

**Министерство Высшего и Среднего Специального образования
Республики Узбекистан**

**Ташкентский Государственный Технический Университет
имени
Абу Райхана Беруни**

На правах рукописи

Талгат Исаков

«Разработка конструкции электроэрозионной приставки для прошивки»

Специальность: 5A540201-“Маркшейдерское дело ”

Диссертация

на соискание академической степени магистра по специальности
«Маркшейдерское дело»

Научный руководитель

к.т.н., доцент **Рахимов В**

ТАШКЕНТ 2005

ВВЕДЕНИЕ

В связи с этим необходимо было провести целый ряд теоретических и экспериментальных исследований особенностей процесса электроэрозионного формообразования составным катодом. А это в свою очередь позволило бы оптимизировать процесс размерной обработки поверхности твердых тел, разработать автоматизированную технологию процесса прошивки отверстий и электроэрозионную установку, которая отличалась бы простотой конструкции и эксплуатационных характеристик, малыми габаритными размерами и большими технологическими возможностями. В настоящее время решение вышеуказанной задачи тесно связано с Указами Президента **И. А. Каримова** и Постановлениями правительства Республики Узбекистан, в которых не раз подчеркивалось значение всестороннего развития науки и техники, разработок прогрессивных конкурентоспособных и импортозамещающих технологий для укрепления технической и экономической независимости нашего государства.

Актуальность работы.

Широкое применение в современной машиностроительной, приборостроительной и инструментальной промышленности всевозможных металлов и сплавов, обладающих различными механическими свойствами, вызывают определенные трудности при их обработке. Нередко обработка этих материалов механическим способом связана с большой затратой времени, а некоторые из них вообще не поддаются обработке резанием. В связи с этим методы обработки, основанные на различных физико-химических процессах, вызывают большой интерес. Это связано с тем, что при электроэрозионной, электрохимической, электронно-лучевой и лазерной способах обработки механическое воздействие со стороны обрабатываемой детали на инструмент практически отсутствует. При этих процессах на обрабатываемую деталь воздействуют дозированные в зависимости от технологических требований порции энергии, вводимые непосредственно в

зону обработки. Среди них особое место в металлообработке занимает электроэрозионная размерная обработка.

Одной из наиболее сложных задач в металлообработке является изготовление глубоких отверстий. Особенно эта задача сложна при изготовлении отверстий малого диаметра, а точнее, с большим отношением глубины отверстия к его диаметру. При электроэрозионной прошивке отверстий стержневым электродом по мере увеличения глубины затрудняется эвакуация продуктов эрозии из зоны обработки и увеличивается утечка энергии через боковую поверхность электрода. Традиционно эту проблему решали таким образом: изготавливали электрод с внутренним отверстием (или серией отверстий) и покрывали его диэлектрическим слоем. Через внутреннее отверстие под большим давлением прокачивали рабочую жидкость и добивались эффективной очистки межэлектродного промежутка от продуктов эрозии. Однако наряду с возможностями трубчатых электродов появляется проблема изготовления отверстий диаметром порядка 0.12 мм в тонком электроде. В настоящее время эта технология отрабатывается и осваивается отечественной промышленностью. Для эффективной очистки зоны обработки от продуктов эрозии необходимо прокачивать рабочую жидкость через тонкое отверстие под большим давлением (50-80 кГс/см²), что приводит к существенному усложнению средств технической безопасности. А также, так как трубчатые электроды изготавливаются в основном из цветных металлов и сплавов, то при маленьких диаметрах их прочностные свойства не отвечают требованиям изготовления прецизионных отверстий. В связи с этим в диссертации рассматривается составной электрод-инструмент, который позволяет решать проблему изготовления глубоких отверстий точнее, проще и дешевле по сравнению с трубчатыми электродами.

Цель диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка конструкции "электроэрозионной **приставки**" для прошивки отверстий составным

электродом-инструментом, в различных деталях, в том числе крупногабаритных и в труднодоступных местах. Т.е. создание малогабаритных переносных электроэрозионных станков или в виде приставок к существующим металлорежущим станкам, способных работать даже в полевых условиях. Отработка режимов и условий технологического процесса прошивки отверстий различных диаметров и исследование структурных изменений поверхности и физико-химических свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала.

Научное и практическое значение работы.

Отработаны режимы и технология электроэрозионной прошивки глубоких отверстий различных диаметров в деталях практически любого габарита и формы. Рассматриваемый составной электрод-инструмент расширяет границы возможностей электроэрозионной обработки, позволяет создавать различные приборы и устройства с качественно новыми возможностями. Это позволило разработать и создать малогабаритную электроэрозионную приставку.

Объект исследования:

1. Возможность прошивки глубоких отверстий составным электродом-инструментом при наличии эксцентриситета электрода относительно оси прошиваемого отверстия.
2. Модель увеличения диаметра отверстия до величины, необходимой для беспрепятственного продвижения диэлектрической оболочки вглубь отверстия.
3. Раскрытие механизма превращения диэлектрической оболочки в подвижной люнет и самоцентрировки составного электрода-инструмента в отверстии при прошивке глубоких отверстий.

4. Модель кинематики рабочей части составного ЭИ в условиях прошивки глубоких отверстий под действием механических нагрузок, возникаемых при прохождении электрического разряда.

5. Результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения шероховатости поверхности, образования дефектного слоя в условиях прошивки глубоких отверстий составным электродом-инструментом и явления переноса материала катода в тело анода при наличии вращения электрода.

6. Модель зависимости точности отверстия от величины рабочей части электрода и параметров электрического разряда, а также разработанную технологию прошивки глубоких отверстий различных диаметров составным электродом-инструментом.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Введение	3
1 . Обзор и анализ существующих методов электроэрозионной обработки отверстий	8
1Л. Изготовление отверстий электроэрозионным способом	8
1 .2. Динамика электроэрозионных процессов	20
1 .3. Структурные изменения в поверхностном слое детали в процессе электроэрозионной обработки	26
1.3 Л. Шероховатость поверхности	26
1 .3.2. Дефектный слой	28
1.3.3. Микротвердость поверхностного слоя	30
1 .4. Цель и задачи исследований	32
2. Методика глубинной электроэрозионной прошивки отверстий и оборудование	34
2.1. Составной электрод-инструмент для прошивки глубоких отверстий	34
2.2. Объекты исследования	36
2.3. Малогабаритная электроэрозионная приставка	38
2.4. Генератор импульсов и блок управления приводом составного ЭЙ	43
3. Технология прошивки отверстий составным ЭЙ.	46
3.1. Механизм прошивки отверстий составным ЭЙ	46
3.1.1. Изменение микрорельефа поверхности анода под действием единичного электрического разряда	59
3.2. Модель поведения рабочей части составного ЭЙ в отверстии	65
4. Исследование воздействия электрического разряда на структуру поверхностного слоя обрабатываемого материала при прошивке глубоких отверстий	70
4.1. Исследование шероховатости поверхности	71
4.2. Исследование дефектного слоя	78
Выводы и заключение	84

Литература	86
Перечень условных обозначений	94

1. Обзор и анализ существующих методов электроэрозионной обработки отверстий

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) металлов и других токопроводящих материалов основана на эффекте расплавления и испарения микропорций материала под воздействием импульсов электрической энергии в канале разряда, возникающим между поверхностью обрабатываемой детали и электродом-инструментом (ЭИ) в жидкой диэлектрической среде/1-7/.

Впервые этот способ был предложен советскими учеными В.Р.Лазаренко и Н.И.Лазаренко /8/ и ими проведены научно-исследовательские работы по изучению Физических процессов электрической эрозии. В дальнейшем развитию теории и практики ЭЭО посвятили свои работы Б.Н.Золотых, А.С.Зингерман, А.Л.Лившиц, В.А.Красгок, Н.К.Фотеев, К.К.Намитоков, Б.И.Ставицкий, Е.М.Левинсон, М.К.Мицкевич и другие.

1.1 Изготовление отверстий электроэрозионным способом.

Решение проблемы изготовления прецизионных отверстий малого диаметра является весьма сложным для всех известных способов обработки. В зависимости от свойств материала деталей, формы и размеров отверстий применяются различные методы их изготовления.

По мере уменьшения диаметра отверстия возникает проблема, связанная с жесткостью инструмента /9/. Так как при ЭЭО инструмент-электрод практически не подвергается механическому воздействию со стороны обрабатываемой детали. Следовательно, применение методов, размерной ЭЭО позволяет успешно изготавливать отверстия малого диаметра практически во всех электропроводящих материалах (сверхтвердых, вязких, хрупких и т.д.) /10,11/.

Традиционно при прошивке отверстий электроэрозионным способом применялись стержневые ЭИ. При изготовлении отверстий малого диаметра

обработка ведется на режимах очень малой мощности, динамические явления в МЭП столь незначительны, что удаление продуктов эрозии из зоны обработки практически не происходит. Помехой для удаления продуктов эрозии является также очень малая величина бокового зазора между стержнем и стенками отверстия при большом отношении глубины отверстия к его диаметру. Разделяющий электродов МЭП весьма чувствителен к изменениям (различного рода воздействиям на электродов, поступлению продуктов эрозии). Для непрерывной смены жидкости и удаления продуктов эрозии из зоны обработки стержню - электроду сообщается вибрация в направлении подачи. Вибрация обеспечивает надежную смену жидкости, так как часть стержня, находящаяся в отверстии, является как бы поршнем насоса, создающий поток жидкости. Помимо этого вибрация необходима с энергетической точки зрения. Несмотря на весьма незначительную мощность режимов обработки, которые применяются при прошивке отверстий диаметром менее 9.5 мм, они все же достаточно велики для тех площадей обработки, с которых происходит съем металла. При отсутствии вибрации будут непрерывно происходить короткие замыкания электродов.

Глубина отверстий, прошиваемых стержневым электродом, связана с эффективностью эвакуации продуктов эрозии из МЭП. По мере углубления электрода в деталь узко ухудшаются условия циркуляции рабочей жидкости. Увеличивающееся загрязнение жидкой среды продуктами эрозии ведет к, увеличению непроизводительных потерь энергии, вследствие прохождения электрических разрядов через продукты эрозии падает величина в эрозии в единичном импульсе, а, следовательно, в соответствии с принципом аддитивности - и ее интегральная величина.

Отверстия диаметром менее 10 мм могут быть получены на многих копировально-прошивочных станках универсального назначения, выпускаемых серийно. Наименьший диаметр отверстия (0.025 мм) при ЭЭО был

получен на уникальном станке, созданном В.А.Петровым в 1963 г.(ленинградский карбюраторный завод). Станок (модель 200) выпускается малыми сериями для предприятий радиоэлектронной и приборостроительной промышленности и предназначен для прошивания отверстий диаметром от 0.025 мм до 0.1 мм. Наибольшая глубина прошиваемого отверстия - 10 диаметров /9,45/.

В работах /12-14/ рассмотрены способы получения отверстий вплоть до 0.2 мм в диаметре с применением различных генераторов импульсов. Прошивка отверстий осуществлялась в воде, керосине также исследовано влияние орбитального движения ЭЙ на производительность процесса электроэрозионной прошивки. Наибольшая глубина изготовленных отверстий достигала 15-20 диаметров

Таким образом, при применении стержневых электродов, с ростом глубины отверстия возрастают трудности удаления продуктов эрозии и подачи в МЭП свежей рабочей жидкости, что ведет к снижению производительности. Это относится к изготовлению отверстий на любых режимах и особенно на мягких когда удаление продуктов эрозии и з МЭП особенно затруднительно /15/. Прокачка жидкого диэлектрика через МЭП, одновременно способствуя удалению продуктов эрозии из зоны разряда, повышает производительность обработки. Для осуществления прокачки необходимо было изменить конструкцию ЭЙ. Таким образом, появились трубчатые электроды.

Применение трубчатых электродов позволило решить проблему эффективной эвакуации продуктов эрозии из МЭП. Для стабильного прохождения последовательности электрических импульсов концентрация продуктов эрозии не должна превышать 2-3 % /15,16/. Поддержание концентрации продуктов эрозии на стабильном уровне позволяет существенно увеличить глубину прошиваемого отверстия. Определение . максимальной

глубины прошиваемого отверстия для трубчатых ЭИ является принципиально важной задачей, которая была решена. Б.Н.Золотыхом /16/. Расчет давления, расхода и скорости жидкости вычислены из следующих соображений:

- расход жидкости должен быть таким, чтобы обеспечить полную смену жидкости в промежутке между импульсами;

расход жидкости должен быть таким, чтобы обеспечить стабильное поддержание некоторой заданной средней концентрации загрязнений. Принимая упрощение, что зазор между стенками трубчатого ЭИ и отверстием равномерен; течение вязкой жидкости для рассматриваемого случая есть течение по трубе кольцевого сечения решение уравнения Навью-Стокса для скорости рабочей жидкости принимает вид:

$$V = \frac{\Delta P}{4\mu l} \left(b^2 + r^2 \frac{b^2 - a^2}{\ln \frac{b}{a}} \ln \frac{r}{b} \right) \quad (1.1)$$

где ΔP - разность давлений в начале и конце рассматриваемого участка, l - длина участка, r - текущий радиус-вектор, μ - динамическая вязкость жидкости, a и b - радиусы электрода и отверстия.

В рассматриваемом случае $b - a = \Delta$ и Δ мало по сравнению с a и b .

Расход жидкости для маленьких величин зазоров имеет вид:

$$Q = \frac{\pi \Delta P \Delta^3 (a + b)}{8\mu l} \quad (1.2)$$

При необходимости сменить весь объем жидкости, заполняющее межэлектродное пространство, за время, равное паузе между импульсами, давление жидкости P определяется:

$$P = \frac{16V\mu l}{(n-1)\tau_n \pi (a+b)\Delta l^3} \quad (1.3)$$

где V - расход жидкости за одну секунду, n - скважность импульсов, τ_n - длительность импульса.

В процессе изготовления отверстия происходит естественный обман

жидкой среды, поскольку в зоне разряда возникает импульс давления, под действием которого часть жидкости удаляется из МЭП и при схлопывании газового пузыря заменяется новой. Величина импульса давления зависит от параметров импульса тока и частоты их следования.

На основании решения гидродинамической задачи о расширении газового пузыря и задачи о течении жидкости в узкой кольцевой щели для предельно достижимой глубины отверстия / получено выражение:

$$l = \frac{\pi \rho_m G(a+b) \Delta l^3}{800 f \gamma, \mu} \Delta P_{cp} \quad (1.4)$$

где ρ_m -плотность жидкости, y_1 -концентрация загрязнений, f -частота следования импульсов, C -величина эрозии на один импульс, ΔP_{cp} -среднее давление.

Легко заметить, что с уменьшением зазора A / резко падает расход жидкости и, следовательно, резко растет степень загрязнения, а с нею падает и производительность. Так как величина зазора определяется также характеристиками импульса, очевидно, что в этом случае будет падать и предельно достижимая глубина отверстия.

В последние годы в промышленности нередко требуется изготовление отверстий диаметром менее 2 мм на большую глубину (не менее 20-40 диаметров). При решении этой задачи необходимо применять трубчатые электроды, с уменьшением диаметра трубчатого электрода необходимо уменьшить энергию импульсов, прикладываемых на электроды, что в свою очередь приведет к уменьшению. Следовательно, для поддержания степени загрязненности МЭП продуктами эрозии необходимо увеличить давление жидкости. При прошивке отверстий диаметром менее 1.0 мм давление жидкости может достигать очень больших величин (50-100 кгс/см²). С другой стороны, уменьшение диаметра прошиваемого отверстия осуществляется уменьшением диаметра трубчатого электрода. Диаметр внутреннего

отверстия трубчатого электрода должен быть не менее 0.12 мм для того, чтобы осуществлять эффективную прокачку рабочей жидкости. Следовательно, уменьшение диаметра трубчатого электрода при постоянном внутреннем диаметре приводит к тому, что жесткость ЭЙ не в полной мере отвечает технологическим требованиям прошивки прецизионных отверстий. Необходимость сообщения электроду продольной или поперечной вибрации для улучшения эвакуации продуктов эрозии из МЭП также ужесточает требования, предъявляемые к жесткости ЭЙ. При больших глубинах может существенно сказаться боковая эрозия, которая отрицательно сказывается на точности изготавливаемого отверстия. На рис. 1.1 приведен график зависимости предельно достижимой глубины для различных по конструкции электродов-инструментов /17/.

В настоящее время применяют несколько различных сочетаний движения обрабатывающего электрода /18/, которые приведены на рис. 1.2. ЭЙ как правило изготавливаются из медных и латунных трубок. Для получения строгой прямолинейности и повышения жесткости трубок после протягивания через волок их прокатывают в течении нескольких минут между двумя шлифованными массивными чугунными или стальными плитами.

Одной из наиболее важных характеристик процесса электроэрозионной прошивки глубоких отверстий является максимальная глубина прошиваемого отверстия, а точнее, величина отношения глубины к диаметру, которая в зависимости от конструкции ЭЙ и технологии прошивки существенно меняется /17/. Глубина прошиваемого отверстия может быть значительно увеличена, если вращать трубчатый электрод, обрабатываемую заготовку или и то и другое с одновременной прокачкой рабочей жидкости через ЭЙ (рис. 1.1).

В последние годы уровень мирового стандарта в области создания

электроэрозионных установок для прошивки глубоких отверстий определяется японскими фирмами "Тарах ЛЧС" и "ПС". Предлагаемые ими серийные станки 8О-1, 8В-1М, 8 ОХ 1 ОМС позволяют решить проблему прошивки глубоких отверстий с помощью трубчатого ЭЙ. В качестве примера рассмотрим способ и устройство для прошивки отверстий малого диаметра вплоть до 0.3 мм /19/. Устройство оснащено трубчатыми медными электродами, наименьшим наружным диаметром в 0.3 мм и внутренним диаметром в 0.12 мм при длине 150 мм. Тем не менее сведения о прошивке сверхглубоких отверстий малого диаметра отсутствуют. Скорость прошивки зависит от давления прокачиваемой жидкости (рис. 1.3). При давлениях выше 10 кгс/см начинает существенно расти и достигает своего максимума при 50-60 атм. затем постепенно снижается/

В целях исключения боковой эрозии ЭЙ покрывают оксидной пленкой. Для повышения устойчивости процесса прошивки ЭЙ сообщают продольную или поперечную вибрацию в пределах 30 кГц -10 МГц. В качестве рабочей жидкости была использована дистиллированная вода. При прошивке отверстия трубчатым электродом (диаметр 0.3 мм) на глубину 2 мм в нержавеющей стали скорость прошивки достигала 28 мм/мин.

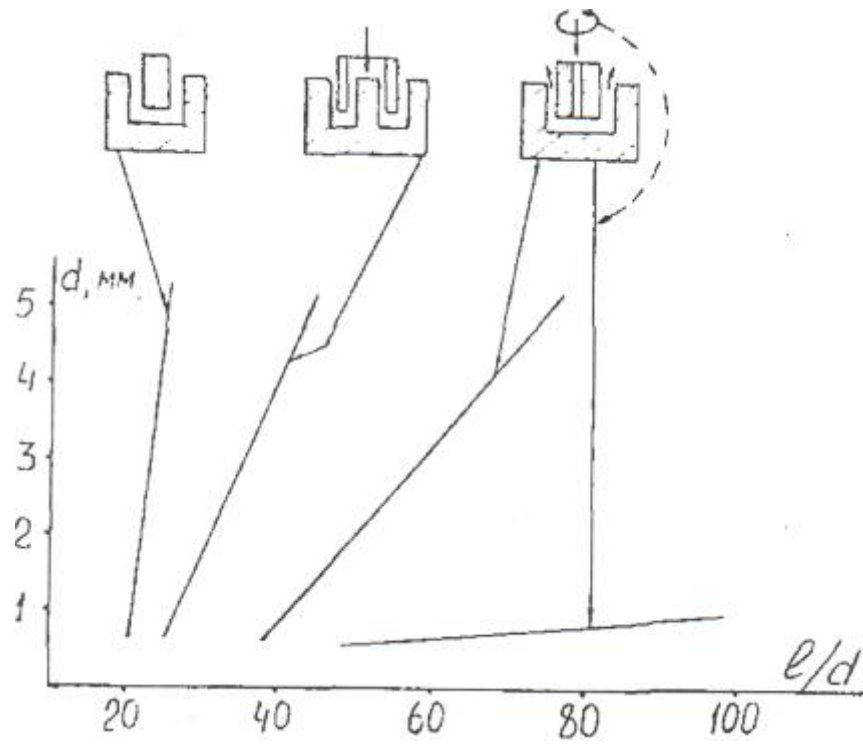


Рис. 1.1. Зависимость глубины / электроэрозионной прошивки отверстий от диаметра d .

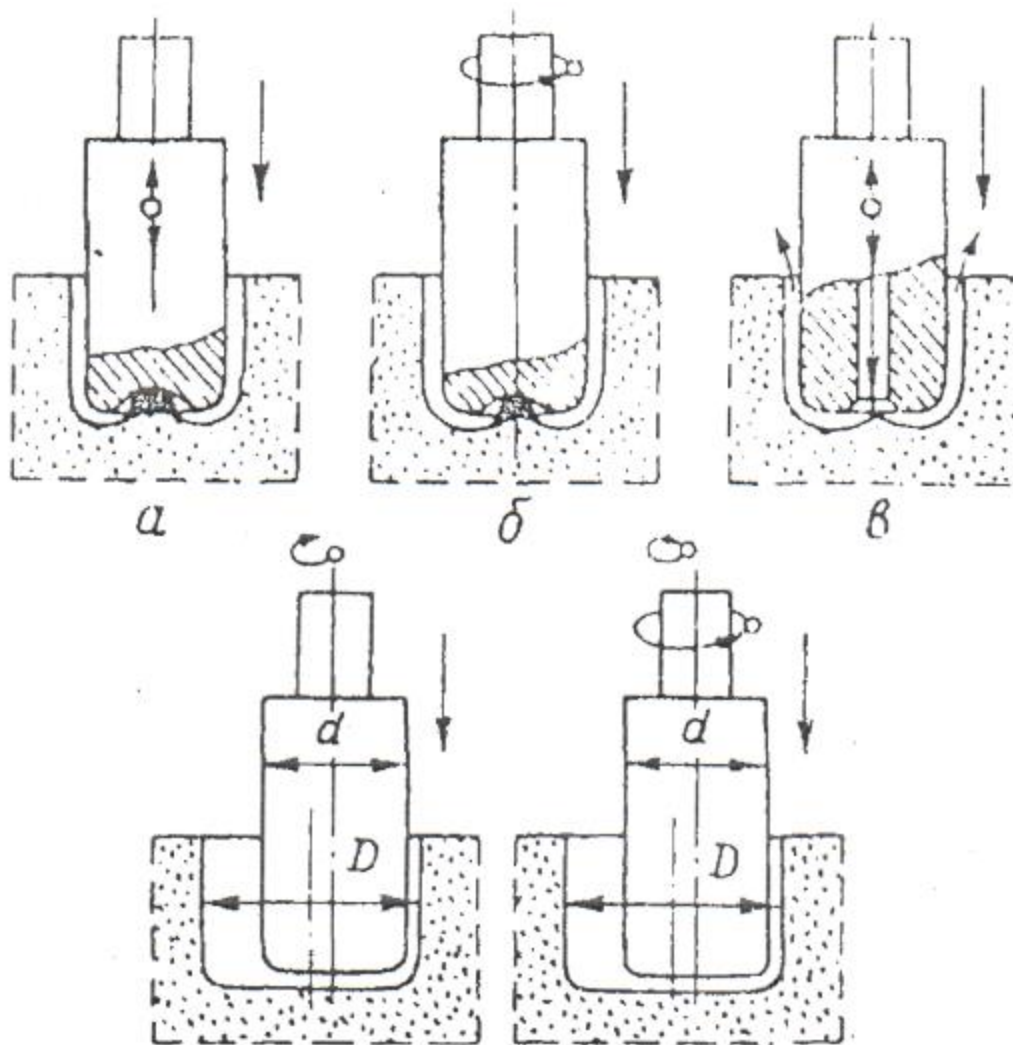


Рис.1.2. Схемы обработки отверстий /55/. а)

- а) прямое копирование ЭИ на детали,
- б) вращение ЭИ относительно своей оси,
- в) прямое копирование ЭИ с прокачкой жидкости,
- г) перемещение электрода относительно оси отверстия без его вращения,
- д) перемещение электрода относительно оси отверстия с вращением.

В настоящее время отечественная промышленность производит малогабаритные станки 04ЭП-10М, ЭП.Р-6.5-002 ССЭП-85-001 для прошивки отверстий, вместе с тем пока не имеются серийно выпускаемые станки для прошивки глубоких отверстий малого диаметра, способные конкурировать на мировом рынке электроэрозионных станков. Среди работ, проводимых над созданием отечественных высокопроизводительных прошивочных станков заслуживает внимание опытный образец, описанный в работе /20/. Диаметр прошиваемых отверстий 0.35-3.0 мм. Давление для прокачки рабочей жидкости (деионизованная, минерализованная вода) достигает до 72 кгс/см². При этом скорость прошивки отверстия диаметром 1.0 мм в закаленной стали достигает 30 мм/мин. Ведется работа над созданием серийного промышленного образца на базе рассмотренного станка в НПО ЭНИМС.

Как видно из обзора теоретических и экспериментальных исследований процесс электрической эрозии материалов под действием импульсных разрядов довольно подробно изучен. В настоящее время ЭЭО, как один из прогрессивных способов, широко применяется в металлообработке. Вместе с тем, научно-техническая мысль в основном направлена на автоматизацию эрозионных станков, изучению последствий воздействия электрического разряда на поверхность обрабатываемого материала.

Таким образом, для решения проблемы электроэрозионной прошивки глубоких отверстий необходимо и достаточно находить пути эффективной эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки. Применение высокого давления для прокачки рабочей жидкости через трубчатый электрод приводит к усложнению конструкции электроэрозионных прошивочных станков и мер технической безопасности.

В связи с этим исходя из формулы (1.4) можно сделать вывод, что

наиболее простым и эффективным путем увеличения предельно достигаемой глубины отверстия является увеличение зазора между поверхностями электрода и детали. В этом аспекте заслуживает внимание предлагаемый в работе /21/ составной ЭЙ, представляющий из себя металлический стержень, заключенный в диэлектрическую оболочку с зазором. Этот зазор между стержнем и внутренней поверхностью стенки оболочки служит для подачи рабочей жидкости непосредственно в зону обработки. Предлагаемый способ позволяет применять в качестве электрода прутки из различных металлов (медь, латунь, вольфрам и т.д.). Следовательно, появляется возможность изготовления ЭЙ из различных эрозионно-устойчивых металлов сплавов и композитов.

Как практика показывает, применение составного ЭЙ позволяет увеличить глубину прошиваемых отверстий до 100-200 и более диаметров в зависимости от материала детали и диаметра прошиваемого отверстия при давлениях, на порядок меньших чем применяемых на японских станках.

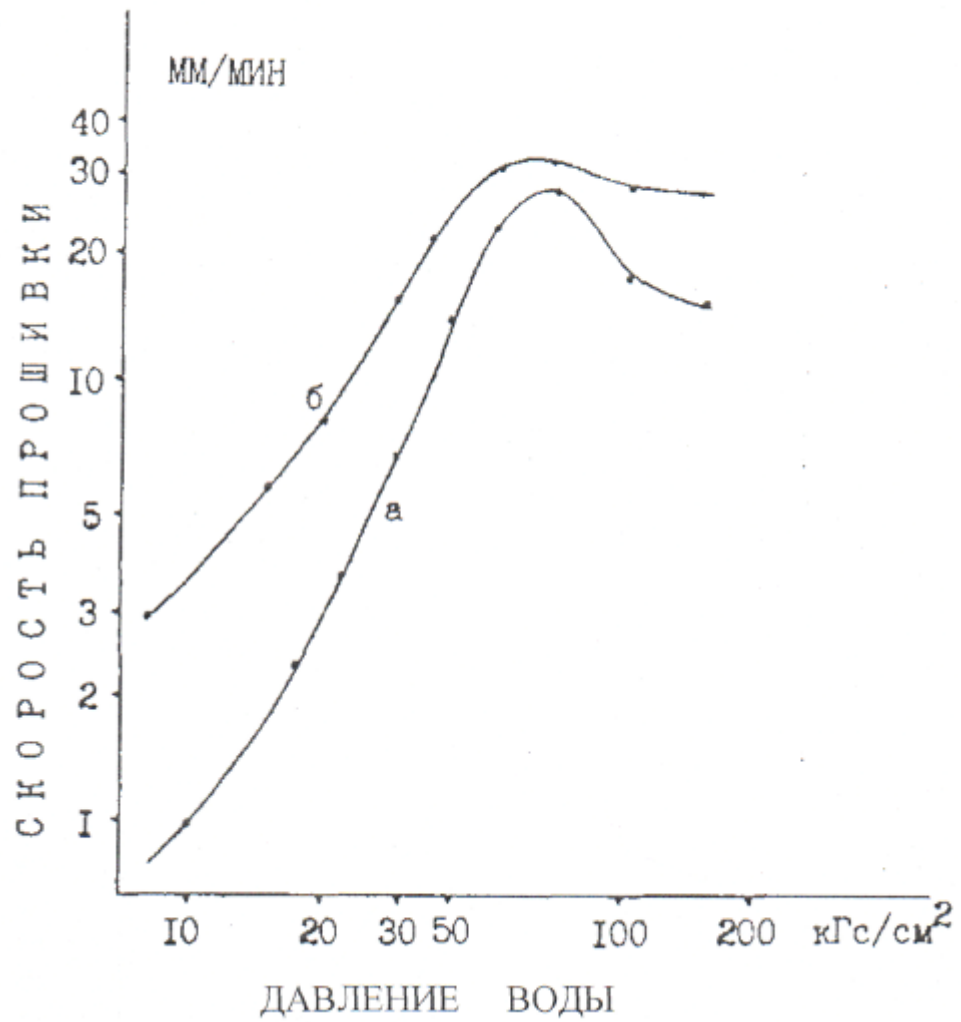


Рис. 1.3. Прошивка отверстий трубчатым медным электродом в стали толщиной в 2 мм /56/. а) без вибрации, б) частота вибрации ЭЙ - 28 кГц.

1.2. Динамика электроэрозионных процессов

Процесс электрической эрозии материалов основана на пробое межэлектродного зазора, расплавлении и испарении материала электродов. При низких напряжениях и соответственно очень малых межэлектродных промежутках (МЭП) механизм пробоя можно объяснить действием автоэлектронных токов, если для этого напряженности поля в зазоре будут достаточными [22]. Экспериментальные наблюдения показывают, что при напряжении 100 В, только при очень малых МЭП (начиная примерно с 10⁰ см.) автоэлектронный ток может оказывать определенное влияние. Однако при этом электростатические силы, действующие на поверхности электродов, становятся столь значительными, что вызываемые ими напряжения могут быть соизмеримы с пределом прочности и пределом текучести материала) на поверхности электродов. Поэтому при очень малых зазорах следует ожидать совместного действия двух факторов: авто- электронной эмиссии и пондеромоторных сил электростатического поля, причем между ними может существовать своего рода "обратная положительная связь". Вопрос, как эти факторы совместно действуют и как они влияют на механизм начала разряда, приводит к рассмотрению системы двух функциональных зависимостей:

$$\begin{cases} J = \varphi(t); \\ x = f(t); \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} t = \varphi_1(J) \\ t = f_1(x) \end{cases} \quad (15)$$

где x - изменяющийся во времени межэлектродный зазор (от $x=\delta$ до $x=0$); J - изменяющаяся во времени плотность автоэлектронного тока.

Первая зависимость $J = \varphi(t)$ может быть получена из уравнения Нордгейма Фаулера заменой в нем $E = \text{const}$ на $E = E(I)$, которая в свою очередь может быть получена при известной зависимости E от x и x от I .

Нахождение второй зависимости $x = f(I)$ усложняется тем, что помимо временной зависимости пондеромоторной силы поля нужно учитывать геометрические размеры, форму, расположение части электрода, приводимой в

движение действием поля, а также силу сопротивления ее перемещению.

Рассмотрим случай, когда частица под действием поля движется от одного электрода к другому, причем за время движения она сохраняет гальваническую связь с электродом, а ее перемещению противодействует сила сопротивления, пропорциональная перемещению. Тогда для этого случая можно записать уравнение:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{k_1 U^2}{(\delta - x^2)} + k_2 x = 0 \quad (1.6)$$

где k_1 и k_2 - коэффициенты, зависящие от геометрических размеров частицы и физических констант материала; U - напряжение между электродами; δ - исходный межэлектродный зазор.

Для случая, когда можно пренебречь силой сопротивления движению частицы, решение (1.5) принимает простой вид:

$$t = \sqrt{\frac{\delta}{2k_1 U^2}} (\sqrt{x(\delta - x)} - \delta \arctg \sqrt{\frac{\delta + x}{x}} + \frac{\pi \delta}{2}) \quad (1.7)$$

Задавшись конкретными значениями коэффициентов уравнения (1.5) можно оценить время, необходимое для перекрытия межэлектродного зазора за счет пондеромоторных сил электрического поля. Так, при относительно малых напряжениях на электродах (около нескольких сотен вольт) и соответственно малых зазорах, при которых плотность токов автоэлектронной эмиссии может достигать заметных значений, время согласно (1.7), необходимое для "контактного" перекрытия, составляет 10..-10.. с. При учете наличия противодействия пондеромоторным силам это время увеличивается не более чем на два порядка.

Таким образом, одним из возможных механизмов начала разряда в исследованных интервалах напряжений и межэлектродных зазоров может быть следующий. При межэлектродных зазорах 10^{-9} - 10^{-8} см и менее инициирование низковольтного разряда может обуславливаться как

контактным механизмом с последующим взрывообразным расплавлением и испарением контактных участков на поверхности электродов, так и образованием в межэлектродном зазоре под непосредственным действием автоэлектронного тока большой плотности высокотемпературной парообразной среды из материала электродов.

Одним из ключевых вопросов ЭЭО материалов является объяснение механизма выброса расплавленного металла из лунки в межэлектродный промежуток (МЭП). Экспериментальные исследования подтверждают тепловую гипотезу прохождения процессов при воздействии электрического разряда на электроды в жидкой диэлектрической среде /5, 22-26/.

Согласно /23/ электрическая эрозия происходит по следующей схеме: высокоскоростной удар жидкой и газовой струи частиц о металлическую поверхность твердого тела приводит к плавлению тела за счет тепла торможения и последующий выброс ударной волной расплавленного металла. Это является одной из первых гипотез объяснения механизма электрической эрозии и принадлежит она Б.Р.Лазаренко и его сотрудникам.

Еще один механизм электрической эрозии приводится в работе /24/, согласно которому выброс металла из лунки происходит только во время разряда. При этом частицы металла вылетают непрерывно небольшими порциями или прерывисто крупными порциями. Тепловое действие электрического разряда сопровождается возбуждением механической ударной волны в жидкости, которая ответственна за эвакуацию жидкого металла из лунки.

Процесс прохождения электрического разряда и эрозия электродов подробно изучены Б.Н.Золотыхом с помощью высокоскоростного Фотографирования /51/. Как показали исследования, по мере возрастания тока разряда растет скорость испарения металла с поверхности, что приводит к

росту давления в газовом пузыре и перегреву расплавленного металла в лунке до температур, превышающих температуру кипения при нормальных условиях. Увеличение давления внутри газовой полости приводит к ее интенсивному расширению. После прохождения тока через максимальное значение испарение с поверхности электродов уменьшается и начинает сильно проявлять себя конденсация паров металла, особенно по окончании действия импульсного разряда. Этот процесс и продолжающееся расширение газовой полости приводят к быстрому падению давления внутри полости. При этом перегретый металл закипает, и имеет место выброс паров и капель металла в виде конической светящейся струи. Эта модель наиболее полно и правильно описывает механизм электрической эрозии металлов.

Одной из причин выброса металла из лунки может быть возникновение в глубине металла высокой температуры, которая обусловлена проникновением плазмы в металл. Такое распределение температуры обуславливает высокое давление и явление взрыва /27/ Причины возникновения плазмы в объеме /28/:

1. Высокое давление приводит к нарушению электронной структуры атомов тела и потери ими части электронов. В результате образуется смесь электронов и атомных остатков, т.е. плазма.

2. Высокая температура, обуславливающая термическую ионизацию атомов материала мишени.

3. Проникновение быстрых электронов в тело материала.

Прекратившие свое поступательное движение электроны создают объемный заряд. Следовательно, взаимное отталкивание электронов создает избыточное внутреннее давление, возникают сильные электрические поля. Сгусток электронов окажет поляризующее действие на ионы или атомы решетки, что может вызвать потерю ими своих мест в узлах. Опять образуется плазма,

которая и вызовет микро взрыв. Расплавленный металл выбрасывается из лунки с образованием воронки.

В целях выяснения механизма удаления жидкого металла из лунки с учетом внешних факторов поставлен эксперимент, результаты которого приведены в таблице 1.1 /29/. Рассмотрены разряды в атмосферном воздухе, в воде с открытой поверхностью и в воде, заключенной в толстостенной стальной герметической камере.

Исходя из результатов эксперимента можно предположить, что для каждого металла в зависимости от величины коэффициента поверхностного натяжения существует критическое давление, при котором из лунки выбрасывается весь расплавленный металл.

При выборе материала, используемого в качестве ЭЙ, особое значение имеет его эрозионная стойкость. Устойчивость твердых тел к действию механических, термических, электрических и радиационных нагрузок тем выше, чем больше его внутренняя энергия /30/. Это • общее правило выполняется и в случае электроэрозионного действия на твердое тело.

В работах /31,32/ показана зависимость эрозионной стойкости от электронной конфигурации переходных металлов, согласно которой электроэрозионное разрушение материала будет увеличиваться с возрастанием нелокализованной доли валентных электронов, уменьшением статического веса атомов со стабильными электронными конфигурациями и понижением главного квантового числа. Вольфрам является одним из самых эрозионно-стойких среди переходных металлов, имеет самый большой статический вес атомов со стабильными s^1 - конфигурациями и его валентные электроны обладают наибольшим квантовым числом. Следовательно, вольфрам является наиболее подходящим для использования его в качестве ЭЙ. Вместе с тем изготовление сложно фасонного ЭЙ из вольфрама является трудоемкой операцией.

В качестве ЭЙ часто используется медь: уплотненная, или ее композиции, как медь-нитрид бора, медь-вольфрам и т.п.

Таблица 1.1. Влияние силы поверхностного натяжения на эрозию электродов

Материал Электрода	Суммарная эрозия электродов					
	ЛИ. Д77	ВОЗДУХ	вода открытая	Атк, вода в камере	Д/77. /Д»7,,	Д^/»%«,
<i>Ре</i>	0.3		0.9	2.3	3	2.55
<i>NI</i>	0.9		1.8	2.8	2	.1.55
<i>Сu</i>	1.3		2.7	3.8	2.08	1.4
<i>2n</i>	4.5		5.5	6.5	1.22	1.18
<i>8n</i>	8.4		15.2	14.0	1,81	0.92
<i>РЬ</i>	13.8		13.4	14.8	0.97	1.1

Примечание:

Режим разряда: 1], = 2000 В, С - 100.0 мкФ.

Давление в камере не менее 2000 Атм.

1.3. Структурные изменения в поверхностном слое детали в процессе электроэрозионной обработки

ЭЭО приводит к изменению физико-химических свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала, что связано с воздействием на поверхность локальных, кратковременно действующих тепловых источников /2,5,9,33-40/. Основными технологическими характеристиками состояния поверхностного слоя являются: шероховатость поверхности, микротвердость и изменение химического состава поверхностного слоя.

1.3.1. Шероховатость поверхности

Исследование воздействия единичного электрического разряда на поверхность заготовки позволяет представить качественную картину изменения характеристик микрогеометрии поверхности, обработанной электроэрозионным способом, т.к. при этом новая поверхность образуется в результате наложения единичных лунок, образующихся под воздействием единичных импульсов /41/. Например, при ЭЭО стали 3 с ростом энергии импульса от 0.2 до 1.0 Дж. при длительности импульса 130 мкс. диаметр лунки возрастает с 0.42 до 0.9 мм, в то время как глубина ее практически постоянна. С увеличением длительности импульса со 130 до 480 мкс при энергии 0.5 Дж диаметр единичной лунки практически остается неизменным, а глубина лунки возрастает с 0.04 до 0.05 мм.

Б.Р.Лазаренко и Н.И.Лазаренко была установлена зависимость величины электрической эрозии материалов от их теплофизических свойств *III*. Изучению этой зависимости посвящены работы Б.Н.Золотыха /3,5/. Тугоплавкие материалы более устойчивы к электрической эрозии под действием электрического разряда. В работах /42,43/ установлены зависимости между геометрическими параметрами образующихся лунок (диаметром и глубиной), величиной шероховатости обработанной поверхности, объемом выбрасываемого за один импульс материала и

энергией импульса (для малых энергий и длительностей).

Качество поверхности, обработанной электроэрозионным способом, во всех направлениях одинаково, т.е. не зависит от направления рассмотрения поверхности /44,45/.

При обработке чистых металлов установлено, что чем выше температура плавления и кипения металла, тем меньшее количество его удаляется единичным импульсом. Вследствие этого тугоплавкие металлы обрабатываются с меньшей производительностью, но их поверхность получается более чистой.

При прохождении искрового разряда между электродами материал с их поверхности может удаляться в жидкой, парообразной и твердой фазе /4/. С уменьшением длительности импульса увеличивается количество материала, удаляемого в парообразном состоянии. Например, при использовании электрических импульсов с неизменной величиной энергии и длительностью 10 и 1000 мкс доля испаренного металла составляет в первом случае 60-70 % от величины всего объема лунки, во втором - 5 %. Из-за малой длительности воздействия высококонцентрированной энергии на поверхность металла происходит интенсивное испарение и высокая температура не успевает проникать во внутренние слои материала, в результате возникнет большой градиент температуры. Возникающие при этом термические напряжения могут превосходить предел текучести и предел прочности обрабатываемого материала, что приводит к разрушению поверхностного слоя, образованию микротрещин.

Применение импульсов большой энергии дает высокую производительность обработки, но низкое качество поверхности импульсы малой энергии позволяют получить поверхность более высокой чистоты, но производительность обработки оказывается небольшой, даже при значительной частоте их повторения /35/.

Высота микронеровностей определяется в первую очередь энергией импульса и обрабатываемостью материала. Чем выше электроэрозионная обрабатываемость данного материала, тем большую высоту

микронеровностей имеет обработанная поверхность.

1.3.2. Дефектный слой

Свойства поверхностного слоя, как установлено многими исследователями /5,22.33.46-51/, существенно изменяются в результате ЭЭО. однако, в полной мере свойства этого слоя не определены. Условно этот слой, называемый дефектным, можно разделить на следующие зоны: 1) зону насыщения элементами рабочей жидкости; 2) зону отложения материала ЭЙ; 3) белый слой, образованный из расплавленного материала заготовки; 4) зону термического влияния; 5) зону пластической деформации. Последовательность образования зон, их количество, структура и свойства в значительной мере зависят от обрабатываемого материала, а также от режима обработки, применяемой рабочей жидкости, материала ЭЙ и условий ведения процесса. Между зонами, как правило, нет четкой границы, а в большинстве случаев они перекрывают друг друга. Вместе с тем каждая из перечисленных зон имеет свои особенности, влияющие на те или иные свойства поверхности и во многих случаях предопределяющие возможность успешной эксплуатации детали.

Кратко рассмотрим три зоны из перечисленных выше /33/.

1. Вследствие мощного теплового воздействия при выделении электрической энергии в процессе ЭЭО рабочая жидкость разлагается. Отдельные ее элементы проникают в поверхностный слой заготовки, диффундируют в нее и образуют с обрабатываемым материалом химические соединения.

2. Согласно /4/, с уменьшением длительности импульса увеличивается количество материала, удаляемого в парообразном состоянии и, следовательно, ускорится процесс образования факелов (пары и газы). При определенных условиях струи паров и капельки жидкого металла могут достигать

поверхности противоположного электрода. Обычно в межэлектродном промежутке (МЭП) находятся два факела - с анода и катода, причем они перемещаются вдоль одной прямой, но в противоположные стороны, поэтому в процессе их взаимодействия происходит взаимное уменьшение энергии движущегося пара вплоть до подавления слабого Факела более сильным /52/. Явление переноса зависит от ширины межэлектродного зазора, наличия или отсутствия относительного перемещения электродов (например, вращение одного из электродов), при котором за время образования факелов анодное и катодное пятна успевают переместиться и встречные факелы не полностью перекрывают друг друга. Начало образования факелов с анода и катода также могут быть разнесены во времени ввиду разности скоростей электронного и ионного потоков.

Материал ЭЙ может не только концентрироваться на поверхности заготовки, но и диффундировать в более глубокие слои, например, в слой расплавленного материала заготовки, и образовать там различные фазы - твердые соединения и т.п.

3. При ЭЭО сталей и ряда других материалов на их поверхности образуется тонкий слой светлой, не травящейся в обычных условиях структуры так называемый "белый слой", обладающий рядом отличительных свойств по сравнению с основным металлом: резко повышенными твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью и др. Исследование химического и фазового состава "белого слоя" сталей, обработанных в различных средах, показало наличие в нем материала противоположного электрода, элементов среды МЭП, аустенита и продуктов его превращения, в первую очередь игольчатых структур, что свидетельствует как о диффузионном, так и о закалочном его происхождении. Однако среди исследователей нет единого мнения в вопросах механизма образования "белого слоя" и его состава, что объясняется сложностью происходящих процессов и разнообразием применяемых методик. Толщина "белого слоя"

зависит от величины энергии импульса и длительности, а также температуро-проводности и материала заготовки.

1.3.3. Микротвердость поверхностного слоя

Твердость является одной из важнейших характеристик материалов и изделий. Твердость представляет собой внешнее выражение тех сложных процессов в электронной структуре атомов, которые совершаются при образовании твердых тел. В ряде работ /53-56/ показано, что твердость определяется поверхностной энергией твердого тела и, следовательно, должна быть связана с энергией межатомного взаимодействия, которая в свою очередь является Функцией электронного строения твердых тел.

Твердость поверхностного слоя материала, подверженного ЭЭО, изменяется в очень широких пределах. Она зависит от условий обработки. При ЭЭО в воде увеличение твердости бывает наименьшим и обусловлено оно главным образом лишь закалочными процессами. При обработке в жидких углеводородах твердость увеличивается больше, в этом случае, кроме закалочных процессов играет роль значительное насыщение поверхностного слоя углеродом. При электроэрозионном легировании поверхностей в воздухе независимо от твердости легируемого материала увеличивается твердость поверхностного слоя. Это объясняется кроме указанных выше причин протеканием химических реакций, основным из которых является взаимодействие металла с азотом воздуха - образование нитридов.

На изменение микротвердости поверхностного слоя значительное влияние оказывает вязкость рабочей жидкости, так как образование тех или иных структур в поверхностном слое во многом зависит от скорости охлаждения нагретой поверхности (рис. 1.4). Изложенное позволяет объяснить причины изменения структуры и микротвердости поверхностного слоя, а также определить направления разработки новых рабочих жидкостей, обеспечивающих поверхностный слой с определенными свойствами. Так, для получения высокой и однородной твердости

необходимо быстрое охлаждение поверхности единичной лунки при ее высоких температурах и более медленное охлаждение в сравнении с охлаждением водой в области низких температур. Этим требованиям может удовлетворить смесь масла с водой. Использование такой рабочей жидкости при температуре поверхности единичной лунки выше температуры кипения масла, очевидно, обеспечит охлаждение обрабатываемой поверхности со скоростью более высокой, чем при охлаждении маслом. В этом случае проявляются охлаждающие свойства воды.

Таким образом, из обзора теоретических и экспериментальных работ следует, что для решения проблемы электроэрозионной прошивки глубоких отверстий необходимо и достаточно находить пути эффективной эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки. Применение высокого давления для прокачки рабочей жидкости через трубчатый электрод приводит к усложнению конструкции электроэрозионных прошивочных станков и мер технической безопасности. В связи с этим исходя из Формулы (1.4) можно сделать вывод, что наиболее простым и эффективным путем увеличения предельно достижимой глубины отверстия является увеличение зазора между поверхностями электрода и детали. В этом аспекте заслуживает внимание предлагаемый в работе /21/ составной ЭЙ, представляющий из себя металлический стержень, заключенный в диэлектрическую оболочку с зазором. Этот зазор между стержнем и внутренней поверхностью стенки оболочки служит для подачи рабочей жидкости непосредственно в зону обработки. Предлагаемый способ позволяет применять в качестве электрода прутки из различных металлов (медь, латунь, вольфрам и т.д.). Следовательно, появляется возможность изготовления ЭЙ из различных эрозионно-устойчивых металлов, сплавов и композитов.

Как практика показывает, применение составного ЭЙ позволяет увеличить глубину прошиваемых отверстий до 100-200 и более диаметров в зависимости от материала детали и диаметра прошиваемого отверстия

при давлениях, на порядок меньших чем применяемых на японских станках

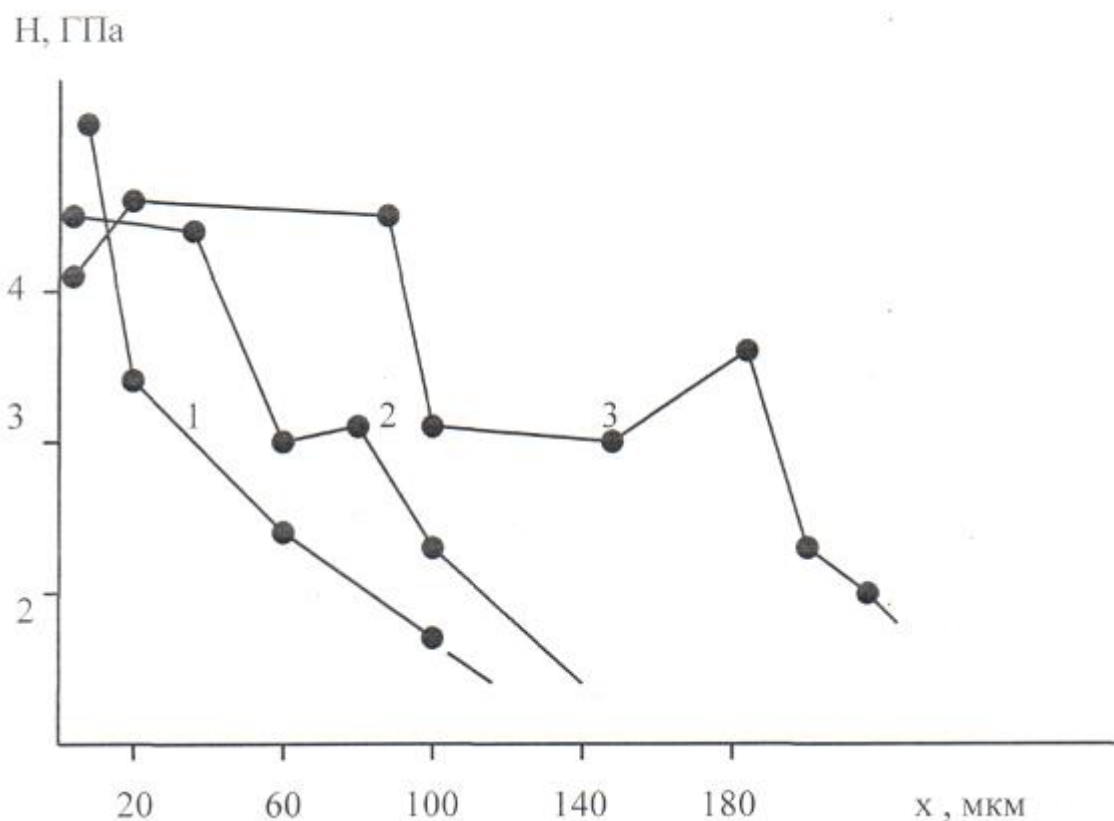


Рис. 1.4. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя при ЭЭО медным ЭИ стали 45 при $I_{cp} = 20$ А /23/.

1. Дистиллированная вода, $T = 70^{\circ}\text{C}$.
2. Индустриальное масло 12. $T = 70^{\circ}\text{C}$.
3. Смесь воды с индустриальным маслом 12, $T = 20^{\circ}\text{C}$.

1.4. Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы является обоснование механизма прошивки глубоких отверстий составным электродом-инструментом, экспериментальное подтверждение целесообразности его применения и разработка конструкции по созданию электроэрозионных приставок для реализации возможностей предлагаемого способа; отработка режимов и условий технологического процесса прошивки отверстий различных диаметров. Исходя из цели работы необходимо было решать ниже перечисленные задачи:

1. Объяснить механизм прошивки глубоких отверстий малого диаметра составным ЭЙ.

2. Выработать рекомендации по созданию электроэрозионных приставок для реализации возможностей составного ЭЙ.

3. Отработать режимы технологического процесса, при которых достигаются оптимальные величины шероховатости поверхности, производительности, энергоемкости и точности прошиваемого отверстия.

2. МЕТОДИКА ГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. Составной электрод-инструмент для прошивки глубоких отверстий

Как было показано в разделе 1.1, изготовление прецизионных отверстий малого диаметра, отношением глубины к диаметру 15-20, успешно осуществляется электроэрозионным способом. По мере увеличения глубины отверстия появляется проблема эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки. Эффективность эвакуации зависит от давления рабочей жидкости, подаваемой в МЭП, которое в свою очередь зависит от кубической величины расстояния между поверхностями электродов в отверстии.

Рассматриваемый в диссертации составной ЭИ, предназначенный для прошивки глубоких отверстий малого диаметра, конструктивно отличается от традиционно применяемых электродов - стержневых и трубчатых. На рис.2.1 представлена конструкция составного ЭИ, используемого при прошивке глубоких отверстий малого диаметра, и его положение в • отверстии /57/. Оригинальной конструктивной особенностью предлагаемого ЭИ является наличие оболочки из гибкого диэлектрического материала 3, надеваемой с некоторым зазором на металлический стержень 2. Величина кольцевого зазора Δl между стержнем и внутренней поверхностью оболочки определяется необходимостью подачи достаточного количества рабочей жидкости в зону обработки для эффективной эвакуации продуктов эрозии из МЭП и составляет 0.05-0.2 мм в зависимости от диаметра прошиваемого отверстия. Диэлектрическая оболочка должна выдерживать избыточное радиальное давление прокачиваемой жидкости, которое составляет 1,5-7.0 кгс/см². Кроме того, ввиду высокой температуры, развиваемой искровым разрядом, оболочка должна обладать достаточной температурной стойкостью. С учетом этих условий толщина стенки оболочки s_{l2} , в зависимости от диаметра металлического электрода-стержня, составляет 0.04-0.2 мм.

Для удаления продуктов эрозии из МЭП служит кольцевой зазор между внешней поверхностью диэлектрической оболочки (ДО) и внутренней поверхностью отверстия в детали 1. Наличие ДО позволяет устранить эффект боковой эрозии по всей длине ЭЙ за исключением вылета (выступающая из оболочки рабочая часть стержня). Величина зазора cI_3 определяется возможностью протекания через него отработанной рабочей жидкости с взвешенными в ней продуктами эрозии. Она зависит от режима обработки, диаметра ЭЙ и вязкости рабочей жидкости. При применении обычной воды в качестве рабочей жидкости в зависимости от технологических параметров определенного режима обработки зазор Δ составляет 0.04-0.2 мм.

Таким образом, суммарное расстояние от поверхности металлического стержня (МС) до внутренней поверхности отверстия в детали составляет: $\delta = cI_1 + cI_2 + cI_3 = 0.13-0.6$ мм.

В таблице 2.1 (стр.22) приведены экспериментальные данные по диаметрам отверстий, изготовленных в различных материалах составным ЭЙ в зависимости от диаметра стержня и ДО. Следует отметить, что отношение диаметра стержня $cI_{ст}$ к диаметру отверстия $\delta_{от}$ практически постоянно и примерно равно 0.6, тогда как при прошивке традиционным электродом это отношение больше 0.8 и растет с увеличением его диаметра. Таким образом, при сопоставимых размерах диаметров составным ЭЙ прошиваются отверстия большего диаметра, чем традиционными стержневыми или трубчатыми электродами.

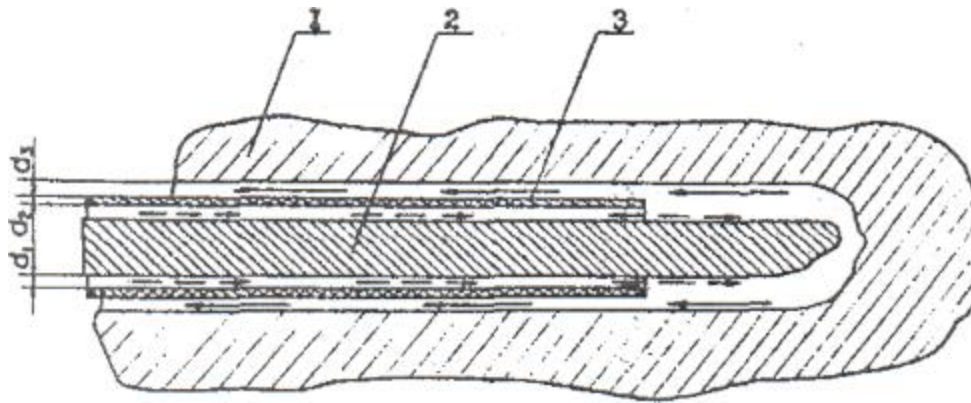


Рис.2.1. Схематический чертеж составного ЭЙ.

1. Обрабатываемая деталь.
2. Металлический стержень.
3. Диэлектрическая оболочка.

Стрелкой указано движение рабочей жидкости (прерывистая) -и со взвешенными в ней эродированными частицами (сплошная).

2.2 Объекты исследования

1) МЕДЬ Марка: М1 ГОСТ 859-66

Химический состав (%): Си-99.9; В1-0.001; 8Ь-0.002; Аз-0.002; Ре-0.005; N1-0.002; РЬ-0.005; 8п-0.002; 8-0.005; O₂-0.05; 2п-0.005; А§-0.003

Физико-механические свойства:

Плотность, г/см ³	29
Предел прочности, кгс/мм	20-25
Твердость по Бринелю, кгс/мм ²	45
Предел текучести, кгс/мм	9-15
Ударная вязкость, кгс м/см ²	10-18
Предел прочности на срез, кгс/мм ²	15
Модуль сдвига, кгс/мм ²	4240
Модуль упругости, кгс/мм ²	11700-12-600

2) СТАЛЬ НЕРЖАВЕЮЩАЯ Марка: 12Х18Н1 ОТ ГОСТ 5632-72

Химический состав (%): 0,12-С; 18-Сг; 10 - N1; 1 - Т1

Физико-механические свойства:

Плотность, г/см ³	7,8
Предел прочности, кгс/мм ²	55
Предел текучести, кгс/мм	20
Ударная вязкость, кгс м/см~	8
Удлинение %	40
Поперечное сужение %	55
Твердость по Бринелю, кгс/мм"	90-95

2.3. Малогабаритная электроэрозионная приставка.

Изготовление глубоких отверстий малого диаметра в электропроводящих материалах возможно и целесообразно осуществлять электроэрозионным способом /54-59/. При этом проблема эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки может быть решена с применением трубчатого или СЭИ. Возможность прокачки рабочей жидкости позволяет существенно упростить конструкцию электроэрозионных станков. В связи с тем, что отпадает необходимость использования ванны, электроэрозионные установки (ЭЭУ) могут стать малогабаритными и мобильными.

Согласно списанию механизма прошивки глубоких отверстий СЭИ /59/ ЭЭУ, разрабатываемые для реализации возможностей предлагаемого способа могут быть трех типов : 1) обрабатываемая деталь приводится во вращение. СЭИ совершает возвратно-поступательное движение в продольном направлении; 2) обрабатываемая деталь неподвижна, во вращение приводится лишь МС СЭИ; 3) совместная реализация обоих способов.

Обрабатываемые электроэрозионным способом детали могут быть различными по своей форме и габаритам. Бывают случаи, когда их нецелесообразно или невозможно приводить в движение. Такие детали можно обрабатывать вращающимся ЭИ (2-тип ЭЭУ). На рис. 1.1 приведена блок-схема экспериментальной ЭЭУ. с помощью которой можно прошивать отверстия в деталях практически любого габарита и формы. Эта установка в экспериментальном варианте является малогабаритной и ее можно устанавливать непосредственно вблизи зоны обработки под нужным углом

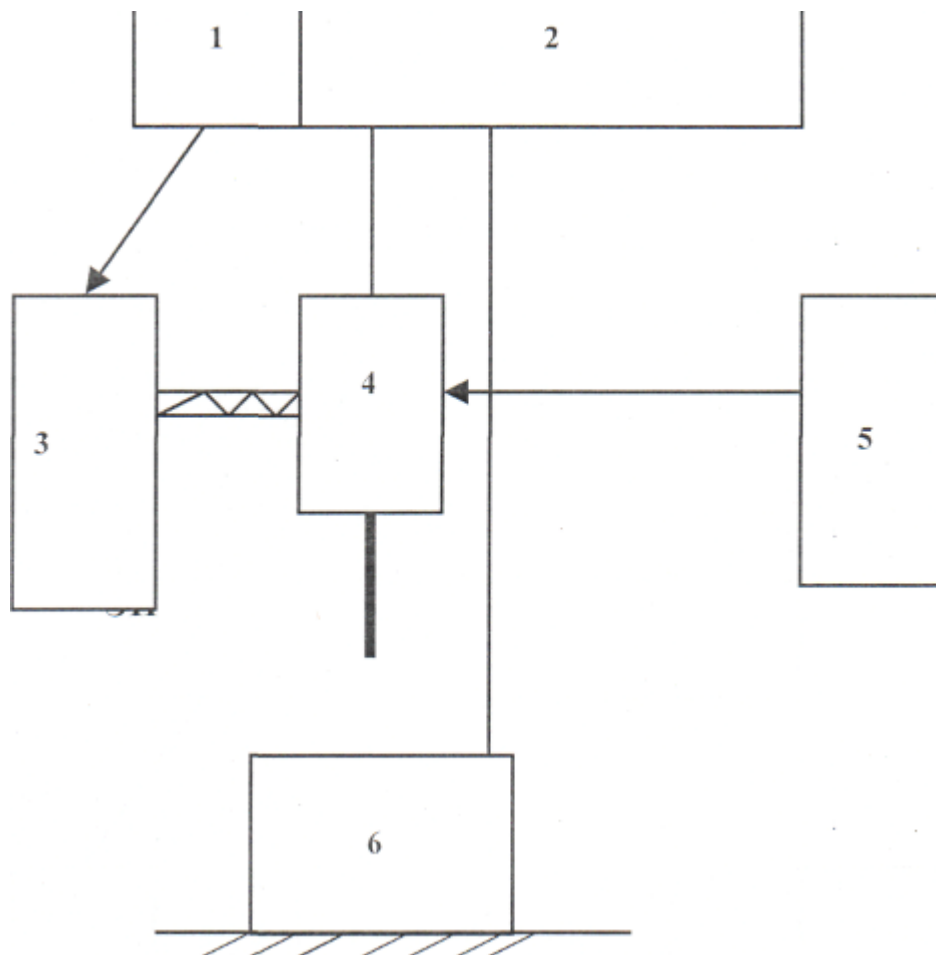


Рис.2.1. Блок-схема переносной электроэрозионной установки

1. Генератор импульсов.
2. Блок управления за величиной межэлектродного зазора.
3. Привод движения ЭЙ.
4. Устройство для зажима и вращения ЭЙ.
5. Система подачи рабочей жидкости под давлением.
6. Обрабатываемая деталь.

относительно поверхности обрабатываемого изделия.

С помощью этой установки можно изготавливать серию параллельных отверстий в изделиях. Установка может крепиться на различных изделиях, устройствах и технологических столах, тем самым расширится диапазон ее возможностей. На рис.2.2 приведен упрощенный чертеж малогабаритной ЭЭУ, где отражены основные принципы конструирования переносных электроэрозионных установок и оптимальная компоновка основных узлов и деталей. Она состоит из следующих основных узлов и деталей: 1 - направляющая штанга; 2 - основание; 3 - ползун; 4 - ходовой винт; 5 - полугайка; 6 фиксатор; 7 - привод подачи ЭЙ; 8 - привод вращения стержня ЭЙ; 9 - электрическая щетка; 10 - подвижная муфта; 11 - стопорный винт; 12 - шпиндель; 13 - штуцер; 14 - патрон; 15 - насадка; 16 - гайка; 17 - оболочка ЭЙ; 18 - стержень ЭЙ; 19 - сальник; 20 - уплотнительное кольцо; 21 - стопорный винт; 22 - зажимной винт; 23 - камера; 24 - люнет.

В процессе эксплуатации переносной установки ползун 3 перемещаясь в сторону обрабатываемой детали (анод) несет на себе вращающийся стержень 18 (катод) ЭЙ одетый в оболочку 17. Стержень 18 ЭЙ должен выступать из оболочки 17 на заданную величину. Для повышения точности прошиваемого отверстия ЭЙ пропускается через центрирующее отверстие люнета 24. Через штуцер 13 РЖ под давлением подается в полость камеры 23, откуда она попадает в кольцевой зазор между оболочкой и стержнем ЭЙ и далее выводится в зону электроэрозионной обработки. Герметичность полости камеры 23 обеспечивается сальником 19 и уплотнительным кольцом 20. В блоке питания и управления (ВПУ) включают привод вращения стержня ЭЙ 8, затем включается напряжение эрозии, подаваемое на ЭЙ через электрические щетки 9, а также включаются балластное сопротивление и разрядные емкости соответствующей величины. Причем на ЭЙ подается отрицательный потенциал, а на обрабатываемую деталь через клеммное соединение - положительный. Последним этапом

подготовки установки к работе является включение привода подачи ЭЙ 7, который подключен к системе слежения БПУ. Подаваемый таким образом ЭЙ приближается к поверхности обрабатываемой детали и, по достижению заданного межэлектродного промежутка появляется искровой разряд, означающий начало электроэрозионной прошивки.

Техническая характеристика

Диаметр прошиваемого отверстия, мм	0,5-5,0
Глубина прошивки, мм:	
за один проход.....	80
предельно возможная	300
Средняя скорость прошивки (зависит от материала детали и диаметра прошиваемого отверстия), мм/мин.....	0.5 - 9.0
Наибольший ход ЭЙ. мм	250
Давление в системе подачи рабочей жидкости (воды), МПа.....	до 1,0
Потребляемая мощность, не более, Вт.....	800
Габарит установки, мм (ДхШхВ)	200x165x650
Масса (без блока питания), кг	15

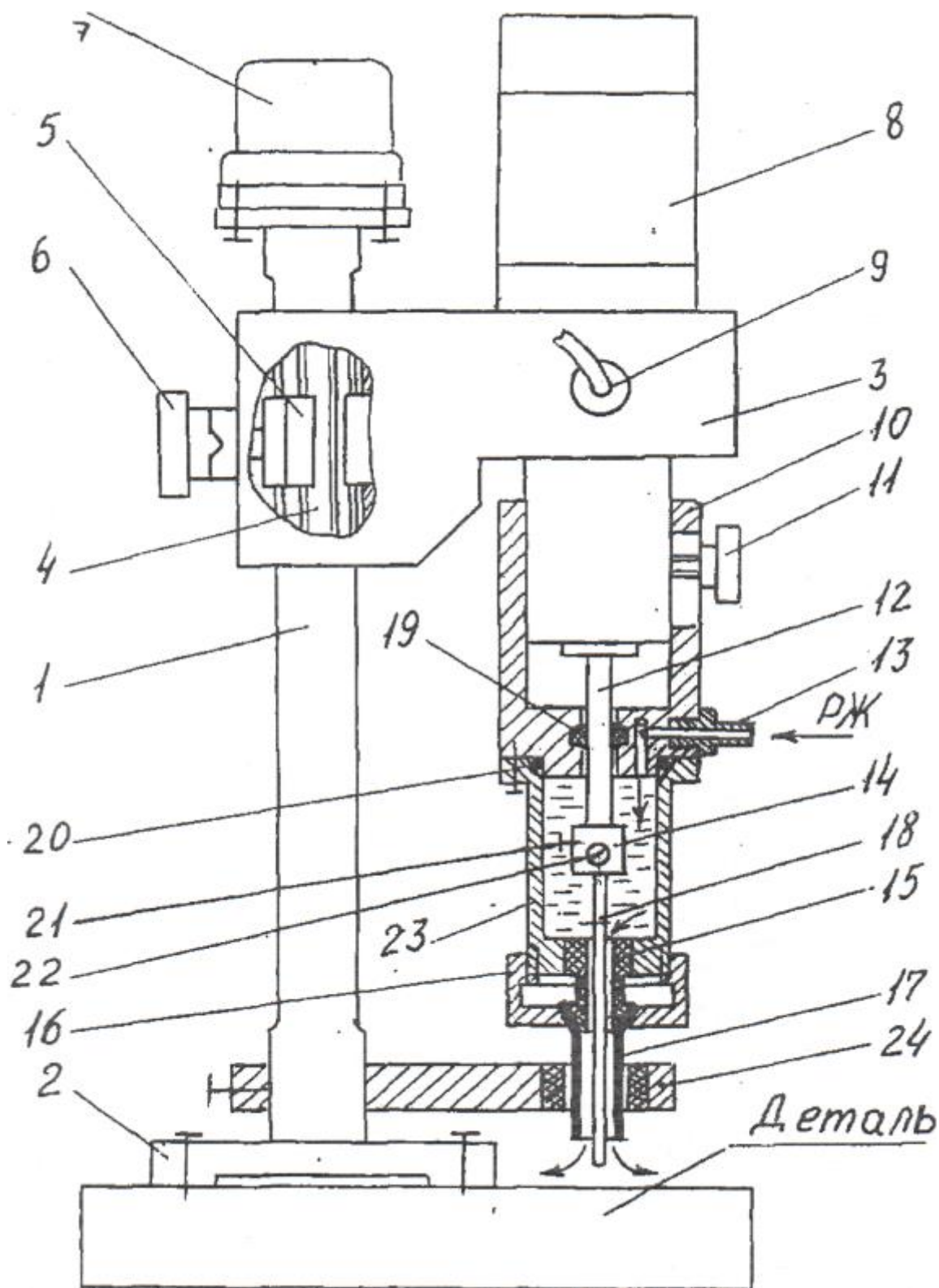


Рис.2.2.Компоновка основных узлов малогабаритной электроэрозионной приставки.

2.4. Генератор импульсов и блок управления приводом составного ЭЙ

Одним из наиболее простых и удобных в эксплуатации источников для создания последовательности прохождения электрических импульсов является КС-генератор. Несмотря на то, что генераторы такого класса имеют низкий к.п.д. и большую скважность, они получили широкое распространение при комплектации электроэро-зионных станков. Изменяя величину сопротивления токоограничивающего резистора можно менять частоту следования импульсов /58/:

$$f = (2.3RC \lg \frac{U_0}{U_0 - U_{пр}})^{-1} \quad (2.1)$$

где U_0 - напряжение на обкладках конденсаторов, $U_{пр}$ - среднее значение напряжения пробоя межэлектродного зазора, $C_{ф} = 0.72 \cdot U_0$

При исследованиях режимов прошивки глубоких отверстий малого диаметра использовался КС-генератор со следующими параметрами: напряжение холостого хода 60-120 В; сопротивление балласта 8-120 Ом; емкость накопительных конденсаторов могла меняться в пределах от 0.1 до 247.0 мкФ. На передней панели корпуса КС-генератора имеются амперметр и вольтметр, по показаниям которых можно судить об эффективности и устойчивости процесса ЭЭО.

При отработке режимов прошивки отверстий получены следующие параметры процесса ЭЭО: средний рабочий ток не более 10 А; максимальный импульсный ток не более 2 кА; частота следования импульсов 0.5-1.0 кГц; длительность импульса тока не более 100 мкс. Энергия импульса, вычисленная по эмпирической Формуле /37/:

$$W_u \approx 0.5CU_0^2 \quad (2.2)$$

могла меняться в пределах 0.001-0.9 Дж.

Производительность обработки, шероховатость поверхности и структурные изменения поверхностного слоя зависят от энергии импульса. Следовательно, задавая энергетические параметры ЯС-генератора можно добиться определенных вышеуказанных производных величин.

Как известно /58/, КС-генератор работает в ждущем режиме. По мере сближения электродов напряженность электрического поля растет и при некотором расстоянии, определяемом напряжением холостого хода, возникнет условие пробоя межэлектродного зазора. В МЭП выделяется запасенная в конденсаторах электрическая энергия. Скорость сближения электродов регулируется блоком управления приводом подачи ЭЙ (рис.2.3). Чем больше скорость подачи ЭЙ, тем больше частота следования электрических разрядов, эродируемых электродов. Чем больше эрозия электродов, тем больше концентрация продуктов эрозии в МЭП. Увеличение концентрации эродированных частиц приводит к снижению эффективности и устойчивости совершающих полезную работу электрических импульсов. С другой стороны, увеличение частоты следования импульсов приводит к падению среднего значения напряжения на конденсаторах. Если величина напряжения больше некоторого порогового, то "схема сравнения" (рис.2.3) открывается, усиленный сигнал открывает диодный мост и управляющее напряжение подается на обмотку 1_a . В зависимости от величины напряжения на конденсаторах ЭЙ с определенной скоростью перемещается в сторону детали. При падении напряжения на конденсаторах ниже порогового "схема сравнения" запирается, отпирается "электронный ключ" и напряжение сети подается на обмотку 1_b , которая подключена в противофазе относительно 1_a . Таким образом, при напряжениях ниже порогового или коротких замыканиях электродов на управляющую обмотку двигателя ДП60-90 через блок ЭШИМ подается напряжение в противофазе сигналу, сближающему электродов. При этом межэлектродный зазор будет увеличиваться до величины^ необходимой для

прохождения электрических разрядов в нормальных условиях. Пороговое напряжение плавно регулируется в пределах 30-60В

Таким образом, благодаря системе автоматического слежения за межэлектродным зазором устойчивость процесса прошивки отверстий повышается. С помощью регулятора напряжения порогового значения можно установить оптимальный режим работы КС-генератора. Система автоматического слежения за величиной межэлектродного зазора является начальным элементом автоматизации процесса электроэрозионной прошивки глубоких отверстий малого диаметра.

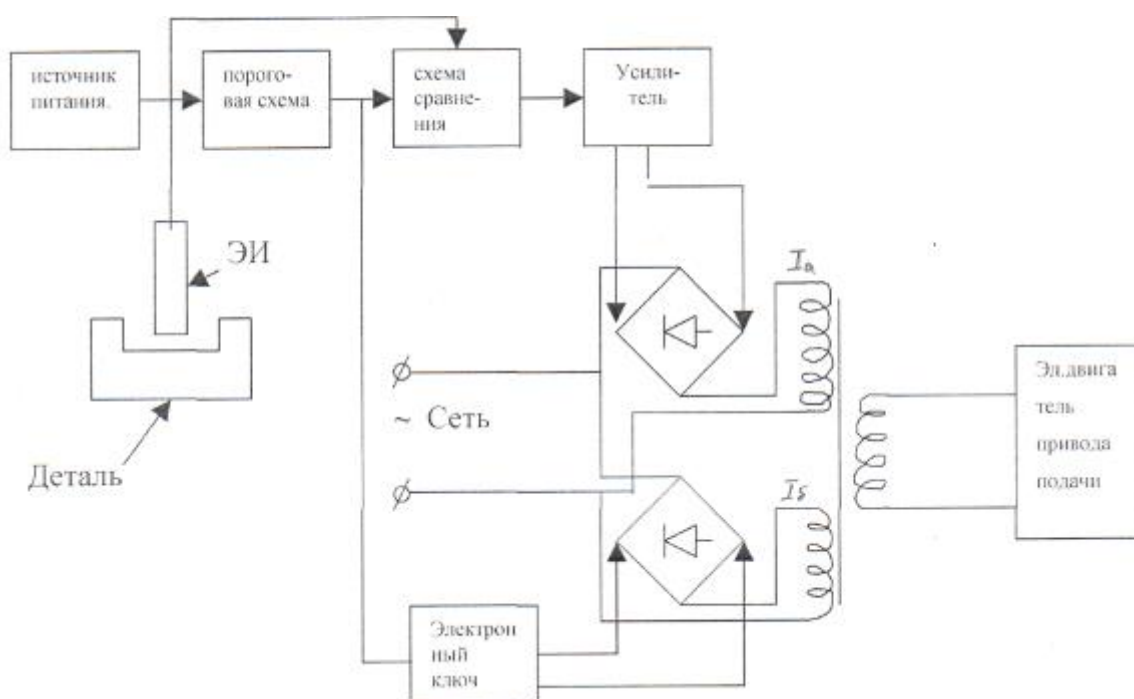


Рис. 2.3. Блок-схема регулятора приводом подачи составного ЭИ.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИИ СОСТАВНЫМ ЭЙ.

3.1. Механизм прошивки отверстий составным ЭЙ

Из рис 3.1 видно, что расстояние между боковой поверхностью стержня и поверхностью отверстия достигает 0.6 мм. Также необходимо учитывать, что в процессе обработки торцевая часть стержня приобретает конусообразную Форму и величина s еще увеличивается. В связи с этим представляет интерес вопрос о том, каким образом происходит эрозия такой широкой области, диаметр которой существенно превышает диаметра МС составного ЭЙ.

Для этого необходимо рассмотреть два способа применения составного ЭЙ. В одном из них, назовем его условно горизонтальным, геометрическая ось ЭЙ и детали располагаются соосно в горизонтальной плоскости, причем деталь вращается вокруг этой оси, а ЭЙ совершает лишь поступательное движение в сторону детали. Этот способ применяется для обработки тел вращения, в частности длинномерных стержней и реализован на так называемой стационарной электроэрозионной установке (стационарная и переносная условные названия двух модификаций лабораторных электроэрозионных установок). В другом, назовем его условно вертикальным, оси ЭЙ и отверстия расположены в вертикальной плоскости и во вращение приводится только МС. Этот способ предназначен для обработки деталей практически любой формы и габаритов, и реализован на переносной электроэрозионной установке.

1. Рассмотрим случай, когда оси ЭЙ и детали располагаются соосно в горизонтальной плоскости. При этом необходимо учитывать, что МС обладает определенной упругостью и находясь в горизонтальном положении подвергается действию изгибающего момента, пропорционального собственному весу P . На рис.3.2 указаны силы, действующие на упругий стержень с закрепленным одним концом. P - сила, действующая на правый

конец стержня со стороны правой половины от центра тяжести. Вес стержня длины l на расстоянии x от закрепленной части равен Px/l . При уравновешенном состоянии $P=F+Px/l$. На элемент стержня действует

сила веса $P = \frac{d\varepsilon}{l}$. Тогда момент всех вертикальных сил определяется

выражением:

$$M_1 = Fx + \int_0^x P\varepsilon \frac{d\varepsilon}{l} \quad (3.1)$$

Так как диэлектрическая оболочка (ДО) выполнена из гибкого пластического материала, ее влияние можно свести к некоторому увеличению веса составного ЭЙ, следовательно, в рассматриваемом случае к увеличению веса стержня, т.е. $P = P_c + P\delta_0$

Кроме вертикальных моментов сил в точке закрепления на стержень действует момент горизонтальных сил упругих напряжений M_2 . Полный момент сил M определяется формулой:

$$M = M_1 + M_2 = Px - P\frac{x^2}{2l} + M_2 \quad (3.2)$$

Момент сил M_2 можно найти из условия равновесия стержня. $M=0$ при $x=l$. Тогда $M = -Pl/2$. Из теории сопротивления материалов известно [60], что для изгибающего момента справедливо дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня:

$$M = Eiy'' \quad (3.3)$$

Тогда уравнение равновесия для изогнутого стержня принимает вид:

$$Eiy'' = -Px + P\frac{x^2}{2l} + P\frac{l}{2} \quad (3.4)$$

где E - модуль упругости, I - момент инерции поперечного сечения.

При $x=0$ $y''=0$; $y=0$ Тогда решение уравнения (3.4) принимает вид:

$$y = \frac{P}{4EI}lx^2 - \frac{P}{6EI}x^3 + \frac{P}{24EI}\frac{x^4}{l} \quad (3.5)$$

Полагая здесь $x=l$, находим стрелу прогиба свободного конца стержня:

$$y = \frac{Pl^3}{8EI} \quad (3.6)$$

Для круглого поперечного сечения $I = \frac{\pi d^4}{64}$, тогда

$$y = \frac{8Pl^3}{E d^4} \quad (3.7)$$

После простых преобразований получим:

$$y = \frac{2\rho l^4}{E d^2} \quad (3.8)$$

Здесь ρ - объемный удельный вес стержня. Однако, в этих рассуждениях мы не учитывали наличие ДО. Ввиду того, что упругие свойства оболочки гораздо ниже упругости стержня, можно допускать, что влияние оболочки сведется к некоторому увеличению линейного удельного веса, или соответственно ρ . Так как плотность материала оболочки много меньше плотности материала стержня, то это увеличение будет незначительным. В качестве материала стержня применяется вольфрамовая проволока. Для нее $\rho = 19 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$, $E = 36 \cdot 10^{16} \text{ Н/м}^2$. Удельный вес оболочки $\rho_{об} = 1.7 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$. Подставляя эти данные в уравнение (3.8), для $d = 1.5 \text{ мм}$ получим:

$$y = 0.5 l^4 \quad (3.9)$$

где y выражается в метрах. Из рис. 3.1 видно, что максимальная величина прогиба стержня может быть равна сумме зазоров $s_1 + s_2$ и составляет $y = 0.3 \text{ мм}$ для $d = 1.5 \text{ мм}$. Эта величина достигается при $l = 160 \text{ мм}$, что хорошо согласуется с реальной длиной электрода. Для меньших диаметров, как это следует из (3.8), величина y еще больше, в связи с этим при прошивке

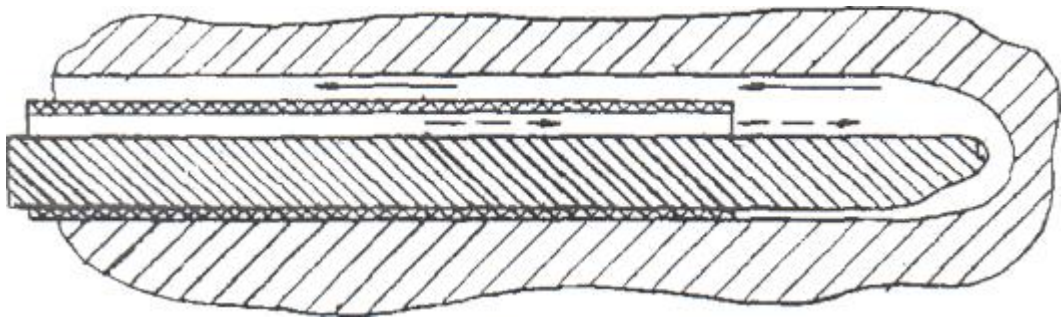


Рис.3.1. Положение конечной части составного ЭЙ в отверстии с учетом прогиба под действием изгибающего момента.

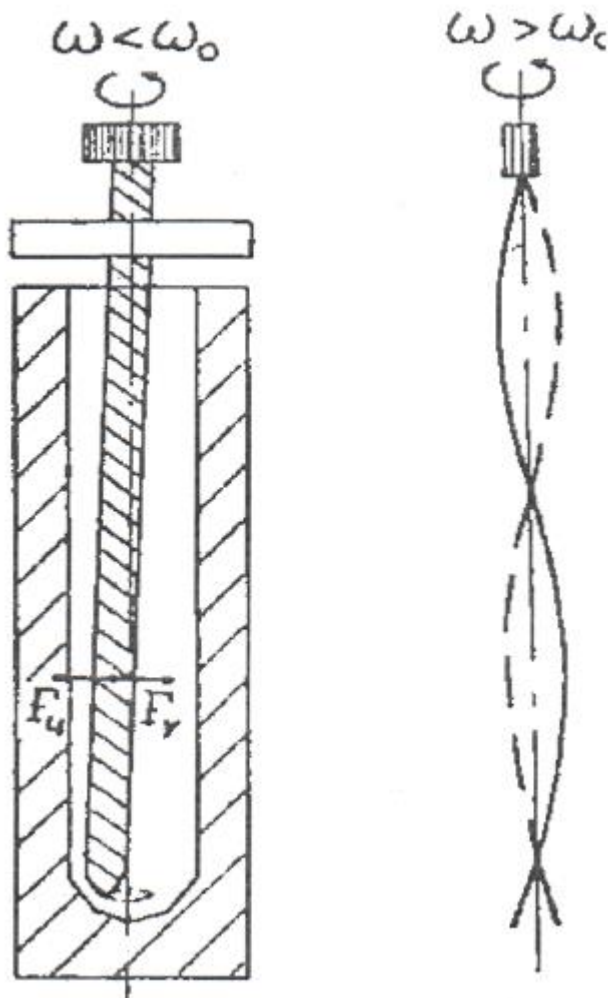


Рис.3.2. Движение конечной части составного ЭЙ при наличии вращения металлического стержня.

Таблица 3.1 Технологические параметры процесса электроэрозионной прошивки глубоких отверстий составным ЭИ.

с!от, мм	^мс. мм	Фю. мм	Ц), В	С, мкф	Уэ, мм/мин	/, мм	Т, %	Диапазон изменения Ка, мкм	АХ ₀ . мм	АХ _д . мм
МЕДЬ										
1,0	0,6	0,86	80	10	1,9	100	40	2-4	+0,10	+0,10
1,5	0,9	1,34	80	50	2,6	140	40	3-5	+0,11	+0,15
1,9	1,1	1,7	100	80	3,5	150	40	4-6	+0,10	+0,20
1,9	1Д	1,7	60	100	3,0	260	35	4-6	+0,10	+0,20
2,5	1,5	2,0	100	120	3,5	310	35	5-8	+0,15	+0,20
СТАЛЬ 12Х18Н10Т										
1,0	0,6	0,86	80	30	1,0	130	120	3-5	+0,05	+0,10
1,5	0,9	1,34	80	70	1,3	280	120	4-7	+0,05	+0,15
1,9	1,1	1,7	100	120	1,7	195	120	5-8	+0,05	+0,20
1,9	1,1	1,7	120	80	1,9	310	100	5-8	+0,05	+0,20
2,5	1,5	2,3	120	200	1,8	300	130	6-9	+0,05	+0,20

где, с!от — диаметр отверстия, с!мс ~ диаметр металлического стержня, с!до - диаметр диэлектрической оболочки, I₀ - напряжение, С -- емкость, Уэ - средняя скорость прошивки, /- глубина прошиваемого -отверстия, у относительный износ ЭИ по длине, Ка -- среднеарифметическое отклонение профиля поверхности прошиваемого отверстия, АХ₀ - отклонения отверстия от оси на длине 100 мм, АХ_д- неравномерность диаметра отверстия.

отверстий малого диаметра применяется кондуктор (люнет) для уменьшения прогиба электрода.

Таким образом, под действием изгибающего момента конечная часть ЭЙ отклоняется от оси вращения детали и прилегает к поверхности отверстия (рис.3.1). Следовательно, величина бокового расширения отверстия относительно стержня должна превышать толщину стенки оболочки, чтобы она могла заходить в отверстие вслед за стержнем. Находясь в отверстии ДО выполняет роль подвижного люнета, благодаря которой, при правильном выборе режима обработки составной ЭЙ как бы самоцентрируется.

Из предложенного механизма работы составного ЭЙ следует, что выступающая из оболочки рабочая часть стержня должна иметь несимметричную форму - форму полуконуса, обращенную эродированной стороной к нижней поверхности отверстия, что полностью подтверждается экспериментально.

Исследование единичных лунок (более подробно см. в подразделе 3.1.1) показало, что диаметр и глубина лунок зависят от параметров электрического разряда, материала детали и для диапазона энергии импульсов 0.02-0.8 Дж лежат соответственно в пределах 0.1-0.9 мм и 0.02-0.12 мм, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными [59]. Следовательно, расширение отверстия на необходимую величину получается за счет диаметра, а точнее радиуса лунок от торцевых разрядов и глубины лунок от боковых разрядов.

Рассмотрим случай, когда оси вращающегося стержня и прошиваемого отверстия расположены в вертикальной плоскости. При этом способе обработки во вращение приводится лишь стержень, а оболочка перемещается в продольном направлении. При рассмотрении данного способа необходимо учитывать, что МС не является идеально прямолинейным, так как в процессе рихтования удается лишь уменьшить неровности стержня по

длине. Следовательно, центр тяжести стержня имеет некоторое смещение x_0 относительно собственного оси вращения (геометрической оси). При вращении стержня с угловой скоростью ω центр тяжести будет вращаться по окружности радиусом x_0 и появится центробежная сила F_y , стремящаяся отклонить электрод от оси вращения. С увеличением отклонения появляется сила упругости F_x , которая направлена в сторону, противоположную F_y , и стремится вернуть стержень в недеформированное состояние. Пусть y - величина сдвига центра тяжести за счет деформации электрода. Ее можно найти из условия равновесия F_x и F_y , (рис.3.4):

$$F_y = m\omega^2(x_0 + y) \quad (3.10)$$

$$F_x = ky \quad (3.11)$$

$$y = x_0 / \left(\frac{k}{m\omega^2} - 1 \right) \quad (3.12)$$

где m - масса стержня, K - прогиб стержня от единичной силы в том же сечении [60]. Для стержня постоянного сечения с закрепленным одним концом K равно:

$$k = 3EI/l^3 \quad (3.13)$$

где $I = mgl_{cm} / 64$, l - длина стержня. Подставляя выражения для l и U в (3.12) для x получим окончательную Формулу:

$$x = \frac{x_0}{\left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1 \right)} \quad (3.14)$$

где собственная частота ω_0 равна:

$$\omega_0 = \frac{d_{cm}}{5l^2} \sqrt{\frac{3E}{\rho}} \quad (3.15)$$

Здесь ρ - плотность стержня. Минимальная длина l , определяемая

конструкцией установки, составляет 100 мм. Тогда диапазон ω составляет от $8 \cdot 10^3$ с для $c_{cm} = 0.3$ мм до $2 \cdot 10^4$ с для $c_{cm} = 0.5$ мм. Частота ω определяется числом оборотов двигателя, предназначенного для вращения стержня при осуществлении вертикального способа. Для двигателя УАД-52, который конструктивно предусмотрен на переносной установке, $\gamma = 8.6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-2}$. Подставляя эти значения в (3.14) получим, что отклонение отрицательно, т.е. направлено в сторону, противоположную первоначальному отклонению x_0 . Следовательно, за счет высокой скорости вращения происходит самоцентрировка электрода для всего диапазона диаметров. С увеличением ω резко уменьшается и отклонение x стремится к $-X_0$, т.е. центр тяжести выходит на ось вращения. Дополнительная центровка происходит за счет ДО. Экспериментально установлено, что при самоцентрировке стержня составного ЭЙ за счет высокой скорости вращения по его длине образуются узлы и пучности (рис 3.2). Уменьшая частоту вращения электрода ω или длину свободного конца вращающейся части электрода l за счет перемещения кондуктора (который конструктивно предусмотрен на установке), можно увеличивать согласно формулам (3.12) и (3.14), отклонение рабочей части электрода и соответственно диаметр отверстия. Для беспрепятственного продвижения ДО вглубь отверстия величина бокового зазора быть не меньше чем толщина, стенки ДО. В связи с этим рассмотрим модель образования бокового зазора величиной, равной толщине стенки ДО. В целом механизм расширения для горизонтального и вертикального расположения ЭЙ и детали "одинаков, отличие заключается лишь в способе получения эксцентриситета. В связи с этим для простоты будем рассматривать лишь горизонтальный способ.

При наличии эксцентриситета рабочей части составного ЭЙ относительно оси прошиваемого отверстия в реальном процессе происходит перераспределение взаимодействующих участков торцевой площади отверстия в детали и торцевой площади МС. поперечный срез взаимного

расположения которых без учета ДО приведен на рис.3.3. Если предположить, что электрические разряды проходят только на торцевой площади стержня, то сегменты торца стержня S_1, S_2, \dots, S_5 , обрабатывают по площади колец детали S_1, S_2, \dots, S_5 . Для данных площадей можно написать соотношение:

$$\frac{S'_1}{S_1} > \frac{S'_2}{S_2} > \frac{S'_3}{S_3} > \frac{S'_4}{S_4} > \frac{S'_5}{S_5} = 1 \quad (3.16)$$

По мере удаления от центра отверстия площади обрабатываемых колец значительно превосходят площади обрабатывающих сегментов МС. Это означает, что износ стержня по сегментам также будет увеличиваться по мере удаления от центра, что приводит к образованию полуконуса. Расчеты показывают, что протяженность конуса должна увеличиваться по мере углубления МС в отверстие. Однако на практике наблюдается некоторая установившаяся величина полуконуса, не изменяющаяся в процессе обработки.

Экспериментально установлено, что при прошивке отверстий различными по диаметру электродами и при постоянной величине энергии импульса наблюдается увеличение относительного износа стержня с уменьшением его диаметра. Это связано с тем, что по мере уменьшения диаметра стержня при постоянной энергии импульса лунки, образуемые на торцевой площади стержня могут, стать соразмерными с его диаметром. Это означает, что тепловой источник можно считать поверхностным и плоским, расположенным в центре, стержня ЭЙ, а разрядные импульсы достаточно длительными, чтобы рассматривать стационарный случай. Тогда тепловым потоком Q в радиальном направлении можно пренебречь. С уменьшением диаметра стержня радиальный градиент температуры $\partial T/\partial r$ увеличивается и, следовательно, увеличивается поток, C

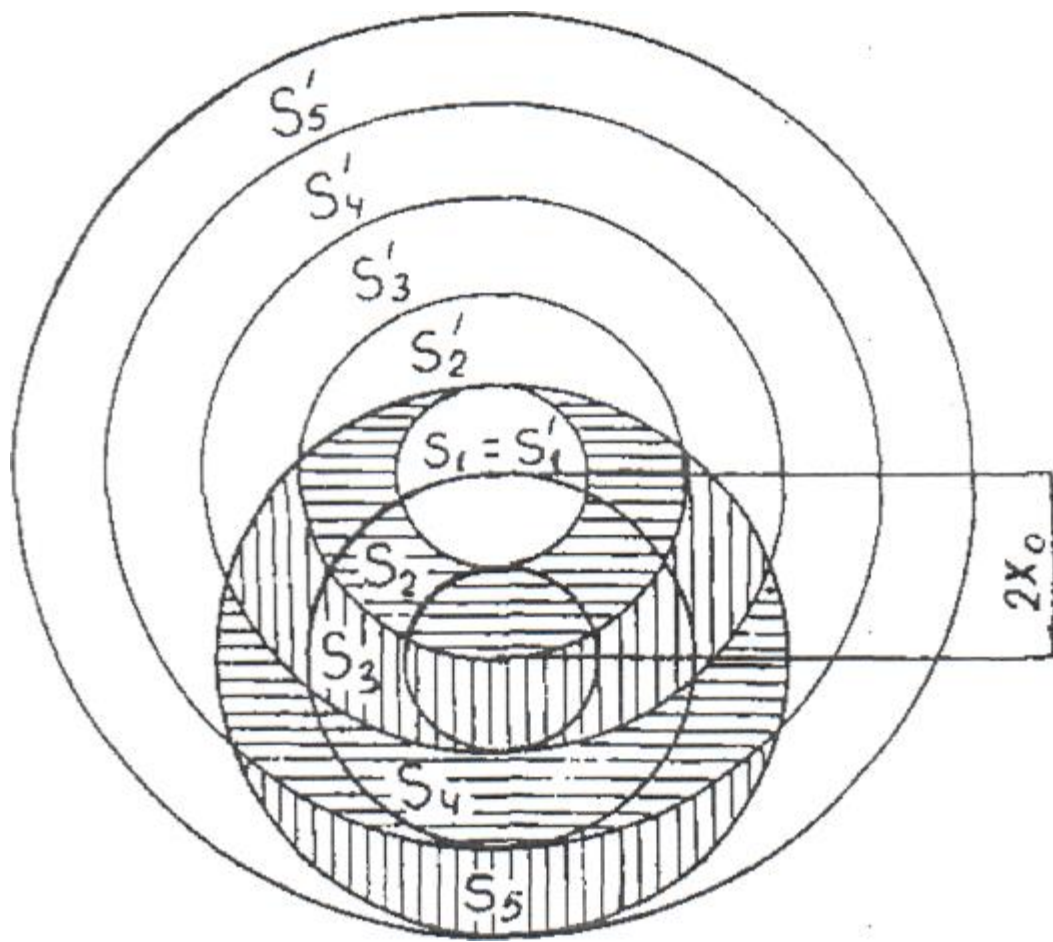


Рис.3.3. Положение стержня-электрода в отверстии при наличии эксцентриситета оси стержня относительно оси прошиваемого отверстия (поперечный срез).

пропорциональный $\partial T/\partial g$. В частности, если пренебречь потоком вглубь стержня, то $C \propto 1/p(\eta, \rho/l_2)$, где ρ - диаметр стержня, l_2 - диаметр теплового источника. Увеличение C приводит к росту диаметра единичной лунки ρ_n . Глубина лунки h , при этом уменьшается. Однако, поскольку объем лунки $V \propto \rho^2 h$, то результатом будет увеличение U_n . Кроме того, когда $\rho \ll \eta$, то для большинства разрядов будет происходить перекрытие лунки с краем стержня. При этом удаление металла из лунки существенно упростится ввиду отсутствия не оплавившихся боковых стенок. Все это приводит к увеличению износа ЭИ с уменьшением диаметра стержня.

Данные рассуждения относятся и к процессу образования полуконуса в случае прошивки отверстия составным ЭИ со смещенной от центра рабочей частью МС. Как видно из рис.3.4. величина разрушаемого участка под действием электрических разрядов, имеющих в среднем одинаковую мощность, зависит в основном от того, в какой части полуконуса проходят разряды. Ближе к вершине конуса эрозия МС будет происходить интенсивнее, что ограничивает его длину. Этот фактор обеспечивает формирование оптимальных размеров и форму торца стержня в зависимости от условий процесса ЭЭО.

Рассмотрим более детально механизм расширения отверстия до диаметров, необходимых для беспрепятственного продвижения составного ЭИ в глубь детали. В первом приближении [57] боковое расширение относили за счет радиуса и глубину лунок, образуемых на торцевой и боковой поверхностях детали. Однако дальнейшие исследования показали, что наличие эксцентриситета приводит к образованию полуконуса на торцевой части стержня, который формирует обрабатываемую поверхность дна отверстия. При приближении детали и ЭИ друг к другу электрические разряды в основном проходят через поверхности полуконуса и торцевой части МС (рис.3.4). Таким образом, расширение диаметра отверстия на величину

толщины стенки ДО происходит благодаря электроэрозионному разрушению детали под действием электрических разрядов, протекающих с основания конусной части МС. Механизм образования бокового зазора на уровне исследования коэффициента перекрытия единичных лунок, образуемых на боковой поверхности ЭИ и детали приведен в работе /38/.

Как видно из рис.3.4, величина бокового расширения определяется формулой:

$$l' = \frac{h}{\tan a} \quad (3.17)$$

где h - глубина лунки, a - угол конуса. Точный количественный расчет величины l' затруднен в связи с тем, что форма полуконуса торца МС зависит от множества факторов, в том числе технологических параметров ЭЭО. Модель образования полуконуса, описанная ранее (рис.3.3). также применима к реальным условиям процесса электроэрозионной прошивки глубоких отверстий с той лишь разницей, что при наличии ДО кольца $5''$ / $5''_?$, ... $5''$.,- детали и сегменты $5''$ / $5''$, ... ^ МС претерпевают взаимное смещение на величину толщины стенки ДО или точнее на 8 . Вращение детали вокруг собственной оси позволяет обрабатывать отверстие по всей площади.

При обработке неподвижной детали вращающимся МС благодаря прецессии рабочей части, которого образуется прямой конус. А механизм образования конуса и модель расширения диаметра отверстия останутся такими же, как было рассмотрено выше.

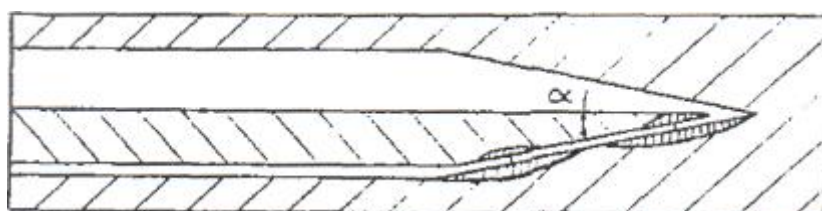
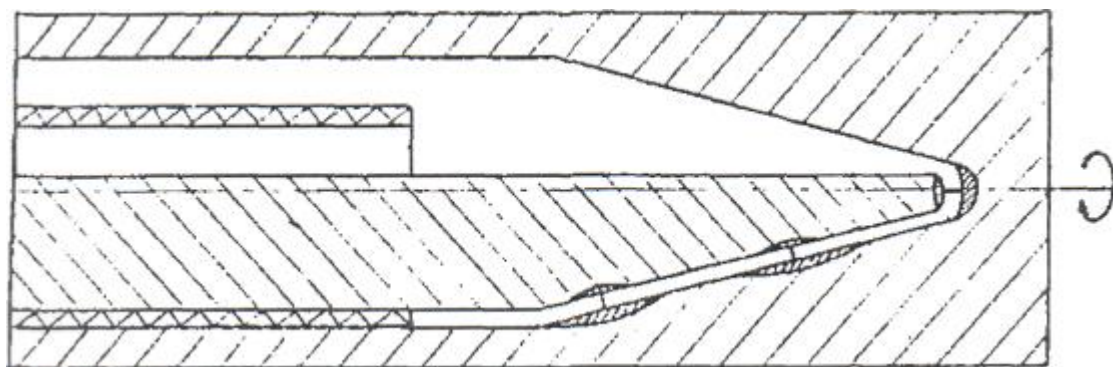


Рис.3.4. Положение составного ЭИ в отверстии и характер работы конусной части металлического стержня.

3.1.1. Изменение микрорельефа поверхности анода под действием единичного электрического разряда.

При прохождении электрического разряда между электродами в жидкости образуется плазменный канал, поверхности электродов подвергается бомбардировке заряженными частицами. В результате соударения потока заряженных частиц с поверхностью электродов выделяется тепловая энергия, способная расплавить и испарить металл в местах воздействия, в результате чего образуется лунка /22.38,42.61-63/. Ниже приводятся результаты исследований единичных лунок, полученных на поверхности анода (медь, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т). Катодом служила вольфрамовая проволока. В качестве диэлектрической среды использовалась проточная вода.

Единичные лунки, образованные на полированной поверхности поначалу исследовались визуально через оптический микроскоп. При этом обнаружено, что лунки в подавляющем большинстве имеют форму периметра очень близкую к правильному кругу. Это обстоятельство давало возможность удовлетвориться снятием профилограммы лунок только вдоль одного диаметра по линии наибольшей шероховатости (т.е. наибольшие диаметр и глубина). Линия наибольшей шероховатости определялась путем неоднократного прохода иглы-пирамидки датчика профилометра по дну лунки в районе предполагаемого максимального диаметра с перемещением в сторону на 10 мкм. При этом контролировалось среднее арифметическое отклонение профиля поверхности Нд.

На рис.3.5. приведен график зависимости объема лунки, полученной на поверхности нержавеющей стали 12Х18Н10Т, от емкости и напряжения ЯС-генератора. как видно, с увеличением напряжения увеличивается объем лунки при постоянном значении емкости. Увеличение емкости при постоянном значении напряжения вначале приводит к увеличению объема лунки, но выше некоторой величины емкости происходит уменьшение

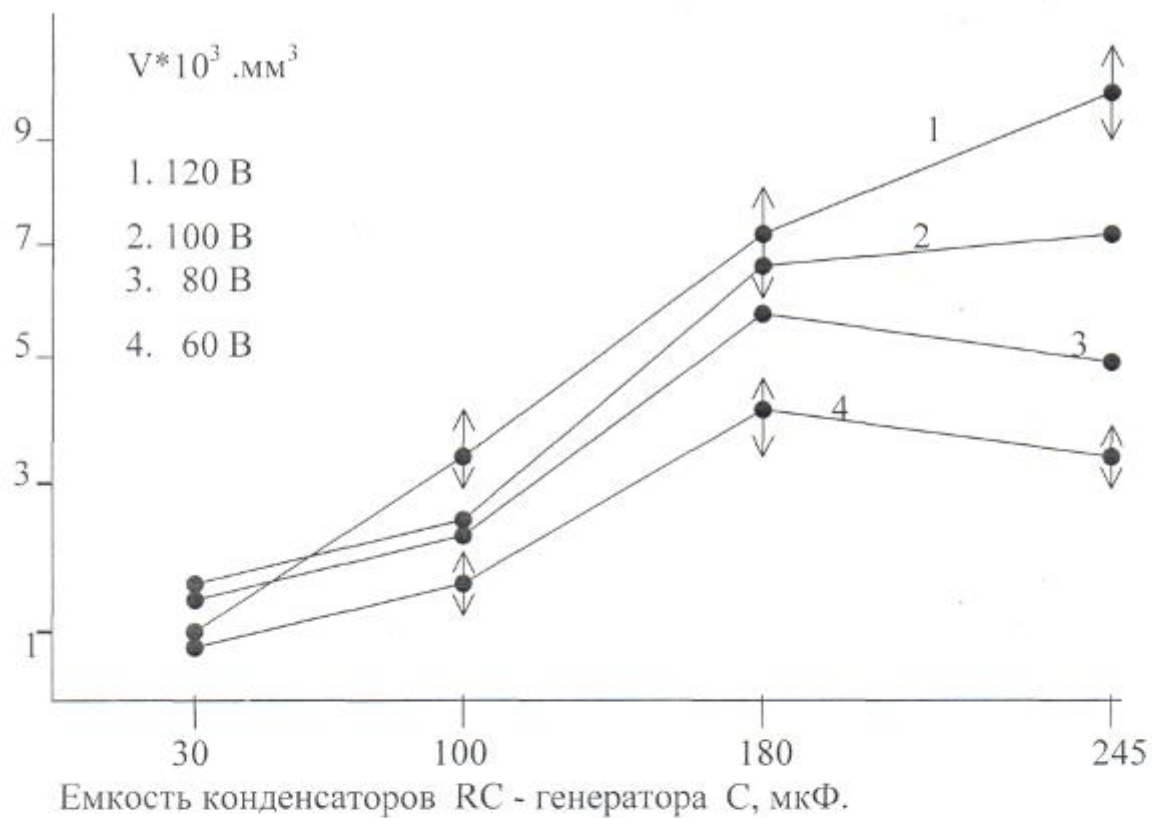


Рис.3.5. Зависимость объема лунки от энергии импульса. Сталь 12Х18Н10Т.

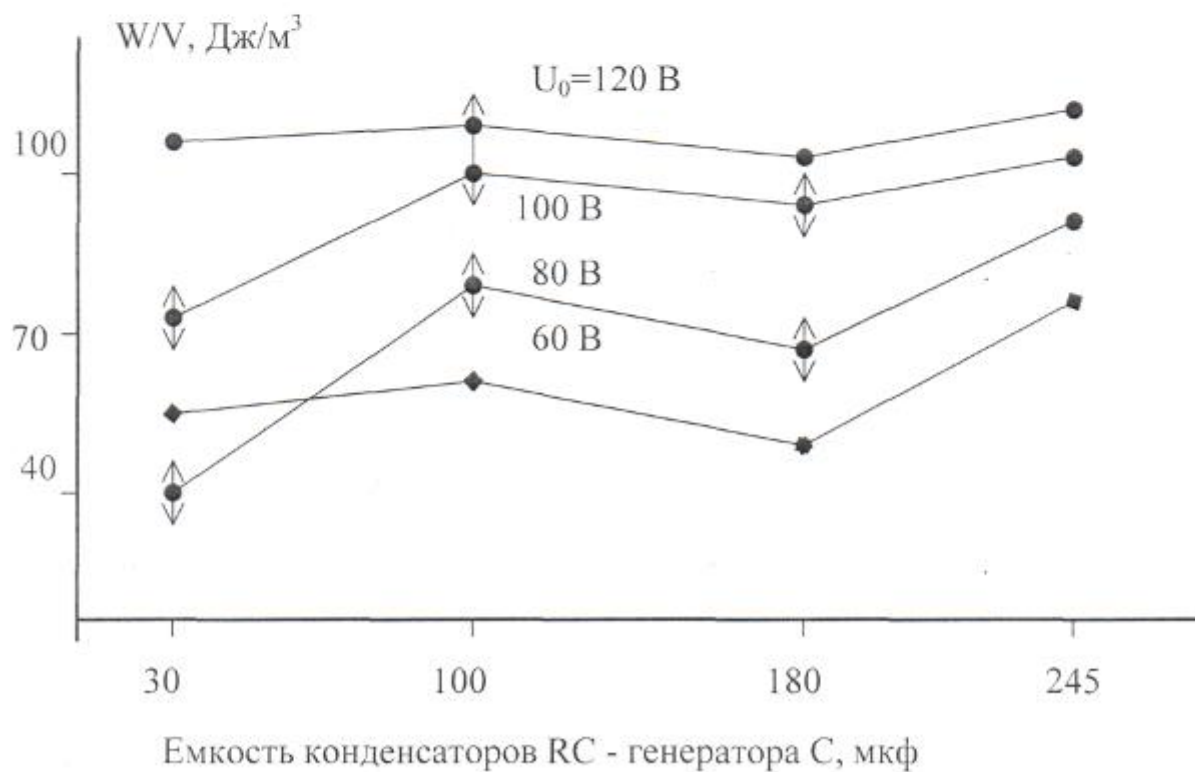


Рис.3.6. Зависимость энергоемкости образования лунки от энергии импульса.

Сталь 12Х18Н10Т.

объема, причем это критическое значение емкости уменьшается с уменьшением напряжения ЯС-генератора.

Энергоемкость образования лунки (отношение энергии импульса к объему лунки, рис.3.6) растет с увеличением напряжения холостого хода. Это обусловлено тем, что при одинаковых значениях энергии импульса увеличение напряжения компенсируется существенным уменьшением емкости, вследствие чего уменьшается длительность импульса тока. Как известно /4/, при меньших длительностях импульса увеличивается доля материала, удаляемого в паровой Фазе. Общеизвестно, что испарение металла более энергоемкий процесс чем его плавление.

Зависимость объема лунки и энергоемкости от параметров КС-генератора для меди с некоторым допущением повторяют зависимость, полученную для стали. В количественном отношении лунки на меди по объему на 50-70 % больше чем на стали при одинаковых энергетических параметрах импульса /59/. Как видно из профилограмм (рис.3.7), меньшая величина объема лунки объясняется меньшей глубиной эрозионного следа, которая в конечном итоге зависит от эрозионной обрабатываемости материалов.

Отношение диаметра лунки к глубине меняется в зависимости от энергетических параметров импульса. Например, как видно из рис.3.7, лунки, полученные при режимах 60 В, 245 мкФ (11); 80 В, 245 мкФ (12) и 60 В, 180 мкФ (13) отличаются по величине отношения диаметра к глубине- Если это отношение уменьшается, то этот режим будет более производительным, вместе с тем чистота поверхности ухудшается.

Как показали исследования, диаметры лунок на поверхности меди и стали, образованных при одинаковых значениях энергии импульса отличаются не существенно, а глубина лунки на поверхности стали почти в два раза меньше, чем на поверхности меди. Экспериментально установлено что для прошивки отверстия одного и того же диаметра в стали потребуется

больше энергии импульса чем на меди. Следовательно, боковое расширение диаметра отверстия на толщину стенки ДО определяется в основном глубиной лунок от боковых разрядов (рис.3.4).

Решение задачи о теоретическом определении массы той части материала электрода, которая подвергается эрозии за время одного разряда для случая, когда явление теплопроводности не играет заметной роли из-за кратковременности разряда имеет вид [38];

$$m = \frac{1}{3\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{B} \int_0^{\tau} J^2 dt \right)^{\frac{3}{4}} n^{\frac{1}{4}} \rho, \quad (3.18)$$

где $B = \int_0^{\tau} j^2 dt$, $n = \frac{J^2 \tau}{(BF_0^2)}$

τ - время, за которое достигнута температура плавления, R_0 - величина поверхности элементарной лунки, ρ - плотность электрода, j - плотность тока. I - сила тока, T - длительность единичного разряда.

Эксперименты показывают, что величина эрозии действительно пропорциональна $I^2 T$ в пределах исследованных режимов электрического

разряда, что подтверждается поведением кривого производительности процесса прошивки отверстия на рис.3.8.

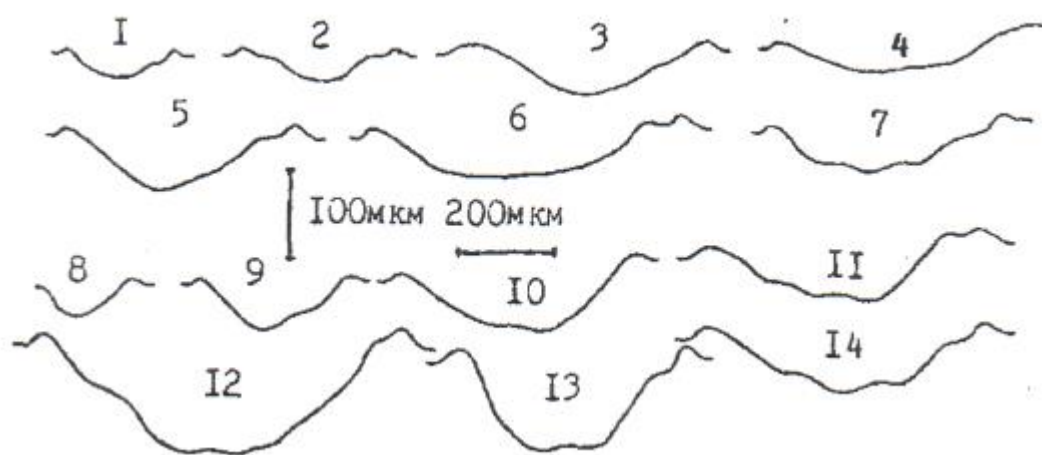


Рис.3.7. Профилограммы лунок, полученных на поверхности стали 12X18H10T (1-7) и меди (8-14).

Параметры электрического разряда:

1, 8-5 мкФ. 120В. 2, 9-30 мкФ.

120 в.

3, 10- 100 мкФ. 100В.

4, 11 - 245 мкФ. 60 В.

5, 12 - 245 мкФ, 80 В.

6, 13- 180 мкФ. 80В.

7, 14- 180мкф, 60В.

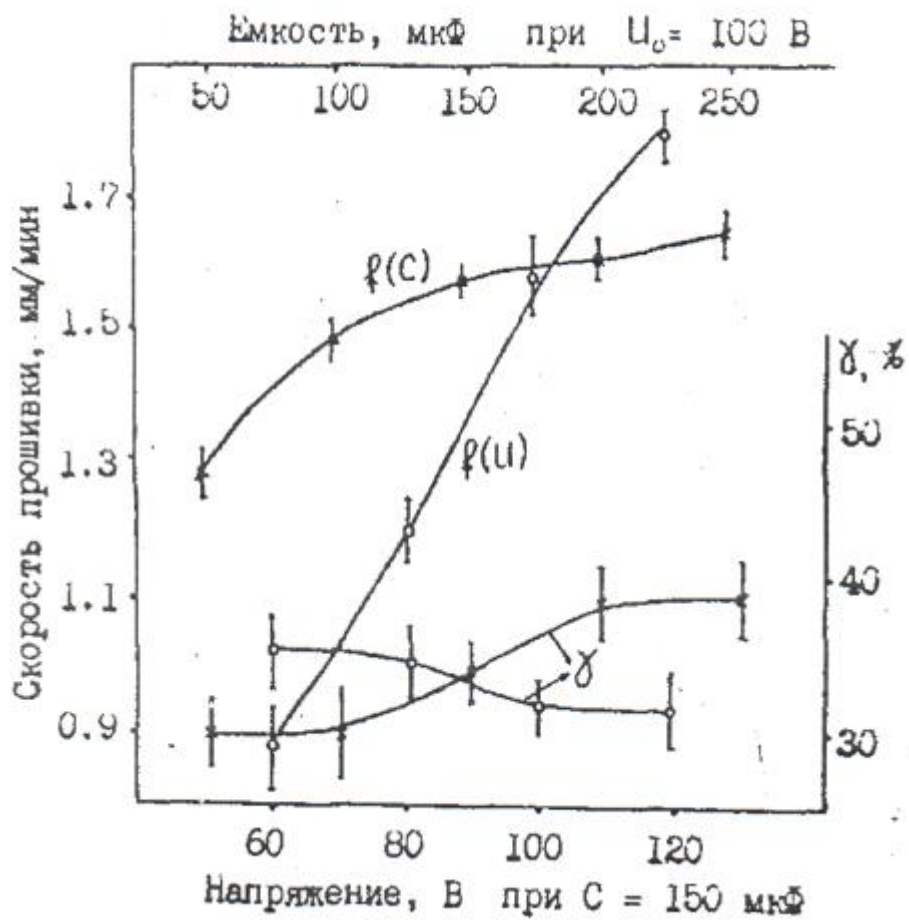


Рис.3.8. Зависимость скорости прошивки и износа стержня от напряжения и емкости при прошивке отверстия диаметром $\sim 2 \text{ мм}$ в меди вертикальным способом.

3.2. Модель поведения рабочей части составного ЭЙ в отверстии.

Как было показано в разд. 3.1. в процессе прошивки отверстий рабочая часть МС приобретает конусную форму. Как видно из рис. 3.4. электрические разряды проходят в основном на поверхности торцевой и конусной площади рабочей части стержня. Как известно /39/, при прохождении электрического разряда образуется газовый пузырь, заполненный продуктами разложения рабочей жидкости и металлического пара, испаренного с поверхности электродов. Давление на границе газового пузыря определяется выражением:

$$P(t) = P_0 + \frac{\rho}{2} \left(3 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + 2R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \right) \quad (3.19)$$

где P_0 - атмосферное давление, R - радиус и $\frac{\partial R}{\partial t}$ - скорость расширения газового пузыря, ρ — удельный вес жидкости.

Данные скоростной съемки процесса прохождения электрического разряда показывают /49/, что давление на границе газового пузыря в начальной стадии достигают 100 и более атм. Следовательно, при прохождении электрического разряда на площади конусной и торцевой части стержня будет действовать сила P , обусловленная избыточным давлением газового пузыря. Под действием силы P стержень будет претерпевать продольные и поперечные колебания.

Рассмотрим силу P , действующую на площадь конуса и направленную в сторону, противоположную силе тяжести P . Сила P создает изгибающий момент $M=P(l-x)$, где l -длина стержня. Исходя из теории сопротивления материалов /60/, с учетом малой величины прогиба, уравнение равновесия

$$EIy'' = F_u(l-x) \quad (3.20)$$

Ось y - направлена вверх, т.е. в сторону вогнутости.

принимает вид:

Интегрируя это уравнение один раз, получим:

$$y = \frac{F_n}{EI} x \left(l - \frac{x}{2} \right) + c \quad (3.21)$$

Так как при $x=0$, т.е. в точке закрепления касательная к оси стержня горизонтальна, следует, что $c=0$.

Интегрируя вторично и учитывая, что в точке закрепления ($x=0$) $y=0$, найдем:

$$y = \frac{F_n x^2}{2EI} \left(l - \frac{x}{3} \right) \quad (3.22)$$

Таким образом, прогиб конца стержня при $x=l$ под действием давления газового пузыря равна:

$$y = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (3.23)$$

Для круглого поперечного сечения стержня $I = \frac{\pi r^4}{4}$. Тогда для стержня составного ЭИ прогиб под действием давления газового пузыря получим выражение:

$$y = \frac{64Fl^3}{3\pi E d_{cm}^4} \quad (3.24)$$

Рассмотрим продольные колебания стержня под действием давления газового пузыря, возникаемого при прохождении электрического разряда на торце стержня. В этом случае сила действует в продольном направлении и создает продольное перемещение поперечных сечений стержня. Продольное перемещение точки x обозначим через u . Тогда поперечное сечение x переходит в $x-u$, а сечение $x-c$ переходит в $(x-c)-(u+c)$, или же в некоторый момент

времени длина c делается равной $c-u$, где производная

является

я

u

u

укорочением единицы длины стержня. Это укорочение вызывает

возникновение сужающего напряжения $\sigma = \frac{E \Delta l}{l}$, где E — модуль упругости. Сила, действующая на сечение x равна $F = \sigma S$.

действующая на правую часть элемента стержня (рис.3.10, б) равна $E\delta$ —, а
на

с/х

левую часть должна действовать $E\delta$ плюс еще некоторое приращение, вызванное δx , где δ — поперечное сечение. Это приращение равно $\frac{\partial}{\partial x} \left(ES \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right)$.

Тогда избыток силы, направленной в левую сторону будет равно $ES \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} dx$.

Обозначим через m массу стержня на единицу длины. Тогда по закону Ньютона имеем:

$$(gdx) \frac{\partial^2 \varepsilon}{dt^2} = ES \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} dx \quad (3.25)$$

$$g \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} \quad (3.25a)$$

Допустим, что стержень колеблется гармонически с некоторой частотой,

т.е.:

$$\varepsilon(x,t) = \varepsilon(x) \sin(\omega t) \quad (3.26)$$

Подставляя это значение в уравнение (3.25a), получим:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{g\omega^2}{ES} \varepsilon = 0 \quad (3.27)$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$\varepsilon(x) = c_1 \sin x \sqrt{\frac{g\omega^2}{ES}} + c_2 \cos x \sqrt{\frac{g\omega^2}{ES}} \quad (3.28)$$

Постоянные интегрирования могут быть определены следующим образом:

$\varepsilon(0) = 0$ при $x=0$, тогда $\varepsilon(0) = c_1 + c_2 = 0$, следовательно, $c_2 = -c_1$. При $x=l$ смещение свободного конца стержня возможно, но при этом не могут

возникнуть напряжения сжатия и растяжения. Таким образом, при $x=l$ $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$.

дх

Следовательно, если положить длину стержня равной $l = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{ES}{g\omega^2}}$, $l = \frac{3\pi}{2} \sqrt{\frac{ES}{g\omega^2}}$ и

т.д. длины волны, то удовлетворяется второе условие. При этом собственная частота колебаний стержня принимает значения:

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{ES}{g}}; \quad \omega_2 = \frac{3}{2} \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{ES}{g}}; \quad \omega_3 = \frac{5}{2} \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{ES}{g}}.$$

Стержень, изогнутый под действием какой-либо силы, имеет потенциальную энергию U . Из теории сопротивления материалов известно [60], что элемент стержня dx поглощает потенциальную энергию dU , которая определяется формулой:

$$dU = \frac{M^2}{2EI} dx \quad (3.29)$$

где M - изгибающий момент, для которого справедливо дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня:

$$EIy'' = P\pi(1-x) \quad (3.30)$$

Подставляя (3.30) в (3.29) и интегрируя находим полную потенциальную энергию стержня:

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx \quad (3.31)$$

Вычислим собственную частоту колебаний стержня составного ЭИ-Исходя из релеевской формы изогнутой оси стержня при условии, что кривая изогнутой оси горизонтальна при $x=0$ и не имеет кривизны у при $x=l$, Этим требованиям удовлетворяет четверть косинусоиды:

$$y = y_0 \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2l} \right) \quad (3.32)$$

Подставляя (3.32) в (3.31.) и интегрируя получим выражение для полной потенциальной энергии:

$$\begin{aligned} U &= \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx = \left[\frac{dy}{dx} = y_0 \frac{\pi}{2l} \sin \frac{\pi x}{2l} \frac{d^2 y}{dx^2} = y_0 \frac{\pi^3}{4l^2} \cos \frac{\pi x}{2l} \right] = \frac{EI}{2} \int_0^l \left(y_0 \frac{\pi^3}{4l^2} \cos \frac{\pi x}{2l} \right)^2 dx = \\ &= \frac{EI}{2} y_0^2 \frac{\pi^6}{16l^4} \int_0^l \cos^2 \frac{2\pi x}{2l} dx = EI y_0^2 \frac{\pi^6}{64l^4} \int_0^l \left(1 + \cos 2 \frac{\pi x}{2l} \right) dx = EI y_0^2 \frac{\pi^6}{64l^4} + \frac{l}{\pi} \frac{EI}{16} y_0^2 \frac{\pi^6}{l^4} \sin \frac{\pi x}{l} = \\ &= \frac{\pi^4}{64} \frac{EI}{l^3} y_0^2 \end{aligned}$$

$$U = \frac{\pi^4}{64} \frac{EI}{l^3} y_0^2$$

(3.33)

При рассмотрении колебания стержня, его кинетическая энергия $\frac{1}{2}T\dot{V}$ определяется суммой кинетических энергий отдельных элементов $\frac{1}{2}\rho c^2 \dot{x}(y_a)$ догда полная кинетическая энергия стержня определяется формулой:

$$T = \frac{1}{2} g \omega^2 \int_0^l y^2 dx \quad (3.34)$$

Подставляя сюда (3.32) и интегрируя получим:

$$T = \frac{1}{2} g \omega^2 \int_0^l y_0^2 \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2l}\right)^2 dx = \frac{1}{2} g \omega^2 y_0^2 \int_0^l \left(1 - 2 \cos \frac{\pi x}{2l} + \cos^2 \frac{\pi x}{2l}\right) dx = g \omega^2 y_0^2 l \left(\frac{3}{4} - \frac{2}{\pi}\right) \quad (3.35)$$

Приравнивая друг другу выражения (3.29) и (3.34) получим формулу для вычисления собственной частоты колебаний стержня :

$$\omega = \frac{\pi^2}{8 \sqrt{\frac{3}{4} - \frac{2}{\pi}}} \sqrt{\frac{EI}{gl^4}} \quad (3.36)$$

Учитывая, что $l = \text{пд.}^*_{\tau} / 64$ и ρl^3 есть вес стержня получим окончательную формулу для ω :

$$\omega = \frac{3,66}{8} d_{cm}^2 \sqrt{\frac{\pi E}{\rho l^3}} \quad (3.37)$$

Расчет частоты собственных колебаний стержня для стержня из вольфрама диаметром 1.0 мм и длины 0.2м дает $\omega = 1$ МГц. В то время частота прохождения электрических разрядов около 1 кГц. Видно, что прошивка отверстий проводится вдали от резонансных частот и колебания стержня определяются в основном факторами, возникающими при выделении электрической энергии КС-генератора. К ним относится например, давление газового пузыря, возникающего в межэлектродном промежутке.

4. Исследование воздействия электрического разряда на структуру поверхностного слоя обрабатываемого материала при прошивке глубоких отверстий.

При прохождении электрического разряда в жидкой диэлектрической среде образуется плазменный канал, состоящий из ионов и электронов, которые возникают в процессе ионизации атомов и молекул среды. При соударении высокоскоростных заряженных частиц с поверхностью электродов их кинетическая энергия в основном превращается в тепловую, в результате чего происходит испарение и расплавление металла в зоне взаимодействия. Большие градиент температуры, давление газов и паров металла приводят к существенным структурным изменениям поверхностного слоя электродов. Так как изготавливаемые протяженные каналы будут применяться при создании различных приборов и устройств, необходимо знать, какими же свойствами обладает поверхностный слой обрабатываемых деталей, изменение параметров кристаллической решетки, увеличение микротвердости и "загрязнение" поверхностного слоя обрабатываемой детали продуктами разложения или материалом МС ЭЙ, глубина измененного слоя определяют рекомендуемые области применения деталей, обработанных составным ЭЙ. Настоящая глава посвящена исследованию структурных изменений поверхности и Физико-химических свойств поверхностного слоя, образованного в условиях глубинной электроэрозионной прошивки отверстий.

4.1. Исследование шероховатости поверхности

Поверхность металлов, полученная ЭЭО представляет особый интерес

с точки зрения макро- и микрогеометрии. Как известно, каждый единичный импульс вырывает из поверхности обрабатываемого материала порцию его, по своей величине пропорциональную энергии импульса. Следовательно, качество поверхности изделия будет зависеть и от режима обработки, и от физико-химических свойств материала. Макро- и микронеровности на поверхности образуются в результате пересечения границ лунок, налипания частиц эрозии и деформации кристаллической структуры из-за термических напряжений. Высота неровностей в первую очередь зависит от энергии импульса и свойств обрабатываемого материала. Остальные Факторы (рабочая среда, материал ЭИ и т.д.) играют второстепенную роль. Как показало исследование единичных лунок, чем выше электроэрозионная обрабатываемость материала, тем большую высоту микронеровностей имеет его обработанная поверхность. Это объясняется меньшей величиной отношения диаметра лунки к глубине в менее эрозионноустойчивых материалах (рис.3.7).

Исследования шероховатости поверхности на профилометре - профилографе (модель 252) показали, что при энергиях импульсов 0.4-1.0 Дж среднее арифметическое отклонение профиля $K_{(1)}$ колеблется в пределах 6-15 мкм. При энергиях менее 0.1 Дж K_a не более 3 мкм. На профилограммах (рис.4.1) и в таблице 4.1 хорошо видно различие поверхностей, полученных при одинаковых параметрах зарядной цепи КС-генератора в обычной и дистиллированной воде. При обработке в дистиллированной воде шероховатость поверхности ухудшается. Это объясняется тем, что из-за

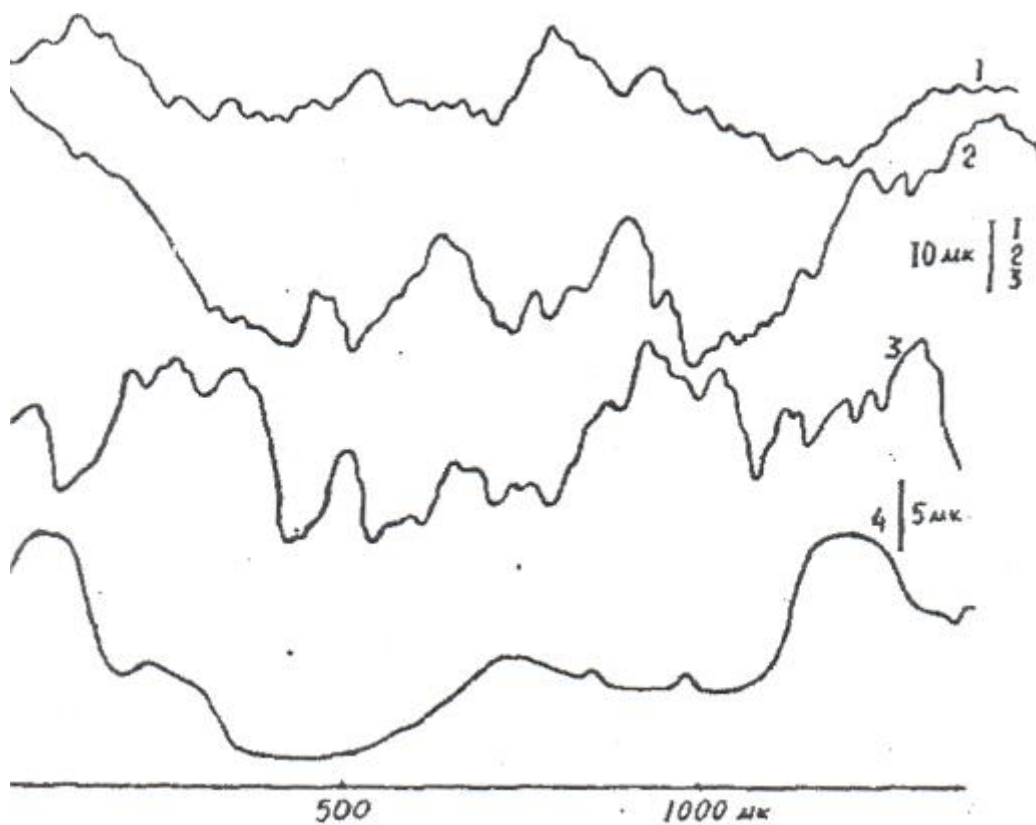


Рис.4.1. Профилограммы поверхности отверстий.

Режимы и условия обработки:

1. Медь: $U_0 = 100 \text{ В}$, $C = 100.0 \text{ мкФ}$, обычная вода
2. Медь: $U_0 = 100 \text{ В}$, $C = 247.0 \text{ мкФ}$, обычная вода
3. Медь: $U_0 = 100 \text{ В}$, $C = 100.0 \text{ мкф}$, дистил. Вода
4. Сталь $u_0 = 100 \text{ В}$, $C = 170.0 \text{ мкф}$, обычная вода
12X18H10T

отсутствия утечки в дистиллированной воде при одинаковых параметрах зарядной цепи проходят более мощные по концентрации энергии электрические разряды. Это обусловлено малым межэлектродным зазором, который затрудняет условия эвакуации расплавленного металла из лунки и в последующем из зоны обработки /35/.

Профиль шероховатости поверхности разделяется на две составляющие: систематическую K_r и случайную $/?$., /68,69/. Из природы образования неровностей следует, что выступы высотой K_r образуются в результате взаимного пересечения границ лунок, а выступы высотой K_y образуются застывшими микропорциями расплавленного металла. Размер K_r не будет постоянным, поскольку он зависит от радиуса r_n и глубины $/?$.,,,, лунки, а также от коэффициента перекрытия лунок. Величина $/?$., также определяется многими факторами: вязкости и смачиваемости расплавленного металла, параметров электрического разряда. Средняя высота систематической составляющей существенно больше средней высоты случайной составляющей профиля. Количество же выступов высотой K_r много меньше количества выступов $Y_{,,}$. $K_{\text{тах}}$ в основном определяется высотой K_r . При прошивке отверстий чистота поверхности оказывается обычно на один класс ниже, чем при шлифовании или резании перемещающимися электродами /39/. Это объясняется тем, что при прошивании микронеровности на торце ЭЙ, появившиеся во время обработки копируются на детали, ухудшая получаемую чистоту поверхности. В рассматриваемом случае вращательное движение МС или детали друг относительно друга приводит к тому, что микронеровности торца МС не копируются на поверхности обрабатываемой и последняя получается менее шероховатой. Наличие множества микронеровностей объясняется налипанием продуктов эрозии на поверхность обрабатываемой детали. По мере увеличения энергии импульса растет высота границы перекрытия лунок, что приводит к ухудшению чистоты поверхности. А наличие примесей в обычной воде

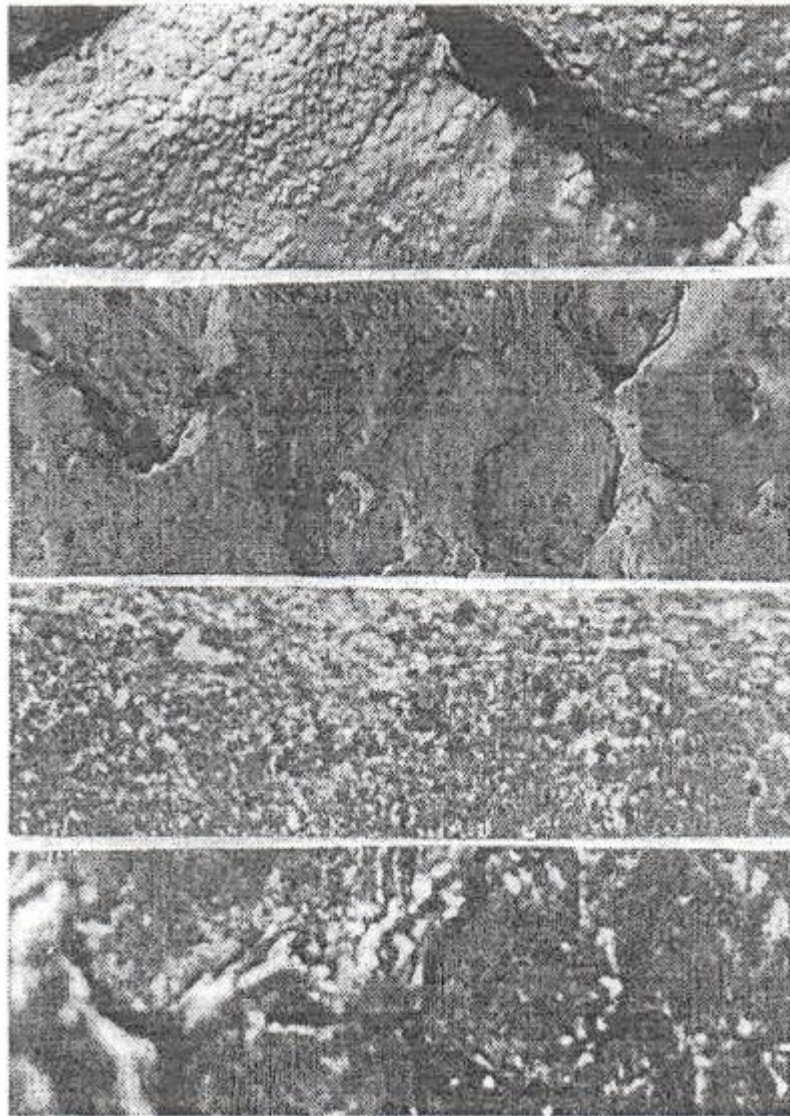


Рис.4.2. Фотоснимки поверхности отверстий в меди и стали 12Х18Н10Т.

Режимы обработки:

Увеличение:

- | | | | |
|------------------|-----------------------|--------------------------|----------------|
| <i>1.Медь:</i> | $U_0 = 80 \text{ В},$ | $C = 100.0 \text{ мкф.}$ | 10000^\times |
| <i>2. Медь:</i> | $U_0 = 60 \text{ В},$ | $C = 100.0 \text{ мкф.}$ | 10000^\times |
| <i>3.Медь:</i> | $U_0 = 60 \text{ В},$ | $C = 100.0 \text{ мкф}$ | 230^\times |
| <i>4. Сталь:</i> | $U_0 = 80 \text{ В},$ | $C = 100.0 \text{ мкф.}$ | 3300^\times |

способствуют электрохимическим процессам за длительное время обработки /70/, но существенного влияния на чистоту поверхности не оказывает.

Фотоснимки поверхности отверстий (рис.4.2) вместе с профилограммами (рис.4.1) дают довольно полное представление о неровностях, образованных в результате пересечения границ лунок и налипания продуктов эрозии. Микровыступы на фотоснимках и профилограммах идентичны.

На рис.4.2 видно, что на обработанной электроэрозией, поверхности меди имеются нагромождения неровностей с оплавленными участками. На рис.4.2, 1-2 отчетливо видны отдельные зерна, размеры которых составляет 4-6 мкм. По-видимому, большая концентрация примесей и газовых включений приводят эффективному вскипанию металла в области между зернами. Наличие множеств "пупырышек" на поверхности зерен вероятнее всего можно объяснить налипанием продуктов эрозии на поверхность меди в (не эвакуированный жидкий слой).

Геометрия поверхности меди и нержавеющей стали, обработанных электроэрозионным способом отличаются. Как видно на профилограммах (рис.4.1), случайная составляющая неровности поверхности стали, определяемая налипанием эродированных частиц, имеет плавные очертания и существенного влияния на чистоту поверхности не оказывает. Шероховатость поверхности определяется в основном высотой границы пересечения лунок.

В таблице 4.1 приведена зависимость изменения шероховатости поверхности отверстия от энергии импульса и рабочей жидкости. Следует заметить, что определяющим фактором чистоты поверхности являются энергетические параметры электрического импульса и диэлектрическая среда.

Таблица 4.1. Влияние энергии импульса и рабочей жидкости на шероховатость поверхности

<i>Обрабат. материал</i>	<i>ILB</i>	<i>C, мкф</i>	<i>Диапазон изменений K_a, мкм</i>	<i>Рабочая жидкость: Вода</i>
<i>Медь</i>	<i>100</i>	<i>100.0</i>	<i>5. 0-7. 0</i>	<i>дистиллированная</i>
	<i>100</i>	<i>150.0</i>	<i>7. 0-8. 0</i>	
	<i>100</i>	<i>200.0</i>	<i>7. 0-9. 0</i>	
	<i>100</i>	<i>245.0</i>	<i>8. 0-9. 0</i>	
	<i>100</i>	<i>100.0</i>	<i>4. 0-5. 0</i>	<i>обычная</i>
	<i>100</i>	<i>150.0</i>	<i>5. 0-6. 0</i>	
	<i>100</i>	<i>200.0</i>	<i>6. 0-7. 0</i>	
	<i>100</i>	<i>245.0</i>	<i>6. 0-7. 0</i>	
<i>Сталь 12X18H10T</i>	<i>100</i>	<i>100.0</i>	<i>5. 0-6. 0</i>	
	<i>100</i>	<i>200.0</i>	<i>5. 0-7. 0</i>	
	<i>120</i>	<i>150.0</i>	<i>6. 0-8. 0</i>	

Kд - среднее арифметическое отклонение профиля.

Ц) - напряжение холостого хода.

C - емкость конденсаторов ЯС-генератора.

Таким образом, шероховатость поверхности металла, обработанного электроэрозионным способом зависит от его физико-химических свойств, рабочей жидкости, энергии импульса и условий эвакуации продуктов эрозии. При обработке меди оказалось возможным изменение шероховатости поверхности K_a в пределах 2-9 мкм. При обработке вольфрама практически не представляется возможным получение поверхности без микротрещин, так как термические напряжения, возникающие при прохождении электрического разряда, превосходят предел текучести и прочности кристаллической решетки вольфрама.

Глубина микротрещин, изменение микротвердости, присутствие материала противэлектрода и рабочей жидкости в поверхностном слое образуют дефектный слой, исследованию которого посвящены следующие разделы.

4.2. Исследование дефектного слоя

При ЭЭО поверхностный слой обрабатываемой детали подвергается локализованному, кратковременному и весьма интенсивному термическому воздействию. Большая часть расплавленного металла и его паров удаляется из зоны разряда, но некоторая его часть остается в лунке. Из-за быстрого охлаждения рабочей жидкостью под высоким давлением газов и паров металла образуется поверхностный слой, по свойствам иногда сильно отличающийся от основного материала.

Этот слой, называемый дефектным, оказывает существенное влияние на эксплуатационные качества обрабатываемой детали. Например, если микротрещины в основном ухудшают качество обработанной поверхности, то уплотнение кристаллической решетки и "белый слой" улучшают износостойкость и коррозионную стойкость поверхностного слоя. В связи с этим необходимо исследовать дефектный слой для того, чтобы знать, какими же свойствами обладает поверхностный слой, • какая глубина микротрещин и измененной микротвердости, что в последующем позволит выработать технологические рекомендации по эксплуатации изделий, обработанных глубинной электроэрозией. Измерение микротвердости поверхностного слоя меди, нержавеющей стали показало, что этот слой неоднороден по твердости. Поведение кривых микротвердости на рис.4.3-4.5 можно объяснить следующим образом:

Как видно из рис.4.3 и 4.4. микротвердость поверхностного слоя меди, обработанной в обычной и дистиллированной воде, имеет неоднородное значение по глубине. Повышенная микротвердость близкого, к поверхности слоя объясняется уплотнением кристаллической решетки под высоким давлением, развиваемым в МЭП при прохождении электрического разряда.

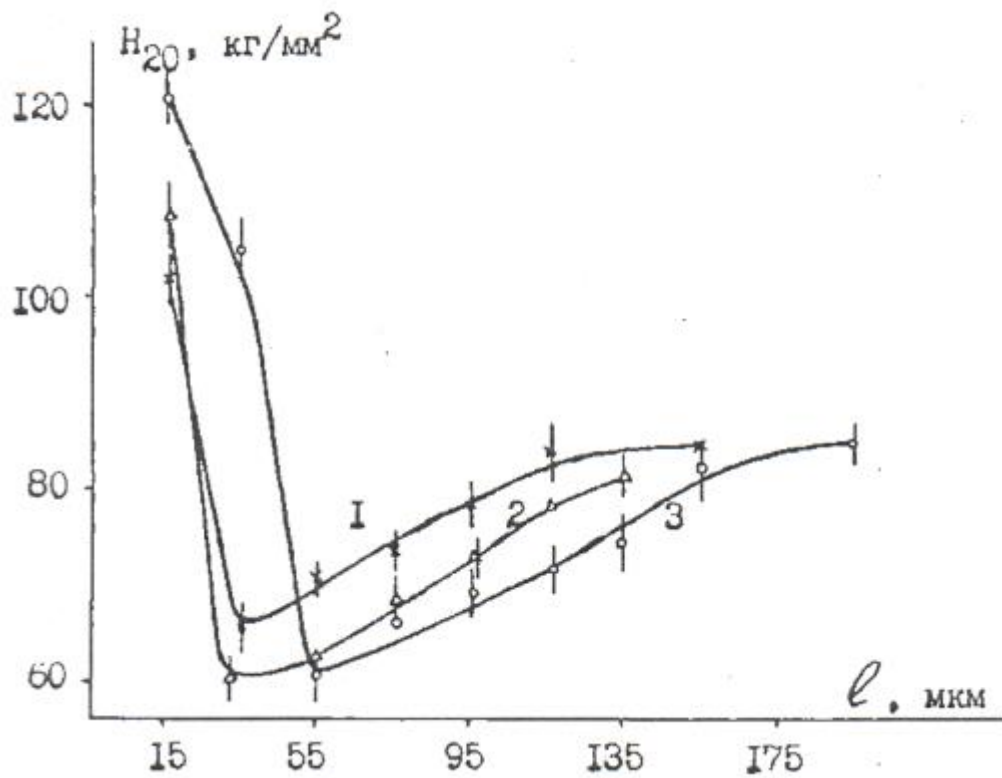


Рис.4.3. Зависимость изменения микротвердости поверхностного слоя меди от глубины после ЭЭО.

Режимы обработки: обычная вода, $C_0 = 100$ В.

1. $C = 100.0$ мкф.

2. $C = 200.0$ мкф.

3. $C = 247.0$ МКФ.

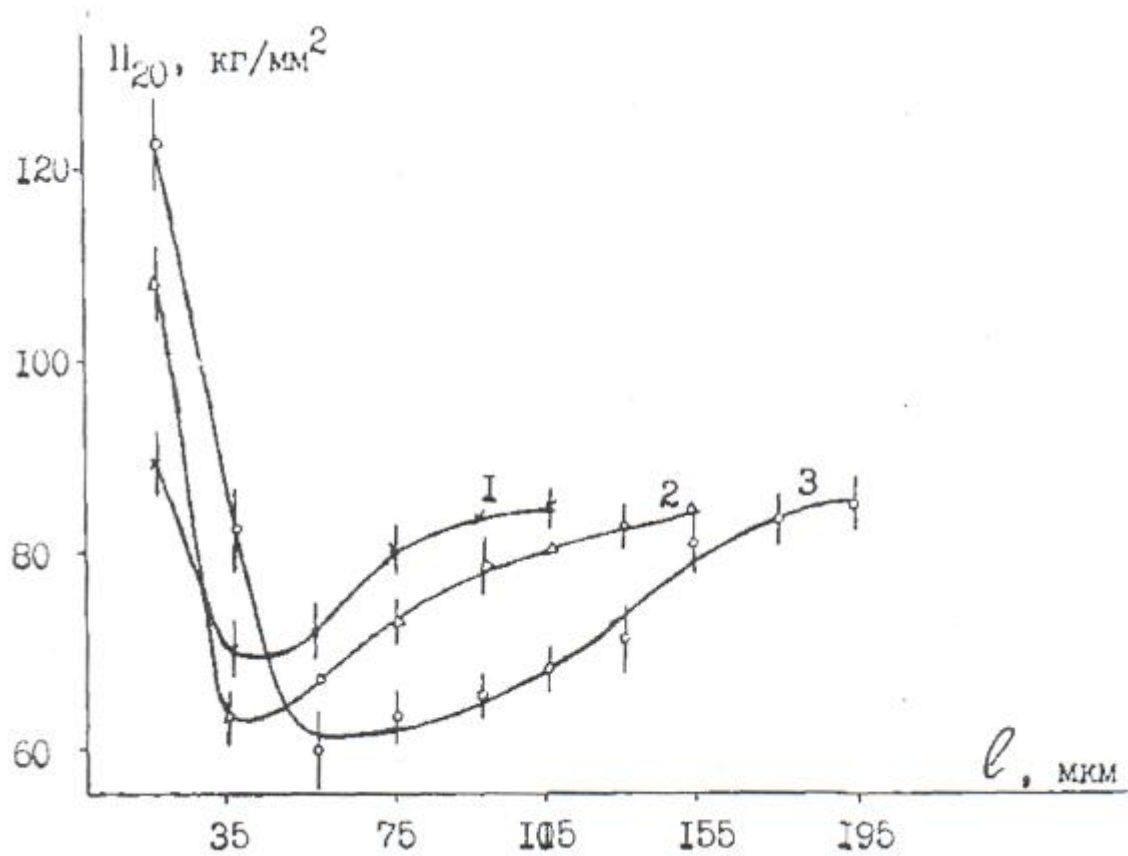


Рис.4.4. Зависимость изменения микротвердости поверхностного слоя меди от глубины после ЭЭО.

Режим обработки: дистилл. вода, $u_0 = 100 \text{ В}$.

1. $C = 100.0 \text{ мкФ}$. 2. $C = 200.0 \text{ мкФ}$. 3. $C =$

247.0 мкФ .

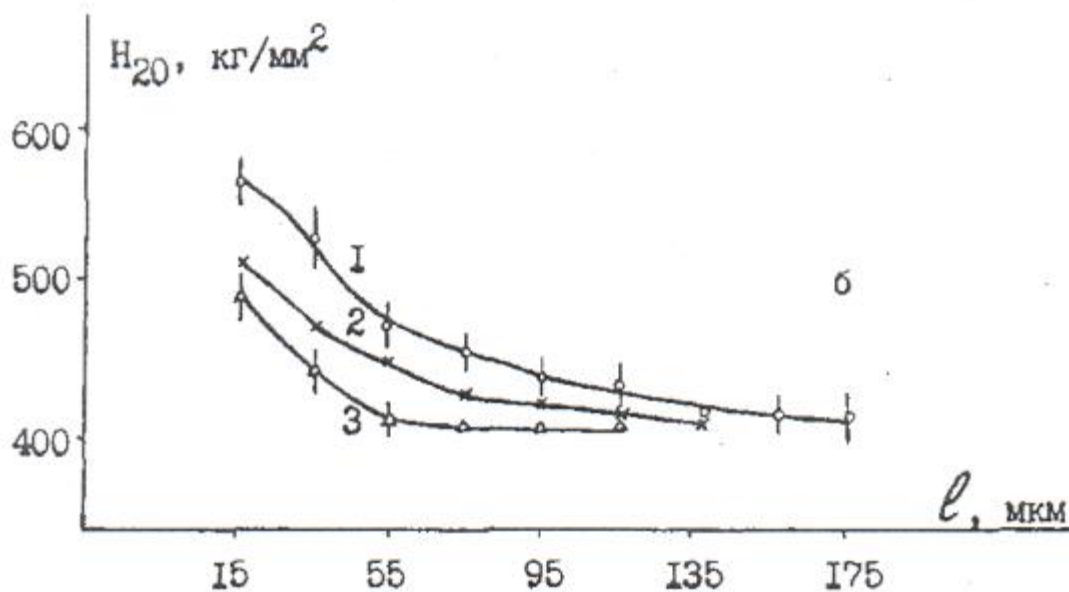
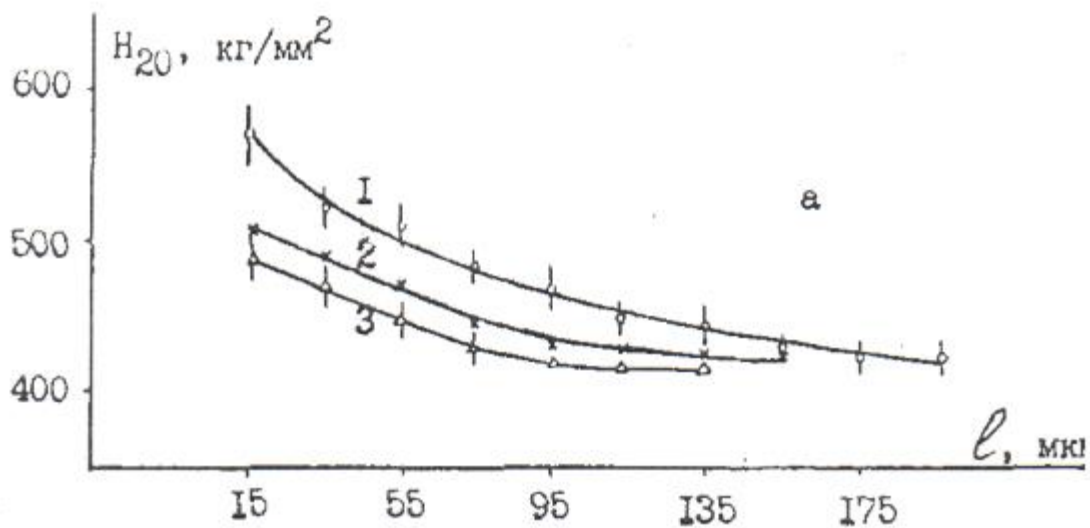


Рис. 4.5. Зависимость изменения микротвердости поверхностного слоя стали 12X18H10T от глубины после ЭЭО.

Режимы обработки: 1. Ц, =

120В, $C = 247.0$ мкФ. 2.

$u_0 = 100$ В, $C = 150.0$ мкФ.

3. $u_0 = 60$ В, $C = 100.0$ мкФ.

Диэлектрическая среда: а) обычная, б) дистилл. вода.

Ширина уплотненного слоя лежит в пределах 10-20 мкм. Далее следует слой, который имеет меньшую микротвердость, образование которого объясняется отжигом поверхностного слоя меди. Ширина отожженного слоя зависит от энергии импульса. Заметной разницы в поведении кривых микротвердости после обработки в дистиллированной и обычной воде не наблюдается.

В стали происходит закалка поверхностного слоя (рис.4.5). Если ее структура до обработки состояла из крупных аустенитных зерен то после обработки в лунке остается неэвакуированный слой оплавленного металла, обладающий дендритной структурой, мелких и хаотично ориентированных /50/. На поверхности микротрещины не наблюдаются. Следовательно, нержавеющая сталь 12X18H10T относится к числу стойких к трещинообразованию сталей. Поверхностный слой, имеющий высокую твердость, имеет структуру, не травящуюся в обычных условиях. Этот слой обладает повышенной износостойкостью и коррозионной стойкостью. При образовании "белого слоя" основную роль играют закалочные и диффузионные процессы. Рентгеноструктурный микроанализ показал присутствие материала МС - вольфрама в поверхностном слое нержавеющей стали. Микротвердость и ширина слоя повышенной твердости увеличиваются при применении более мощных импульсов. Это объясняется более высокой температурой, развиваемой в зоне обработки, которая обуславливает большой градиент температуры и высокое давление.

Размеры поверхностного слоя с измененной структурой можно оценить исходя из предположений о характере теплового воздействия на материал. В рассматриваемом случае вполне допустимо использовать приближение мгновенного точечного источника, для которого температура внутри материала выражается следующим образом /16/:

$$T = \frac{W_u}{c\rho(4\pi at)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right), \quad (4.1)$$

где c , ρ , a - соответственно теплоемкость, плотность, температуропроводность материала, K - глубина, t - время, W_u - энергия импульса.

Зная теплофизические константы материала, энергию импульсов и температуру, соответствующую структурным изменениям в данном материале можно определить размеры измененного слоя K :

$$R = \left(-4a\tau_u \ln \frac{c\rho T(4\pi a\tau_u)^{\frac{3}{2}}}{W_u} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.2)$$

Здесь τ_u - длительность импульса. Для диапазона, энергий $W_u = 0.1-1$ Дж и длительностей импульсов $\tau_u = 30-100$ мкс, величина K лежит в пределах:

K - 60 - 300 мкм для меди; K -

75 - 150 мкм для стали;

Как видно, теоретические расчеты согласуются с экспериментальными данными.

При эксплуатации изделий, обработанных электроэрозионным способом необходимо учитывать присутствие дефектного слоя. Повышенная микротвердость поверхностного слоя делает его более устойчивым к физико-химическим воздействиям. Вместе с этим микротрещина, искажения кристаллической решетки, остаточные внутренние напряжения в основном отрицательно влияют на эксплуатационные свойства изделий. Химическое "загрязнение" поверхностного слоя детали элементами ЭИ и рабочей жидкости, за исключением легирования, является побочным эффектом.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований процесса электроэрозионной прошивки отверстий составным ЭЙ, структурных изменений поверхности и физико-химических свойств поверхностного слоя обработанных деталей и режимов технологического процесса можно сделать следующие выводы:

1. Разработана конструкция электроэрозионной приставки к металлорежущим станкам, для прошивки отверстий различного диаметра в любых токопроводящих материалах.

2. На основании анализа способов электроэрозионной прошивки глубоких отверстий установлено, что с уменьшением диаметра прошиваемого отверстия усложняется технология и оборудование для изготовления традиционного инструмента - трубчатого электрода. Из-за гибкости трубчатый ЭЙ не отвечает требованиям прошивки прецизионных отверстий. Составной же ЭЙ уступая трубчатому по производительности из-за отсутствия мощных генераторов импульсов и высокоточных станков, обладает следующими преимуществами - простота в изготовлении и удобство в эксплуатации, точность прошиваемых отверстий, десятикратно меньшее давление рабочей жидкости и т.д. Промышленная реализация составного ЭЙ требует проведения комплекса исследований его особенностей.

3. Практически доказано, что применение составного ЭЙ

позволяет

прошивать отверстия малого диаметра (4.0-0.4 мм) большой глубины,

отношение глубины к диаметру в зависимости от диаметра отверстия и

материала обрабатываемого изделия составляет 100-200 и более.

4. Глубокие отверстия малого диаметра с помощью составного ЭИ могут быть изготовлены при наличии эксцентриситета стержня относительно оси прошиваемого отверстия, что достигается или под действием силы тяжести (деталь и ЭИ расположены горизонтально) или из-за центробежной силы, возникающей вследствие вращения металлического стержня.

5. Экспериментально доказано, что при применении составного ЭИ

качество поверхности прошиваемых отверстий и скорость прошивки не зависят от глубины, что объясняется устойчивостью процесса эрозии после захода диэлектрической оболочки в отверстие. После захода в отверстие диэлектрическая оболочка исключает эффект боковой эрозии практически на всю длину стержня за исключением рабочей части, а также будет выполнять роль подвижного люнета, тем самым способствует самоцентрировке составного ЭИ в отверстии.

6. Отклонение отверстия от оси зависит от класса точности элек
троэрозионной приставки, а изменение диаметра отверстия по
глубине
зависит от равномерности компенсации износа стержня, т.е. от
величины
рабочей части стержня.

7. Отработка режимов технологического процесса прошивки
отверстий
различных диаметров показала, что, изменяя величину длительности и
энергии импульса можно управлять производительностью
обработки,
шероховатостью поверхности и структурными изменениями
поверхностного
слоя. Шероховатость поверхности изменяется в пределах $Ra_{20} - Ra_{1,25}$
в
зависимости от условий обработки, ширина слоя с измененной
твердостью
составляет 40-150 мкм.

Заключение. В результате проведенных исследований процесса
электроэрозионной прошивки отверстий составным ЭИ

в

электропроводящих материалах предложена конструкция электроэрозионной
приставки, разработана технология и исследованы режимы прошивки
отверстий различных диаметров, установлены закономерности влияния

энерговременных параметров электрического разряда на структурные изменения поверхности и физико-химические свойства поверхностного слоя, образования мелкодисперсных продуктов эрозии. Результаты исследований будут служить ориентиром для решения конкретной технологической задачи при промышленной реализации возможностей составного ЭИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко В.Р., Лазаренко Н.И. Физика искрового способа обработки металлов.; ЦБТИ Минэлектронпром СССР, 1946.-76 с.
2. Лазаренко В.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка металлов.
М.: Госэнергоиздат, 1950. - 120 с.
3. Золотых Б.Н. Физические основы электроискровой обработки металлов.-М.: Гостехиздат. 1953.-107с.
4. Золотых Б.Н. Основные вопросы качественной теории электроискровой обработки в жидкой диэлектрической среде //Проблемы электрической обработки материалов.- М.: АН СССР, 1962.- С. 5-44
5. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Дисс. на соис. уч. степ, докт. техн. наук.- М.:1968. 446с.
6. Зингерман А.С., Лившиц А.Л., Сосенко А.В. О физических факторах, определяющих производительность электроимпульсной обработки металлов // Электроимпульсный и электроконтактный способы обработки металлов.- М.: ОНТИ ЭНИМС, 1962. Вып.3.- С.55-61.
7. 7Л2ШТП Т. Елек1госН5спагзе тазЫлт^ МешПз. // 1арап Еп§. 8ос.- у.35. N 7. 1965.-pp. 68-72.
8. Лазаренко В.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов.- М.-Л.: Госанергоиздат, 1944.- 28с.
9. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров.- Л.: Машиностроение, 1977.-С. 5-127.
10. Кравец А.Т. Исследование технологического процесса электроимпульсной обработки фасонных полостей. Автореф. канд. дисс.-

М.:

Станкин. 1958.

*11. Лившиц А.Л. Электроэрозионная обработка металлов.- М.: Машигиз.-
1957.*

12. ХОЛОДНОЕ Е.В. Электроискровое изготовление отверстий малого диаметра // Электрофизические и электрохимические методы обработки. - М.:

НИИМаши. 1970.-ЫЗ. 18-22.

13. Бойко А.Ф. Высокочастотная электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра //Электронная обработка материалов.-1980.- N 1.- С. 86-88.

14. Мицкевич Н.К. Эйзнер В.А. О влиянии скорости орбитального движения электрода-инструмента на производительность процесса электроэрозионной обработки // Там же.- 1980.- N 2.- С. 12-16.

15. Фатеев Н.К. Влияние состояния межэлектродной среды на производительность электроискрового процесса, износ обрабатываемого электрода, чистоту получаемой поверхности и точность обработки //

Проблемы электрической обработки материалов.- м.:АН СССР. 1960.- С. 25-35.

16. Золотых В.Н. О расчете технологических характеристик процесса размерной электроискровой обработки токопроводящих материалов // Там же.-С, 221-232.

17. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов.-Машиностроение. 1989.- 168с.

18. Думне В.Э.. Зикунев И.А. Прошивка отверстий электроэрозионным способом при различном сочетании движений обрабатываемого электрода// Электронная обработка материалов. - 1969.N1.-С.9-12

19. ША Раген! 4.393.292.МКУ : В 23Р 1/08 / КлозЫ 1ноие. МеШос! о Г апс! аррагаШз йзг е!есйтса! сНзспагзе тазЫип§ а зтаП апё ёеер Бо!е т!о ог нтгои^Ъ а \уогкр!есе. .!ул. 12. 1983.

20. Клепиков Р. П., Алексеев Г. А. Скоростная электроэрозионная прошивка глубоких отверстий малого диаметра // Станки и инструмент. -

1989.-N9.-С. 42.

21. А.С. СССР N 1407711, Кл.В 23 Н 1/100, 9/14. Способ электроэрозионного прошивания глубоких отверстий / Абдукаримов Э.Т. Оубл. 07.07.1988. Бюл. N 25.

22. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления.- М.: Энергия, 1978.- 456С.

23. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электродинамическая теория искровой электрической эрозии металлов // Проблемы электрической обработки материалов.- М.: АН СССР. 1962. С. 44-51.

24. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л.Лившиц, А.Т. Кравец, Ц.С.Рогачев, А.Б.Сосенко.-М: Машиностроение, 1967.-295с

25. Зингерман А. С. О природе сил выбрасывающих металл при электрической эрозии // Электрические контакты,- М.: Энергия, 1964.- С. 75-87.

26. Запаш Н. МесБаишт ог" елесШсал сІІзспагђе тазЫнтџ.)арап 8ос. Ргез. Епџ.- Вул. У.1, М 2. МагсЪ 1965.-pp.95-101.

27. Лазаренко Б.Р. Электроискровая обработка материалов// В АН СССРВестник.- 1965.- N 1.- С- 30-36.

28. Воробьев А.А. О процессах разрушения тел при их бомбардировке с большой скоростью // Электронная обработка материалов.- 1969.- N 1.- С. 3-9.

29. Афанасьев Н.В., Капельян С.Н. Роль некоторых факторов в механизме электрической эрозии металлов // Там же Вестник.- 1969.- N 1,-С. 3-9.

30. Кучин З.Д. Об определении электроэрозионной устойчивости твердых тел //Там же.- 1969.- N 4.- С. 16-18.

31. Самсонов Г. В., Муха И.М. Анализ данных, по износу мате-риала, обрабатывающих электродов // Там же.- 1967.- N 3.- С.3-13.

32. Самсонов Г.В., Муха И.М. Закономерности, определяющие износ катода при электроискровой обработке металлов //Там же.-1967.- N 1.- С. 17.

33. Фатеев н.к. Технология электроэрозионной обработки//.- М.: Машиностроение. 1980.- 184с.

34. *Электрическая эрозия высоковольтных контактов и электродов*

/

Г.Р.Вуткевич, Г.С.Белкин, И.А.Ведешенков, М.А.Жаворонков. -М. : Энергия, 1978.-256с.

35. Гуткин В.Г., Лившиц Л.Л. *Электроимпульсная обработка материалов*
// *Электроразрядная обработка материалов.* - Л.: Машиностроение, 1971.- С. 121-196.
36. Золотых Б.Н., Гиоев К.Х., Тарасов Е.А. *О механизме электрической эрозии металлов в жидкой диэлектрической среде // Проблемы электрической обработки материалов.* - М.: АН СССР, 1962.-С. 58-64.
37. *Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов/* Б.А.Артамонов, Ю.С.Волков, В.И.Дрожалова, Ф.В.Седыкин, В.П.Смоленцев. В.М.Ямпольский - М.: Высшая школа, 1983.-Т. 1.-С. 4-95.
38. *Электроэрозионная обработка металлов /* М.К.Мицкевич, А.И.Вушик. И.А.Бакуто, В.А.Шилов. И.Г.Девойно - Минск: Наука и техника, 1988.- 147с.
39. Левинсон Е.М., Лев В.С. *Электроэрозионная обработка металлов // Электроразрядная обработка материалов.* - Л.: Машиностроение, 1971.- С. 3-21.
40. *Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки /* Г.Л.Амитан, И.А.Байсупов. Ю.М.Варон и др.: Под общ. ред. В.А.Волосатова.-Л.: Машиностроение, 1988. - 719с.
41. Фатеев Н.К. *Влияние режимов электроэрозионной обработки на характеристики микрогеометрии поверхностей сталей и сплавов //Электронная обработка материалов.* - 1975.-М 5.-С. 5-10.
42. Ставицкий Б.И. *К вопросу об электрической эрозии токо-проводящих материалов при искровых разрядах малой энергии и длительности // Там же.* - 1969.-N2.-С. 5-10.
43. Ставицкий В.И. *Об электрической эрозии низкоомных полу проводниковых материалов при малых энергиях и длительностях искрового*

разряда // Там же, - 1969. - N 4. - С.

*44. Золотых Б.Н. Связь чистоты поверхности после
электроискровой
обработки с параметрами единичных лунок // Вестник
машиностроения. -
1959. - N 10. - С. 16-19.*

45. Левинсон Е.М., Лев В.С. Справочное пособие по электротехнологии. -

Л.: Лениздат, 1972.- С. 102-120.

46. Авраменко В.Е. Фазовый анализ поверхностного слоя инструментальных сталей, образованного электроискровой обработкой непрофилированным электродом // Физико-механические и эксплуатационные свойства инструментальных сталей и конструкционных материалов.-Красноярск.-Вып.3.- 1974.

47. Александров В.П. Исследование технологических характеристик электроэрозионной обработки жаропрочных материалов.- М.:Наука, 1964-123с.

48. Геллер Ю.А. Инструментальные стали.- М.: Металлургия, 1975.-584С.

49. Красюк Б.А. Выявление строения протравливаемых поверхностных слоев на образцах железных сплавов // Заводская лаборатория.- 1956.- т.22^5.-С. 556-558.

50. Могилевский И.З., Чаповая С.А. Металлографические исследования поверхности стали после электроискровой обработки // Электроискровая обработка металлов.- М.: АН СССР, 1957.-Вып.1, С. 95-116.

51. Палатник Л.С., Левченко А.А., Косевич В.М. Изучение дефектов, возникающих при искровых разрядах кристаллического строения в чистых металлах // Электроискровая обработка металлов.- М.-. АН СССР, 1963.- С. 104-112.

52. Халдеев В.Н. Особенности переноса материала электрода-инструмента на поверхность детали в процессе размерной электроэрозионной обработки при наличии вращательных движений обоих электродов // Электронная обработка материалов.-1988.-N1.-С.7-9.

53. Колачев Б.А. Основы физики металлов. Электронное строение металлов.- М-: Машиностроение. 1974.- 153с.

54. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей.-М.

Наука,

1970.-227с.

55. Петран Л.В. Закалочные среды.- М.: Машиностроение. 1959.- 139С.

56. Крагельский И.В., Добыгин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ.- М.: Машиностроение, 1977.- 525с.

57. Абдукаримов Э.Т., Краков Б.Г., Саидинов С.Я. Прошивка отверстий составным электродом-инструментом // Электронная обработка материалов.-

1990.-№3.-С.

58. Некрашевич И.Г., Мицкевич М.К., Бакуто И.А. Исследование процесса электрической эрозии металлов // Сб. науч. труд. ФТИ АН БССР.-

МИНСК: 1955.-ВЫП.2.-С. 177-190.

59. Палатник Л.С. Полярность обработки процесса электрической обработки материалов // Изв. АН СССР. Сер. Физическая, Т.ХУ .-- N 4.- 1951 .

60. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов.-М. •- Науке, 1986.-С. 285-287.

61. Ставицкая Н.Б. Изучение эрозионных лунок при электро-искровой обработке материалов электродом-проволокой // Электронная обработка материалов.- 1980.- N 6.- С. 5-8.

62. Воздействие электрического разряда на поверхность твердого тела в различных средах / Абдукаримов Э. Т., Нагайбеков Р.Б., Краков Б.Г., Саидинов С. Я., Рустамов Р. М., Рахматуллаев М. Р. / Взаимодействие корпускулярных потоков с поверхностью твердого тела.-Ташкент: Фан, 1991.

63. Ставицкая Н.В., Ставицкий В.И. Исследование Форм и размеров лунок, образованных на различных материалах искровыми разрядами // Электронная обработка материалов,- 1980.- N 1.-С.9-13.

64. Абдукаримов Э.Т., Саидинов С.Я. Прошивка сверхглубоких отверстий малого диаметра электроэрозионным способом // Электронная обработка материалов,- 1989.-Ы 1.- С. 5-8.

65. Абдукаримов Э.Т., Саидинов С.Я. Особенности электроискровой

прошивки глубоких отверстий малого диаметра в меди, нерж. стали и

вольфраме // Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки. Тезис доклада Всесоюзной научно-технической конференции М.: МВТУ. 1988.-Часть 1.-С. 135.

66. Золотых В.П., Любченко Б.М. Инженерные методы расчета техно-

логических параметров электроэрозионной обработки. -
М.Машиностроение. 1981.-52с.

67. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. -Киев: Наукова думка.-1972.-С.11.

68. Фатеев Н.К. Расчет характеристик шероховатости поверхности, обра

ботанной электроэрозионным способом // Электронная обработка материалов.

-1977.-N5.-С. 22-24.

69. Фатеев Н.К. Особенности поверхностей, обработанных

электроэрозионным способом // Там же.- 1979.- N 6,- С. 5-8.

70. Кравченко В.Л. Прецизионная электроэрозионная обработка токопроводящих материалов в воде // Там же.- 1984.-К 2.-С.23-29.

71. Влияние электроискровых импульсов на структуру монокристаллов вольфрама / С.А.Алешина. Хвостикова В.Д.. В.Н.Золотых. А.И.Марчук / Монокристаллы тугоплавких и редких металлов, сплавов и соединений. - М.: Наука, 1977.-С.280-184.

72. Изменение плотности дислокации монокристаллов вольфрама после электроэрозионной обработки / С.А.Алешина, В.Д.Хвостикова. Б.Н.Золотых. А.И.Марчук/Там же.-С. 185-188.

73. Абдукаримов Э.Т., Рустамов Р.М.. Саудинов С.Я. Исследование дефектного слоя высокочистого монокристаллического вольфрама. // Получение, структура, физические свойства и применение высокочистых и монокристаллических тугоплавких и редких металлов. Тезис доклада XIII Всесоюзного совещания. - Суздаль: АН СССР, 1990.- С.

74. Лариков Л.Н., Исайчев В. И., Максименко Е.А. Залечивание микрополостей в монокристаллах молибдена после деформации и отжига.

//

Редкие металлы и сплавы с монокристаллической структурой. - М.: Наука,

1981.-С. 264-268.

75. .В.С.Коваленко, А.Д.Верхотуров, Л.Ф.Головко, И.А.Подчерняева.
Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов/ М.: Наука. 1986.

76. Фатеев Н.К., Капырин А.А. Перенос материала электрода инструмента на поверхность детали в процессе размерной ЭЭО //

Электронная обработка материалов.- 1986.-. N 2.- С. 23-25.

77. Могилевский И.З. Структурные изменения в железе и стали после электроискровой обработки их поверхности графитом // Проблемы

электрической обработки материалов.- М. АП СССР. 1960.-С. 86.

78. Абдукаримов Э.Т., Саидинов С.Я. Рентгеноструктурный микроанализ поверхностного слоя меди и нержавеющей стали после электроэрозионной обработки// Электронная обработка материалов.- 1989.-N 6.-С. 8-10.

79. Головейко А.Г. Диспергирование металлов при импульсном разряде в жидком диэлектрике // Физические основы электроискровой обработки материалов,- М.: Наука. 1966.- С. 74-85.

80. Намитоков К.К. Об агрегатном состоянии, составе и строении продуктов эрозии металлов // Там же.- 1966.- С. 86-108.

81. Шиммель Г. Методика электронной микроскопии.-М.: Мир. 1972.- С. 161-167.

82. А.с. СССР N 1 514 534 МКИ В 23 Р 1/00. Способ электроэрозионного прошивания глубоких отверстий / Абдукаримов Э.Т., Ветчинкин П.М., Саидов М.С. Оpubл. 15.10.1989-Бюл. N 38.

83. Патент США N 4 721 838 Кл. 219/69E. 219/69M. Электрод инструмент для электроэрозионной прошивки отверстий в деталях и способы прошивки данным электродом-инструментом / Абдукаримов Э.Т., Ветчинкин П.М. Саидов М.С. Оpubл. 26.01.1983.

84. Каримов И.А. Узбекистан на пороге 21 века - угрозы безопасности, условия гарантии и прогресса. Ташкент 1997.

85. Каримов И.А *Наша высшая цель независимость процветания Родины, свобода и благополучие народа. Ташкент 2000.*

86. Закон Республики Узбекистан «О национальной программе по подготовке кадров» Ташкент 1997.

Перечень условных обозначений.

ЭЙ - электрод-инструмент

СЭИ - составной электрод-инструмент

ЭЭО - электроэрозионная обработка

МЭЗ - межэлектродный зазор

МЭП - межэлектродный промежуток

МС - металлический стержень

РЖ - рабочая жидкость

ДСПЭ - дисперсный состав продуктов эрозии

ПАВ - поверхностно-активные вещества

ДО - диэлектрическая оболочка

Формат	<i>l</i>	Обозначение	Наименование	<i>l</i>	Примечание
			Документация		
A1			Сборочный чертеж		
			Детали		
A3	1		Скалка	1	
A4	2		Винт	1	
A2	3		Ползун	1	
A4	4		Гайка	1	
A2	5		Гильза	1	
A3	6		Фланец	1	
A3	7		Втулка	1	
A3	8		Муфта	1	
A4	9		Штуцер	1	
A3	10		Втулка	1	
A4	11		Гайка	1	
A4	12		Муфта	1	
A4	13		Втулка	2	
A4	14		Указатель	1	
A3	15		Втулка	1	
A4	16		Щеткодержатель	2	
A4	17		Колпачок	2	
A4	18		Пружина	2	
A3	19		Шпиндель	1	
A4	20		Полумуфта	1	
A4	21		Полумуфта	1	
A3	22		Втулка	1	
A4	23		Шайба	1	
A4	24		Патрон	1	
A4	25		Скоба	1	
A4	26		Штуцер	1	
A4	27		Шпонка	1	
A3	28		Стакан	1	
A4	29		Прокладка	1	
Магистерская диссертация.					
Изм	Лист	№докум	Подп	Дата	
Разработ.	Каримов Ш.				Электроэрозионная приставка
Провер.	Абдукаримов				
					Лит.
					Лист
					Листов
					1
					3

	1	Обозначение	Наименование	1	Примечание
A3	30		Камера	1	
A4	31		Контргайка	1	
A4	32		Втулка	1	
A4\	33		Фланец	1	
A4	34		Шпонка	1	
A4	35		Прокладка	1	
A4	36		Втулка	1	
			Стандартные изделия		
	39		Болт М6х16		
			ГОСТ 7798-70	4	
	40		Винт М3х6		
			ГОСТ 1476-84	6	
			Винты ГОСТ 1491-80		
	41		2М3х6	1	
	42		2М4х12	8	
	43		2М4х16	1	
	44		2М5х16	6	
	45		Винт 2М5х6		
			ГОСТ 17475-80	6	
	46		Винт М3х8		12Х18Н10Т
			ГОСТ 1477-84	2	
/	47		Гайка М12х1,25-Н7		
			ГОСТ 1187 1-88	2	
	48		Шайба 4.05.02		
			ГОСТ 11371-78	1	
			Шайбы ГОСТ 6402-70		
	49		4.65 Г 049	8	
	50		5.65 Г 049	4	
	51		6.65 Г 049	4	
	52		Шайба 12.06.049		
			ГОСТ 11872-80	2	
	53		Подшипник 8102		
			ГОСТ 6874-75	2	
	54		Подшипник 60200		
			ГОСТ 7242-81	2	
Магистерская диссертация.					Лист
					2
Изм	Лит	№докум	Подп	Дата	

