_{д min}}{d_{д}} L_2 \quad (23)$$

#### 3.4. Порядок выполнения работы

А – анализируется индивидуальное задание на выполнение работы, подбирается справочная литература – 0,5 часа;

- изучается материал по механизму обработки – 1,5 часа;

- выполняется расчет рабочей части ЭИ – 4 часа.

Б – настройка оборудования и изготовление отверстия – 4 часа.

В – измерение ЭИ после обработки и анализ результатов, оформление отчета по работе - 2 часа.

### 3.5. Задание на выполнение работы

Шифр задания	Характеристики детали				Режимы обработки		Расчетные параметры ЭИ, мм				Источник информации	
	Материал	Степень точности	Размеры отверстия, мм		Напряжение холостого хода	Частота импульсов, кГц	Диаметр	Длина				
			Диаметр	Глубина				L <sub>1</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>		L <sub>5</sub>
1	Сталь	8	0,3	0,5	70	1						Приложение 1. Источники [1,3]
2	Сталь	7	0,5	1,0	70	1						
3	Тв. сплав	12	0,5	1,0	120	68						
4	Тв. сплав	14	1,0	2,0	120	68						
5	Сталь	12	2,0	4,0	150	80						
6	Сталь	14	3,0	6,0	150	80						
7	Тв. сплав	14	4,0	8,0	90	22						
8	Тв. сплав	8	4,0	12	90	22						
9	Сталь	14	0,5	1,5	70	1						
10	Сталь	12	1,0	10	70	1						
11	Тв. сплав	12	0,3	2,0	120	68						
12	Тв. сплав	14	0,5	2,0	120	68						
13	Сталь	8	4,0	10	90	22						
14	Сталь	7	5,0	10	90	22						
15	Тв. сплав	14	3,0	5,0	150	80						
16	Тв. сплав	9	4,0	10	150	80						
17	Сталь	10	4,0	10	90	44						
18	Сталь	14	3,0	6,0	90	44						
19	Тв. сплав	14	2,0	5,0	90	44						
20	Тв. сплав	12	3,0	6,0	90	44						

## **РАБОТА №3. ВЫБОР И РАСЧЕТ НЕПРОФИЛИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УЗКИХ ПАЗОВ**

4.1. Цель работы: обосновать и рассчитать вид и диаметр проволоки, а также режимы ее применения.

4.2. Оборудование, приборы, инструменты:

- серийный станок с непрофилированным электродом (4732 и др.);
- набор проволоки для ЭИ;
- микрометр с ценой деления 0,01 мм;
- осциллограф;
- средства вычислительной техники.

4.3. Методика выбора и расчета проволочного ЭИ

- для заданной ширины паза выбирают материал ЭИ;
- для материала детали, заданной точности паза, толщины заготовки, скорости обработки подбирают базовый диаметр проволоки. При этом учитывают, что по ГОСТ диаметр латунной проволоки изменяется через 0,02 мм;
- по ширине пазов и величине боковых зазоров рассчитывают диаметр проволоки и округляют размер с учетом стандартных диаметров проволоки;
- выбирают начальное натяжение проволоки.

4.5. Порядок выполнения работы

А – анализируется индивидуальное задание на выполнение работы – 0,5 часа;

- изучается материал по механизму обработки – 1,5 часа;

- обосновывается выбор конструкции и материала ЭИ – 1 час;

- выполняется расчет рабочей части ЭИ – 2 часа;

- выполняется чертеж ЭИ – 1 час.

Б – изготавливается ЭИ – 1 час;

- выполняется настройка станка под одно из заданий – 1 час;
- обрабатывается отверстие – 1 час.
- В – измеряются ЭИ после обработки – 0,5 часа;
- выполняется анализ полученных измерений и сравнение их с расчетными параметрами – 0,5 часа;
- корректировка размеров ЭИ, уточнение чертежа ЭИ и подготовка отчета по работе – 2 часа.

#### 4.4. Задание на выполнение работы

Шифр задания	Материал детали	Ширина паза, мм	Точность паза	Толщина заготовки, мм	Режимы обработки		Параметры ЭИ, мм		
					Напряжение, В	Скорость перемотки, мм/с	Материал	Диаметр, мм	Начальное напряжение, Н
1	Сталь	0,2	8	15	80	1,6			
2	Тв. сплав	0,2	7	20	90	1,7			
3	Сталь	0,31	6	50	90	0,9			
4	Тв. сплав	0,31	5	60	100	1,0			
5	Сталь	0,1	9	10	110	6			
6	Тв. сплав	0,1	10	12	90	5,5			
7	Сталь	0,11	8	8	100	5,7			
8	Тв. сплав	0,11	7	6	80	5,5			
9	Сталь	0,08	6	4	100	9			
10	Тв. сплав	0,08	9	5	110	10			
11	Сталь	0,07	10	2	120	12			
12	Тв. сплав	0,07	12	3	120	13			
13	Сталь	0,06	10	1	110	10			
14	Тв. сплав	0,06	9	0,8	110	10			
15	Сталь	0,05	8	0,8	120	12			
16	Тв. сплав	0,05	5	1	120	12			
17	Сталь	0,04	6	0,5	130	12			
18	Тв. сплав	0,04	9	0,6	130	15			
19	Сталь	0,26	10	80	90	1,2			
20	Тв. сплав	0,26	12	100	9	1,3			
21	Сталь	0,28	11	120	100	6			
22	Тв. сплав	0,28	10	100	100	7			
23	Сталь	0,3	8	80	110	5			
24	Тв. сплав	0,3	9	50	110	6			
25	Сталь	0,33	7	40	110	1,5			
26	Тв. сплав	0,33	6	30	100	1,6			
27	Сталь	0,28	8	20	100	1,2			
28	Тв. сплав	0,28	10	10	100	1,35			

## РАБОТА № 4. РАСЧЕТ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ЭИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОСТЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

5.1. Цель работы: обосновать выбор конструкции, материала, выполнить расчет размеров инструмента, выполнить обработку на оборудовании для электроэрозионно-химической прошивки полостей, произвести измерение полученной полости, внести корректировку в размеры ЭИ, произвести апробацию ЭИ на станке, уточнить размеры ЭИ.

### 5.2. Оборудование, приборы, инструменты:

- станок для электроэрозионно-химической прошивки полостей;
- электрод-инструмент;
- штангенциркуль с ценой деления 0,05 мм;
- микрометр с ценой деления 0,01 мм;
- глубиномер с ценой деления 0,02 мм;
- профильный шаблон;
- средства вычислительной техники.

### 5.3. Методика расчета ЭИ

Требуется найти сечение рабочей части электрода-инструмента для электроэрозионной прошивки полостей. Контур сечения приведен на рис.13.

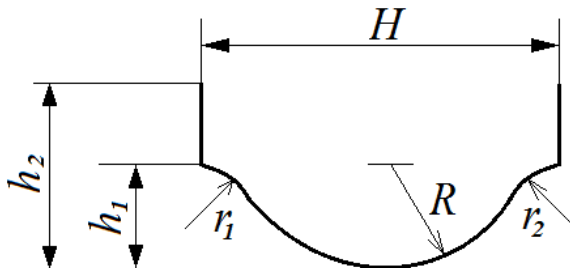


Рис.13 Сечение расчетной части объемного ЭИ

Ширина  $H$  верхней части ЭИ (рис.14) рассчитывается по зависимости:

$$H = H_d - 2S_6, \quad (24)$$

где:  $H_d$ -размер детали (выбирается из задания);  $S_6$ - боковой межэлектродный зазор (приложение 1).

Радиусы скругления рабочей части

$$R = R_d - S \quad (25)$$

$$r_1 = r_{1d} - S$$

$$r_2 = r_{2d} - S,$$

где индекс «д» относится к детали.  $S$  торцевой зазор, величина которого выбирается по приложению 1 для отверстий.

По глубине профильной части  $h_1$  производят ее построение и далее наносят общую высоту сечения  $h_2$  (рис.13), проставляют предельные отклонения размеров, принимая степень точности размеров ЭИ на одну величину ниже по сравнению с указанной для детали

#### 5.4. Порядок выполнения работы

А–найти номер своего задания, после чего анализируется индивидуальное задание на выполнение работы, выполняется чертеж сечения детали с размерами и допусками – 1,5 часа;

- изучается материал по механизму обработки – 1,5 часа;

- обосновывается выбор конструкции и материала ЭИ – 1 час;

-

- выполняется расчет рабочей части ЭИ – 1 час;

- выполняется чертеж ЭИ (с размерами и допусками)– 1 час.

Б – изготавливается ЭИ – 1 час;

- выполняется настройка станка под задание – 1 час;

- обрабатывается полость– 1 час.



- В – измеряются ЭИ после обработки – 0,5 часа;
- выполняется анализ полученных измерений и сравнение их с расчетными параметрами – 0,5 часа;
  - корректировка размеров ЭИ, уточнение чертежа ЭИ и подготовка отчета по работе – 2 часа.

### 5.5. Задание на выполнение работы

Шифр задания	Характеристики детали				Режимы обработки		Расчетные параметры ЭИ, мм					Источник информации	
	Материал	Степень точности	Размеры полости, мм		Напряжение холодного хода	Частота, кГц	Ширина	Размеры профильного участка					
			$h_{2д}$	$R_1, r_{1д}, r_{2к}, r_{1д}$				R	$r_1$	$r_2$	$h_1$		$h_2$
1	Сталь	8	10	8,6,7,5	40	10							
2	Сталь	7	10	9,5,5,6	40	10							
3	Тв. сплав	12	8	7,3,3,4	50	18							
4	Тв. сплав	14	10	10,6,5,6	50	18							
5	Сталь	12	6	5,3,3,4	55	18							
6	Сталь	14	13	12,8,5,7	55	18							
7	Тв. сплав	14	6	6,4,4,6	40	10							
8	Тв. сплав	8	7	8	40	10							
9	Сталь	14	10	10,5,6,5,7	50	18							
10	Сталь	12	10	12,10,6,5,8	50	18							
11	Тв. сплав	12	13	15	55	18							
12	Тв. сплав	14	8	10	55	18							
13	Сталь	8	6	10	40	10							
14	Сталь	7	7	60	40	10							
15	Тв. сплав	14	8	8	50	18							
16	Тв. сплав	9	10	15	50	18							
17	Сталь	10	9	12	55	18							
18	Сталь	14	9	9	55	18							
19	Тв. сплав	14	10	17	40	10							
20	Тв. сплав	12	11	10	40	10							

Приложение 1. Источники [1;2;3]

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Классификация электрических методов обработки.
2. Механизм формирования лунок при электроэрозионной обработке.
3. Формирование микроповерхности при электроискровой обработке.
4. Выбор рабочих сред при электроэрозионной обработке.
5. За счет чего происходит износ ЭИ?
6. Выбор материала для ЭИ.
7. Расчет размеров ЭИ.
8. Пути снижения износа ЭИ.
9. Что такое боковой межэлектродный зазор?
10. Выбор напряжения при электроэрозионной обработке.
11. Что такое «прямая полярность»?
12. За счет чего происходит удаление продуктов обработки при электроискровом процессе?
13. Механизм комбинированной электроэрозионно-химической обработки.
14. Схема комбинированной электроэрозионно-химической обработки.
15. Преимущества комбинированной электроэрозионно-химической обработки.
16. Область эффективного применения комбинированной электроэрозионно-химической обработки.

## РАЗДЕЛ 2. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ (РАБОТА № 5)

### 6.1. Основы теории ЭХО

Удаление металла при размерной электрохимической обработке (ЭХО) происходит под действием электрического тока в среде электролита без непосредственного контакта между инструментом и заготовкой. В основе процесса ЭХО лежит явление анодного растворения металлов. Анодное растворение может протекать в электролитах различного состава, в том числе в неагрессивных электролитах – водных растворах хлорида натрия, нитрата натрия и др. Эти соли дешевы и безвредны для обслуживающего персонала.

Под действием тока в электролите материал анода растворяется, и в виде продуктов обработки выносятся из промежутка потоком электролита. В результате реакций образуются газообразные продукты, которые удаляются в атмосферу. Катод, который служит инструментом, не изнашивается, что является одной из положительных особенностей процесса ЭХО.

При растворении в воде молекулы, например солей, распадаются на положительные (катионы) и отрицательные (анионы) ионы. Молекулы воды поляризуются и располагаются в виде сферы вокруг какого-то центрального иона (рис. 15), образуя двойной электрический слой (рис. 16).

Если электроды погружены в электролит, то на их поверхности протекает обратимая реакция с металлом ( $Me$ )  $Me \rightleftharpoons Me^{n+} + ne$ , где  $n$  - валентность,  $Me^{n+}$  - ион металла в растворе;  $e$  - электрон. На поверхности металла возникает положительный заряд, и к нему притягиваются отрицательно заряженные ионы из раствора. На границе электролита с металлом образуется так называемый двойной электрический слой (рис. 16), подобный тому, какой возникает на обкладках конденсатора. Один слой представляет поверхностные заряды в металле (+),

другой – ионы в растворе (-). За счет этого на электродах возникают скачки электрического потенциала. Протекание процесса ЭХО становится возможным, если приложить внешнее напряжение, превышающее разность  $\varphi_a - \varphi_k$ , где  $\varphi_a$  - скачок потенциала на аноде, а  $\varphi_k$  - скачок потенциала на катоде. При подключении электродов к источнику напряжения ионы начинают двигаться в электрическом поле через межэлектродный промежуток от электрода к электроду.

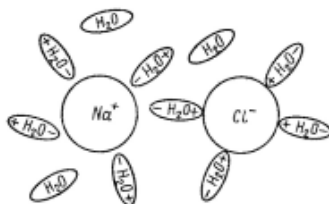


Рис. 14. Схема поляризации воды

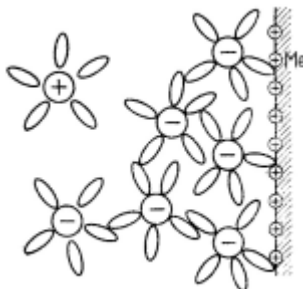
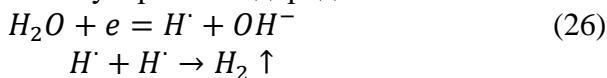


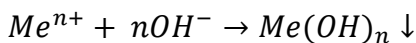
Рис. 15. Формирование двойного электрического слоя

На катоде происходит ускоренное разложение молекул воды с выделением молекулярного водорода:

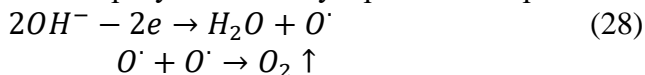


На аноде справедлива следующая схема перехода металла в нерастворимый гидроксид:





одновременно образуется молекулярный кислород:



Таким образом, в результате реакции на катоде выделяется газ (водород), на аноде – осадок (гидроксид металла) и газ (кислород). Продукты обработки выносятся потоком электролита из промежутка. При большой силе тока возможны также и другие реакции, в ходе которых на поверхности анода могут образовываться оксиды. Они снижают скорость растворения металла с заготовки и ухудшают ее обрабатываемость.

### 6.2. Съем металла при размерной электрохимической обработке (основное уравнение анодного растворения)

Если на электроде протекает только один электрохимический процесс, например растворение металла, то он описывается законами Фарадея. Согласно первому закону Фарадея:

$$m = \eta \alpha Q, \quad (29)$$

где:  $m$  - масса материала, растворенного с анода;  
 $Q$ - количество электричества, пропущенное через электролит;  
 $\alpha$  - коэффициент пропорциональности. При постоянном ток  $Q = I\tau$ , где:  $I$  - сила тока;  $\tau$ - время его прохождения. Тогда зависимость (29) можно записать в виде:

$$m = \eta \alpha / \tau, \quad (30)$$

Коэффициент  $\alpha$  называется электрохимическим эквивалентом:  $\alpha = An/F$ , где:  $A$ - атомная масса;  $n$ - валентность;  $F=96500$  - число Фарадея. Здесь  $\alpha$  выражается в граммах на ампер-секунду. Числовые значения  $\alpha$  для различных элементов приводятся в справочных материалах.

Электрохимический эквивалент  $\alpha_c$  любого сплава можно найти через эквиваленты  $\alpha_i$  входящих в него элементов и через массовое содержание в процентах элемента  $k_i$  в сплаве:

$$\alpha_c = 100 / \sum_i (k_i / \alpha_i)$$

Ниже приведены расчетные значения электрохимических эквивалентов некоторых сплавов:

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

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

Для практических целей необходимо знать *скорость линейного анодного растворения*, которая позволяет найти скорость подачи инструмента при изготовлении деталей. Если в уравнении (30) массу материала записать через площадь обрабатываемого участка  $F$  и перемещение  $l$  электрода-инструмента к детали, то  $m = Fl\gamma$ , где:  $\gamma$ -плотность материала.

Силу тока можно выразить через площадь участка  $F$  и плотность тока:  $I = JF$ . Тогда уравнение (30) примет вид:

$$Fl\gamma = \eta \alpha J F \tau, \quad (31)$$

Если левую и правую части выражения (31) разделить на время  $\tau$ , то отношение  $l/\tau = v$  называется скоростью линейного анодного растворения материала анода (детали)

$$v = \eta J \alpha / \gamma, \quad (32)$$

Плотность тока по закону Ома может быть выражена через напряжение  $U$  и удельную проводимость  $\chi$  рабочей среды, которая зависит от концентрации соли в жидкости (как правило, воды) и температуры раствора. В расчет принимается только та часть напряжения, которая используется для протекания электрохимической реакции. Сюда не входят потери напряжения на электродах и в токоподводящих цепях.

$$J = \eta U \chi / S, \quad (33)$$

С учетом формул (32) и (33) закон анодного растворения может быть записан в виде:

$$v = \eta \alpha \chi U / \gamma(S), \quad (34)$$

Если зазор  $S$  не изменяется в процессе анодного растворения, то режим ЭХО *стационарный*, в случае переменного, неустановившегося зазора - *нестационарный*.

Как следует из определения процесса, необходимым условием его осуществления является удаление продуктов обработки из прианодной и прикатодной областей. В большинстве случаев это достигается принудительной прокачкой электролита. Следовательно, помимо электрического поля определяющее влияние на процесс оказывают гидродинамические факторы.

Если измерить массу металла, растворенного с анода, то она окажется меньше, чем получается при расчете без учета потерь энергии по формуле закона Фарадея (29). Это объясняется тем, что часть количества электричества тратится на побочные реакции на электродах, образование газов, вторичные реакции. Эти потери можно учесть, введя коэффициент, который называют выходом по току  $\eta$ . Выход по току представляет отношение действительного и теоретически ожидаемого количества растворенного вещества и характеризует долю полезного использования тока.

Выход по току  $\eta$  при ЭХО зависит от ряда взаимосвязанных факторов - плотности тока, материала

заготовки, скорости прокатки, температуры и степени защелоченности электролита и др.

Ввиду большого числа факторов, влияющих на выход по току, найти его значение теоретическим путем не удастся, поэтому используют экспериментальный метод нахождения выхода по току для среднего значения рабочего диапазона режимов обработки. При использовании электролитов на базе растворов хлорида натрия выход по току для конструкционных низколегированных сталей  $\eta=0,8...0,85$ ; для жаропрочных сплавов  $\eta=0,85...0,93$ ; для титановых сплавов  $\eta=0,83...0,85$ . Если процесс ЭХО осуществляют в среде нитрата натрия, то для большинства сталей выход по току снижается ( $\eta=0,6...0,7$ ). Для алюминиевых сплавов, которые обрабатываются преимущественно в растворах нитрата натрия, выход по току может составлять  $1,1...1,35$ . Это объясняется тем, что при экспериментальном определении выхода по току учитывалось химическое растворение алюминиевого сплава в щелочных продуктах реакции.

В процессе реакций концентрация веществ в электролите в прианодной и прикатодной областях изменяется. Возникает *молекулярная диффузия*, т.е. перемещение частиц в зону с меньшей концентрацией. Молекулярная диффузия в теоретической электрохимии описывается законами Фика, согласно которым число переместившихся частиц пропорционально градиенту концентраций и времени протекания процесса. Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом диффузии. Приэлектродный слой электролита, в котором концентрация переменна, называют диффузионным.

Для нормального протекания электрохимических реакций необходимо обеспечить интенсивный вынос продуктов обработки из межэлектродного промежутка, поэтому электролит должен протекать со скоростью, достаточной для захвата и удаления твердых и газообразных частиц, образующихся в ходе реакций.



При расчете скорости следует учитывать свойства электролита: его вязкость, состав, стабильность характеристик и др.

Электролит может иметь ламинарный или турбулентный характер течения. При ламинарном потоке жидкость не перемешивается, и вынос продуктов обработки из межэлектродного промежутка происходит медленнее, чем в случае турбулентного течения. Однако расчет ламинарного потока значительно проще, и в технологических расчетах обычно принимают течение ламинарным.

Если скорость электролита мала, то часть продуктов обработки не успеет покинуть межэлектродный промежуток и будет в нем накапливаться вблизи рабочей поверхности электрода-инструмента и заготовки. Диффузия частиц в поток замедлится, и сила тока, проходящего через электролит, начнет уменьшаться даже при увеличении разности потенциалов между электродом-инструментом и заготовкой.

Напряжение  $U_0$  на клеммах источника питания током превышает тот же показатель, используемый для анодного растворения на величину потерь напряжения  $\Delta U$ . Тогда уравнение (34), где  $U$  - напряжение, используемое для анодного растворения примет вид:

$$v = \eta \frac{\alpha}{\gamma} \chi \frac{U - \Delta U}{s} \quad (35)$$

При прохождении тока через токоведущие шины, электрод-инструмент, межэлектродный промежуток и заготовку происходят потери. Если обозначить напряжение на зажимах источника питания через  $U_0$ , то:

$$U_0 = U + \Delta U_T + \Delta U + \Delta U_3, \quad (36)$$

где:  $\Delta U_T$ - потери напряжения в зажимах и токоведущих шинах;  $\Delta U$ - потери напряжения в двойном электрическом слое (эти потери представляют собой разность потенциалов анода и катода);  $\Delta U_3$ - потери напряжения при прохождении тока через заготовку.

Потери  $\Delta U_T$ , в зажимах и шинах обычно удается снизить до долей процента и их, как правило, в расчетах не учитывают. Потери напряжения в заготовке  $\Delta U_3$  принимают во внимание, только когда деталь имеет большие размеры, а ее конструкция не позволяет разместить токоподводы вдоль ее длины. Примером таких деталей являются лопатки энергетических турбин с длиной свыше 1000 мм и площадью сечения профиля не более 200...250 мм<sup>2</sup>, где подвод тока возможен только через замок на конце лопатки. В этом случае напряжение  $\Delta U_3 = 4...5$  В, и его следует учитывать в расчетах.

Потери напряжения  $\Delta U$  зависят от режима обработки, состава металла заготовки и состава электролита, напряжения и других факторов. Среднее значение потерь напряжения для рабочего диапазона режимов обработки составляет 2-5 В. Нижний предел напряжения  $\Delta U$  в расчетах ограничивают значением 5 В. Для того чтобы процесс анодного растворения шел интенсивно, необходимо повысить напряжение на электродах по сравнению с потенциалом разложения электролита  $\varphi_a - \varphi_k$ . Однако при напряжении выше 15...18 В начинают возрастать потери в приэлектродных слоях - подводимая мощность растет быстрее, чем полезная. Кроме того, с увеличением напряжения снижается точность за счет растворения металла на участках заготовки, удаленных от обрабатываемой зоны. При напряжении свыше 30 В могут возникнуть пробои межэлектродного промежутка. Исключение составляет струйный метод обработки, при котором напряжение выбирается в пределах 100...800 В. Для большинства схем обработки используют диапазон напряжений 9...18 В (для титановых сплавов  $U = 25...30$  В).

### 6.3. Формирование микроповерхности.

В технологии машиностроения качество поверхности характеризуют геометрическими (микрорельеф) и физическими (макротвердость, обезуглероженный слой и др.) показателями слоя материала, прилегающего к поверхности.

Шероховатость. Формирование микрорельефа поверхности при ЭХО зависит от структуры материала заготовки, от состава, температуры, скорости прокатки электролита, электрических параметров режима. Все эти факторы постоянно изменяются по времени, и процесс анодного растворения в каждой точке протекает по-разному. Отличия могут быть незначительными и практически не влияют на скорость съема металла, но вызывают образование микронеровностей.

Если ЭХО выполняют после механической обработки, то в начале процесса анодного растворения микрорельеф повторяет профиль заготовки. После точения, например, необходимо удалить с помощью ЭХО припуск, в 6 ... 10 раз больший, чем начальная высота неровностей, пока не перестанет проявляться влияние обработки, предшествующей ЭХО. В дальнейшем при стабильных параметрах процесса шероховатость поверхности не меняется. Характер микронеровностей зависит от структуры обрабатываемого материала. Чаще наблюдается межкристаллитное растравливание, которое и определяет шероховатость поверхности (рис. 16).

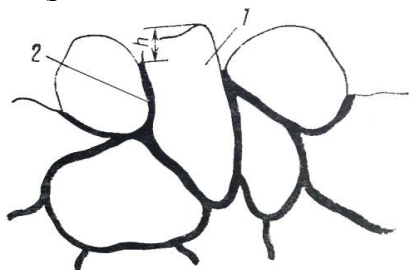


Рис. 16. Структура материала после ЭХО

Зерна 1 металла, как правило, растворяются медленнее, поэтому после удаления материала 2 между зернами возникают углубления размером  $h$ . Следует подчеркнуть, что все способы контроля шероховатости позволяют оценить только часть углубления, поскольку при ощупывании поверхности иглой не удастся достичь крайней точки углубления. Чем мельче зерно, тем меньше глубина межкристаллитного растравливания. Поэтому шероховатость поверхности крупнозернистых сплавов обычно выше, чем у сплавов с мелким зерном. Глубина микронеровностей зависит от плотности тока. Для большинства сплавов с увеличением плотности тока шероховатость поверхности снижается. На рис. 17 показано изменение шероховатости никелевого сплава при различной температуре электролита.

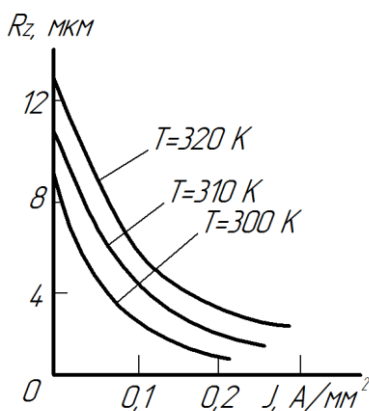


Рис. 17. График изменения шероховатости

При плотности тока  $J \geq 0,15 \dots 0,2\text{ А/мм}^2$  шероховатость поверхности остается практически постоянной. При высоких плотностях тока ускоренное растворение сплавов может наблюдаться не по границам, определяющие шероховатость поверхности. Чем ниже температура электролита, тем при той же плотности тока меньше высота неровностей, но и ниже скорость растворения металла.

В большинстве случаев используются электролиты с температурой 290 ... 310К. Для обработки титановых сплавов применяются электролиты, нагретые до 320К, а в случае чистовой обработки, например нержавеющей сталей, электролит охлаждают до 277К. Применение импульсного тока из-за повышения его плотности во время импульса способствует снижению высоты неровностей на 20 ... 30% по сравнению с ЭХО на постоянном токе.

У сталей, подвергнутых некоторым видам термической обработки, наблюдается повышенная шероховатость при малых скоростях прокатки электролита (менее 6 ... 8 м/с) и при большой его защелоченности ( $\text{pH} > 11$ ).

При обработке в электролитах на базе хлорида натрия шероховатость поверхности конструкционных сталей  $R_a = 0,32 \dots 0,10$  мкм, нержавеющей сталей и сплавов –  $R_a = 1,25 \dots 0,32$  мкм, титановых сплавов –  $R_a = 2,5 \dots 1,25$  мкм, алюминиевых сплавов –  $R_a = 2,5 \dots 0,63$  мкм.

Физические свойства поверхности. После ЭХО в поверхностном слое не наблюдается снижения содержания углерода и изменения твердости. В отличие от механической обработки после ЭХО отсутствует наклеп. Напряжения в поверхностном слое после ЭХО повышаются вследствие растравливания. Из рис. П.14 видно, что межкристаллитные углубления имеют малый радиус закругления, что способствует концентрации напряжений. Очевидно, что для уменьшения напряжений в поверхностном слое используют те же способы, что и для снижения шероховатости: повышают плотность тока, применяют охлажденные электролиты, используют импульсивный ток, стабилизируют параметры электролита и его гидродинамический режим.

Как показано в §1.1, при анодном растворении заготовки на катоде выделяется водород. Ввиду малого расстояния между электродами он может достичь поверхности заготовки, наводороживая ее. Наводороживание повышает хрупкость материала и снижает усталостную прочность.

Эффект наводораживания поверхности особенно сказывается у титановых сплавов, а стали, никелевые, алюминиевые сплавы не подвержены ему вовсе. Если обеспечить скорость протекания электролита не ниже расчетной (чего в ряде случаев, к сожалению, не удастся достичь), то практически весь водород выносится из зазора и наводораживания не наблюдается.

Влияние качества поверхности после ЭХО на механические свойства материалов. При эксплуатации деталей на них могут воздействовать статические, ударные и знакопеременные нагрузки. Низкая шероховатость поверхности после ЭХО (по сравнению с механической обработкой) повышает механические свойства материалов. Этому же способствует отсутствие следов инструмента на поверхности, более плавный профиль на вершинах выступов, одинаковое качество поверхности во всех направлениях.

Отсутствие же наклепа поверхности от воздействия инструмента или его малое значение при комбинированном способе обработки снижает механические показатели, особенно сопротивление усталости. Ухудшают качество поверхностного слоя микрораствавливания по границам зерен, которые являются концентраторами напряжений, и наводораживание сплавов.

Предел прочности при статических и ударных нагрузках образцов из конструкционных сталей после ЭХО при растяжении, сжатии, кручении и изгибе такой же, как у механически обработанных образцов. Положительно и отрицательно действующие факторы взаимно уравновешиваются, и ЭХО для деталей с такими же видами нагружения можно использовать в качестве финишной операции.

У образцов из сплавов, склонных к межкристаллитному раствавливанью (никелевых, титановых и др.), предел прочности на растяжение и угол загиба после ЭХО снижаются по сравнению с механически обработанными на 10 ... 15%,

поэтому для деталей высоконагруженных конструкций после электрохимической обработки необходимо механически удалять припуск на глубину растравливания. Для никелевых сплавов этот припуск должен быть не менее 0,15 мм, титановых не менее 0,3 мм. Предел прочности образцов из никелевых и титановых сплавов при сжатии и кручении после ЭХО близко к тем же показателям образца после механической обработки.

Испытания образцов на ударную вязкость показывают, что их результаты не зависят от сравниваемых видов обработки, поэтому детали после ЭХО можно использовать в конструкциях, работающих при ударных нагрузках.

Соппротивление усталости сплавов определяется при многократном приложении нагрузки, которая по значению может быть намного ниже предела прочности. В материале под воздействием повторяющихся деформаций возникают изменения, в результате чего детали ломаются при сравнительно небольших усилиях.

По значению предел выносливости образцы из конструкционных сталей и алюминиевых сталей, и алюминиевых сплавов после ЭХО близки к шлифованным образцам. Детали из этих материалов после ЭХО можно использовать в конструкциях, работающих в условиях вибраций, знакопеременных нагрузок. Детали из никелевых, титановых и других сплавов, у которых могут быть растравливания поверхностного слоя, имеют пониженное сопротивление усталости. При использовании таких сплавов в конструкциях, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, следует удалять слой металла, имеющий растравливание.

Одно из основных методов повышения механических свойств материалов после ЭХО является последующее полирование. Это довольно трудоемкий процесс, используемый обычно для снижения шероховатости поверхности. Для деталей после ЭХО наиболее приемлемо

виброполирование, которое позволяет снять растравленный слой и выполнить наклеп поверхности, необходимый для получения высоких механических свойств.

ЭХО часто используют взамен точения, фрезерования, долбления и других операций, после которых шероховатость составляет  $R_z=20 \dots 40$  мкм. В процессе ЭХО шероховатость составляет  $R_a \leq 0,3$  мкм. Таким образом, после ЭХО высота неровностей заметно ниже, что способствует повышению сопротивления усталости сплавов. Необходимо на стадии проектирования детали учитывать возможность снижения сопротивления усталости после ЭХО и компенсировать это снижение уменьшением шероховатости поверхности.

Полностью восстанавливает усталостные характеристики сплава его упрочнение после ЭХО. Упрочнение выполняется виброударным, пневмогидравлическим, дробеструйным и ротационным способами. При этом по сравнению с упрочнением механически обработанных деталей требуется несколько снизить усилия, время обработки и др.



#### 6.4. Параметры токоподводов [7]

При выборе конструкции токоподвода необходимо стремиться к максимальному использованию контурной площади касания, что дает возможность передавать большие токи. После этого в зависимости от величины контурной поверхности выбирается нагрузочное усилие. На рис. 18 представлена конструктивная схема токоподвода к станку для ЭХО лопаток.

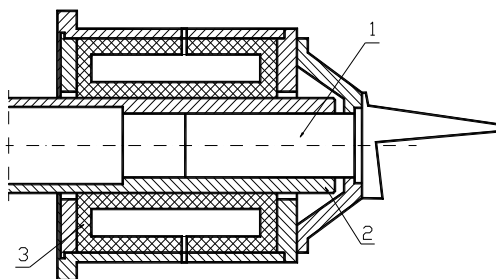


Рис. 18. Токоподвод через хвостовик лопатки

Заготовка лопатки (рис. 18) устанавливается в приспособление таким образом, что её хвостовик 1 входит в зазор между разведенными контактными секторами 2. Последние помещены в объем, образованный резиновой диафрагмой 3, выполненной так, что между ней и корпусом имеется замкнутая полость.

Работает механизм следующим образом: масло от насоса нагнетается в замкнутую полость, резиновая диафрагма 3 деформируется и прижимает контактные сектора 2 к хвостовику лопатки 1. Для охлаждения контактной поверхности в секторах выполнены каналы для протока охлаждающей жидкости. По [7] токоподвод обеспечивает надежное пропускание тока до 16 кА.

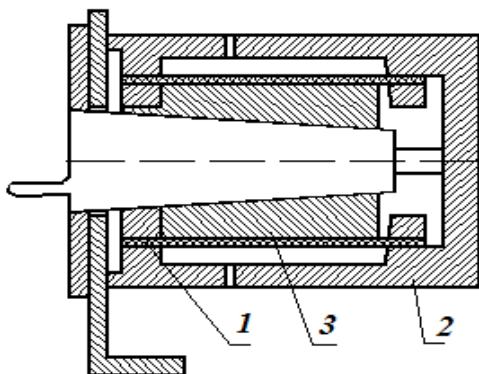


Рис. 19. Токоподвод к хвостовику лопатки

Токоподвод (рис.19) выполнен следующим образом. В коробку 1 закрепленную на специальном кронштейне, помещены токоведущие шины 2, которые специальными пружинами разводятся при загрузке заготовки. Поджим шин к хвостовику осуществляется при нагнетании масла в замкнутые полости, образованные плоскими резиновыми диафрагмами 3 и корпусом. За счет изменения площади мембраны производится закрепление лопатки с силой, достаточной для надежного контакта между токоподводом и лопаткой. Охлаждение токоподвода водяное через отверстия в корпусе.

При проектировании станков для электрохимической обработки в тех случаях, когда один из электродов участвует во вращательном движении, необходимо проектирование скользящего электрического контакта в форме щетки.

Сюда следует отнести станки для электрохимического, эрозионно-химического и алмазно-электрохимического шлифования.

При этом подвод тока может осуществляться через шпиндель станка, само обрабатываемое изделие, инструмент: токоведущие шлифовальные или полировальные круги, а также специальные электроды, установленные в камере для анодно-абразивной очистки деталей.

Конструктивные параметры скользящего контакта должны учитывать большие диапазоны изменения скоростей (от 0,05 до 15 м/с), токов (от 200 до 5000 А), напряжений (от 1,5 до 40 В). Для этих диапазонов можно выделить три наиболее характерных конструктивных исполнения:

а) токоподвод к шлифовальному кругу в станках для электрохимического и комбинированного шлифования, где скорость скольжения в щеточном контакте составляет 5 ... 15 м/с, а токи не превышают 600 А;

б) токоподвод к изделию в станках круглошлифовальных, полировальных, прошивочных и др. станков, где скорость скольжения в щеточном контакте измеряется в м/мин и не превышает 5 м/мин, а токи 600 А;

в) токоподвод в станках для анодно-абразивной очистки, где скорости скольжения в контакте составляют до 5 м/мин, а токи достигают 5000 А.

Во всех случаях к конструкции токоподводящего устройства предъявляются следующие требования: минимальные потери энергии, надежность в работе и долговечность, удобство в эксплуатации, простота конструкции.

На рис. 21 показан токоподвод на 1590 А конструкции Института электросварки им. Патона. Ток подводится с помощью четырех щеток 2, выполненных из латунной сетки и поджимается к контактному кольцу пружинами с усилием 0,6 ... 1 МПа. Корпус 1 и цапфа 3 изготовлены из стали. Клемма 4 служит для подведения шины.

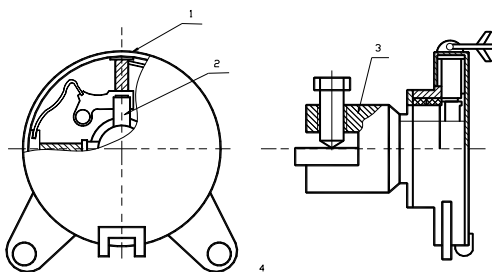


Рис. 20. Конструкция токоподвода на 1500 А

На рис. 21 показана конструкция токоподвода к шпинделю шлифовального круга круглошлифовального станка, где применены стандартные щетки и нормализованные щеткодержатели, применяемые обычно в электрических и транспортных машинах.

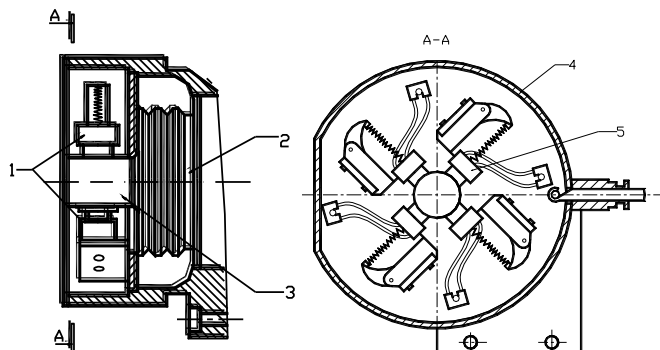


Рис. 21. Токоподвод к шпинделю шлифовального круга электроабразивного станка для наружного (внутреннего) шлифования

Бронзовое контактное кольцо 3 (рис.21) смонтировано на шпинделе со стороны привода. Весь узел токоподвода: щеткодержатели 1, щетки 5 – закрыты кожухом 4 с отверстием для охлаждения.

При монтаже щеточного узла необходимо придерживаться следующих рекомендаций[7]:

а) зазоры между поверхностью токосъемного кольца и нижней кромкой обоймы щеткодержателя должны быть минимальными и не превышать 0,5 ... 1,5 мм;

б) зазоры между щеткой и внутренними стенками щеткодержателя должны составлять не менее 0,08 мм и не более 0,2 ... 0,3 мм. Меньший зазор может привести к заклиниванию щеток, а увеличенный – вызвать повышенную

амплитуду вибрации, скалывание и обгорание боковых сторон щеток;

в) шероховатость обработки внутренних поверхностей обоймы щеткодержателя должна быть не менее  $R_a = 1,25$  мкм, чтобы свести к минимуму трение между щеткой и щеткодержателем;

г) для предотвращения образования на токосъемном кольце кольцевых выработок, щеткодержатели следует располагать с возможностью смещения при регулировке в аксиальном направлении;

д) при установке нового комплекта щеток необходимо произвести притирку щеток (рабочей поверхности);

е) при замене щеток необходимо ставить щетки тех же марок, которые стояли ранее.

При конструировании токоподвода к электроду, вращающегося со скоростью до 5 м/с при величине тока до 600А, следует в основном придерживаться тех же конструктивных решений, что и при конструировании токоподводов к электроду, имеющему высокую частоту вращения. Это связано с возможностью применения разработанных и проверенных конструкций токоподводящих устройств со стандартными щетками и щеткодержателями. Однако в этом случае следует обратить внимание на ухудшение условий охлаждения щеточного узла в связи с малой частотой вращения контактного кольца, и стремиться к более тщательной пригонке щеток к контактному кольцу.

Если по технологическим соображениям имеется необходимость реверсирования движения электрода, то следует уменьшить допустимую плотность тока на щетку ввиду уменьшения площади соприкосновения контактных поверхностей, а также уменьшить максимальный зазор между щеткой и обоймой щеткодержателя.

На рис. 22 показано торцевое исполнение токоподвода к шпинделю круглошлифовального станка.

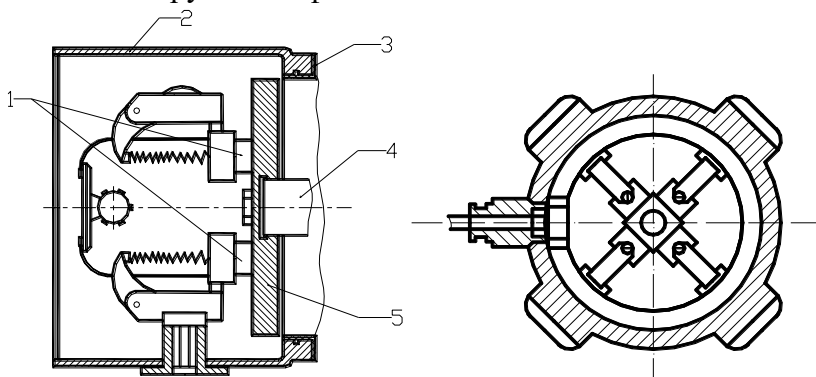


Рис. 22. Токоподвод к шпинделю шлифовального станка (аксиальное исполнение): 1 - корпус; 2 - щетки; 3 - щеткодержатели; 4 - шпиндель; 5 - токосъемный торец

При больших значениях технологического тока и малых частотах вращения электрода применение щеточного контакта с низким удельным давлением нецелесообразно по следующим причинам [7]:

а) значительно увеличиваются габариты токоподводящего устройства, ухудшаются эксплуатационные характеристики узла;

б) увеличивается общая величина потерь;

в) ухудшаются условия охлаждения щеточного узла.

В этом случае целесообразно увеличение удельного давления до 0,6 МПа, плотности тока 1 ... 1,5 МА/м<sup>2</sup> с охлаждением токоподвода водой.

На рис. 23 представлен токоподвод к анодноабразивному станку для очистки литья.

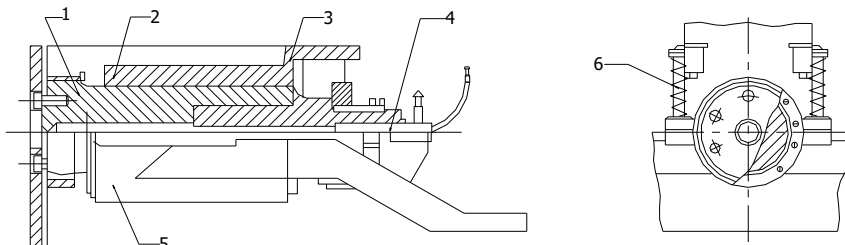


Рис. 23. Токоподвод к анодноабразивному станку для снятия литников

К валу, изготовленному из хромистой бронзы, поджимается пружинами пара медных полуколец. Для смазки контактных поверхностей используется состав, состоящий из чистого графита "П" и 25 ... 30 % касторового масла. Смазка осуществляется один раз в смену. Шероховатость контактных поверхностей  $R_a = 1,25$  мкм. Поверхности вала и полуколец выполнены по посадке E9/e8. Вал принудительно охлаждает вода. Токоподвод используется для передачи тока силой до 6000 А.

## РАБОТА № 5. РАСЧЕТ ТОКОПОДВОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ (ЭХО)

6.5.1. Цель работы: освоить расчет и проектирование токоподводов для ЭХО.

6.5.2. Оборудование, приборы, инструменты:

- станок для ЭХО с неподвижными электродами;
- амперметр;
- вольтметр;
- мерительная линейка с ценой деления 0,5 мм;
- ШЦ 0,1;
- эталоны шероховатости;
- средства вычислительной техники.

6.5.3. Методика расчета плоского цельного токоподвода

- выбрать напряжение  $U$  на электродах. Зависит от материала детали, вида технологической операции (см. приложение 4);

- выбрать потери напряжения  $\Delta U$ ;
- выбрать состав рабочей среды;
- выбрать удельную проводимость  $\chi$ ;
- выбрать межэлектродный зазор,  $S$ ;
- рассчитать плотность тока  $j$ , А/мм<sup>2</sup>

$$j = \frac{\chi(U - \Delta U)}{S} \quad (37)$$

- рассчитать величину  $I$  подводимого тока, А для обрабатываемой детали с площадью  $F$

$$I = jF \quad (38)$$

- рассчитать площадь контактной поверхности токоподвода  $F_k$  по предельной плотности тока  $j_{пр}$  (приложение 5);

$$F_k = \frac{I}{j_{пр}} \quad (39)$$



- построить геометрию плоского токоподвода для обработки детали с указанной площадью с соотношением сторон 1:2.

$$F_k = \frac{I}{j_{\text{пр}}} \quad (40)$$

- построить геометрию плоского токоподвода для обработки детали с указанной площадью с соотношением сторон 1:2.

#### 6.6. Порядок выполнения работы

А – анализируется индивидуальное задание на выполнение работы – 0,5 часа;

- изучается материал по механизму обработки – 2 часа;

- изучается материал по проектированию токоподводов – 1,5 часа;

- выполняется расчет токоподвода – 2 часа.

Б – изготавливается и оценивается шероховатость контактных поверхностей, после чего один из токоподводов устанавливается на станке – 4 часа;

- обрабатывается деталь с токоподводом – 1 час.

В – осмотр токоподвода на предмет прижогов, выполнение чертежа токоподвода, заполнение отчета – 1 час.

## 6.7. Задание на выполнение работы

Шифр задания	Токоподвод		Обрабатываемая поверхность детали, мм <sup>2</sup>	Материал	Площадь контактной поверхности, мм <sup>2</sup>	Источник информации
	Материал	Принудительное охлаждение				
1	Медь	имеется	100	Сталь		Приложение 4,5
2	Латунь	имеется	80	Титан. сп.		
3	Медно-графит	отсутствует	60	Сталь		
4	Медь	имеется	150	Алюм. сп.		
5	Латунь	имеется	100	Сталь		
6	Медно-графит	имеется	120	Сталь		
7	Медь	имеется	80	Латунь		
8	Латунь	отсутствует	60	Медь		
9	Медно-графит	имеется	180	Сталь		
10	Медь	имеется	200	Титан. сп.		
11	Латунь	имеется	150	Сталь		
12	Медно-графит	имеется	120	Сталь		
13	Медь	имеется	100	Титан. сп.		
14	Латунь	имеется	80	Сталь		
15	Медно-графит	имеется	180	Латунь		
16	Медь	имеется	200	Сталь		
17	Латунь	имеется	180	Сталь		
18	Медно-графит	имеется	140	Медь		
19	Медь	имеется	120	Латунь		
20	Латунь	имеется	100	Титан		
21	Медно-графит	отсутствует	60	Алюм. сп.		
22	Медь	имеется	90	Сталь		
23	Латунь	имеется	100	Сталь		
24	Медно-графит	имеется	110	Алюминий		
25	Медь	имеется	120	Титан		
26	Латунь	имеется	140	Сталь		
27	Медно-графит	имеется	150	Сталь		
28	Медь	имеется	80	Титан		
29	Латунь	отсутствует	60	Медь		
30	Медно-графит	имеется	100	Сталь		

### **Вопросы для самопроверки:**

1. На каких классических законах базируется ЭХО?
2. Какая рабочая среда используется при ЭХО?
3. Какие параметры рабочей среды необходимы для ЭХО?
4. Какое напряжение при ЭХО?
5. Что такое «потери напряжения»?
6. Какие функции у рабочей среды при ЭХО?
7. Какие материалы используют для токоподводов?
8. Для чего необходимо охлаждение токоподводов?
9. Что такое «предельная плотность тока»?
10. Как рассчитать размеры токоподвода?

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1 Боковые межэлектродные зазоры

Напряжение, В	Частота следования импульсов, кГц	При прошивке полостей, мм		При прошивке отверстий, мм	
		Сталь	Тв. сплав	Сталь	Тв. сплав
40	10	0,3	0,2	0,08	0,06
50	18	0,25	0,15	0,07	0,06
55	18	0,22	0,12	0,07	0,06
70	1	0,2	0,15	0,07	0,05
90	22	0,16	0,10	0,06	0,03
	44	0,13	0,14	0,05	0,03
120	68	0,12	0,07	0,04	0,025
150	80	0,065	0,05	0,025	0,02

### Приложение 2 Боковой межэлектродный зазор при электроэрозионной обработке электродом-проволокой

Напряжение, В	Скорость перемотки, мм/с	Материал проволоки	Межэлектродный зазор, мкм	
			Твердый сплав	Сталь
80	15	Латунь	13	11
	30	Вольфрам	12	10
100	15	Латунь	15	13
	30	Вольфрам	12	10
120	15	Латунь	19	70
	30	Вольфрам	16	14

**Приложение 3**

**Боковые межэлектродные зазоры при обработке  
непрофилированным электродом**

Материал детали	Материал электрода-проволоки	Диапазон толщин заготовки, мм	Диапазон скоростей перемотки, мм/с	Межэлектродный зазор, мм
Сталь	Вольфрам	менее 5 5-10 10-20	1-12	0,009
	Латунь	0,5-20 20-60 60-120	0,8-7	0,013
Твердый сплав	Вольфрам	0-10	1-15	0,012
	Латунь	0-10 10-20 30-50 50-150	1-6	0,015

**Приложение 4**

**К выбору предельной плотности тока, передаваемой от  
токоподвода к детали**

Материал токоподвода	Наличие принудительного охлаждения	Предельная плотность тока на контактных поверхностях, А/мм <sup>2</sup>
Медь	Имеется	3-4
	Отсутствует	2,5-3,0
Латунь	Имеется	0,8-1,5
	Отсутствует	0,5-1,0
Меднографит	Имеется	0,5-0,8
	Отсутствует	0,2-0,3

**Приложение 5**

**К выбору параметров токопровода**

Материал детали	Материал детали		Напряжение, В	Потери напряжения, В	Начальный межэлектродный зазор, мм
	Состав	Удельная электропроводность (Ом·м) <sup>-1</sup>			
Сталь	<i>NaCl</i>	0,015-0,02	10-12	1,7-2,5	0,1-0,2
Медь и медные сплавы	<i>NaCO<sub>3</sub></i>	0,02-0,022	12-15	3,5-4	0,05-0,1
Алюминий и алюминиевые сплавы	<i>NaNO<sub>3</sub></i>	0,01-0,012	8-10	3,2-3,7	0,05-0,1
Титановые сплавы	<i>NaCl + KBr</i>	0,012-0,015	15-18	2,5-3,0	0,15-0,2

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: В 2 т. Т. 1 / под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высш. шк., 1983. 247 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2000. Т. 2.
3. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
4. Смоленцев В.П. Технология электроэрозионной и электрохимической обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Г.П. Смоленцев. Воронеж: ВГТУ, 2005. 180 с.
5. Григорьев С.Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии: учеб. пособие / С.Н. Григорьев, Е.В. Смоленцев, М.А. Волосова. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 280 с.
6. Смоленцев В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом / В. П. Смоленцев. М.: Машиностроение, 1967. 160 с.
7. Выбор и расчет токоподводов для электрохимических станков / под ред. В.В. Любимова, Тула: Изд-во ТГУ, 2010. 161 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	1
Раздел 1. Теория электроискровой и комбинированной обработки.....	2
Работа № 1. Расчет рабочей части ЭИ для прошивки сквозного круглого отверстия.....	27
Работа № 2. Расчет ЭИ для прошивки глухих отверстий.....	31
Работа № 3. Выбор и расчет непрофилированного ЭИ для получения узких пазов.....	34
Работа № 4. Расчет рабочей части ЭИ для изготовления полостей комбинированной электроэрозионно-химической обработкой .....	37
Раздел 2. Теория электрохимической размерной обработки.....	41
Работа № 5. Расчет токоподвода для электрохимической размерной обработки (ЭХО).....	62
Приложения .....	66
Библиографический список.....	69



## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторно-практических работ по дисциплине «Теория электрофизических и электрохимических методов обработки» для студентов направления 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль «Технология машиностроения»

Составители:

Смоленцев Владислав Павлович  
Кириллов Олег Николаевич  
Смоленцев Евгений Владиславович  
Юхневич Сергей Степанович

В авторской редакции

Компьютерный набор В.В. Чернышовой

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.  
Усл. печ. л. 4,4. Уч-изд. л. 4,2. Тираж 50 экз.  
Зак. № \_\_\_\_.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Подписано в печать \_\_.\_\_.2016.