

Б.И. Ставицкий

ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ПРЕЦИЗИОННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОСОБО ТОЧНЫХ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Федеральное государственное унитарное предприятие НПП «Исток»,
ул. Вокзальная, 2, г. Фрязино, 141120, Московская область, Россия*

Вместо предисловия

Настало время для достаточно подробного анализа пути развития одного из выдающихся открытий XX столетия советскими учеными Б.Р. и Н.И. Лазаренко – электроискровой обработки материалов и наиболее перспективного ее направления – прецизионной обработки материалов высококонцентрированными электрическими искровыми разрядами малой энергии микросекундного диапазона длительностей, обеспечивающих изготовление деталей с микронной точностью, высоким качеством обработанной поверхности и минимальными экономическими затратами.

Вашему вниманию предлагается серия статей, в которых описывается история появления в середине прошлого столетия электроискровой прецизионной обработки материалов в электронной и в смежных отраслях промышленности СССР, этапы и перспективы ее развития, научные основы, методы формообразования поверхностей, технологические процессы и оборудование, которые позволили: создать электровакуумные СВЧ приборы миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн, не имеющие аналогов за рубежом; решить проблему изготовления прецизионных деталей других электронных приборов – сеток клистронов для радиорелейных линий связи, специальных приемно-усилительных ламп (ПУЛ), тетродов; анодных блоков магнетронов и амплитронов; замедляющих систем ламп обратной волны (ЛОВ); пролетных каналов многолучевых СВЧ приборов (МЛП) – клистронов и ЛОВ; металлосплавных и других катодов; акустических линий задержки и усилителей пленочных твердотельных приборов; активных элементов полупроводниковых приборов; подогревателей; деталей широкополосных малошумящих усилителей; дефлекторов и электронных оптических систем видеоконвекторов и многих других деталей приборов (например, прямопролетных масс-спектрометров для исследования состава верхних слоев атмосферы); расширить область применения разработанных процессов и прецизионного оборудования на основные и инструментальные производства смежных отраслей промышленности.

В предлагаемой серии статей обобщены результаты работ, выполненных в области электроискровой прецизионной обработки материалов начиная с 1954 г. по настоящее время. В них последовательно будут рассмотрены:

1. Научные основы особо точных методов электроискрового формообразования поверхностей деталей из любых токопроводящих и полупроводниковых материалов с заданными точностью (до единиц микрометров) и качеством обработанных поверхностей (шероховатостью обработанной поверхности R_a до десятых долей микрометра).

2. Новые методы особо точного формообразования поверхностей электроискровым способом, которые, во-первых, исключают влияние износа электрода-инструмента на точность изготовления деталей и создают нормальные, естественные условия эвакуации продуктов обработки из межэлектродного промежутка за счет уменьшения пути, преодолеваемого их частицами, уменьшения зоны взаимодействия электродов (инструмента и обрабатываемой детали), а также сохранения этих условий по мере внедрения электрода-инструмента в обрабатываемую деталь.

3. Способы обработки в обычной воде (или других межэлектродных средах, обладающих электропроводимостью) микросекундными биполярными импульсами напряжения, которые включают: электрохимическое растравливание обрабатываемых поверхностей, притупление кромок, образование на обрабатываемых поверхностях следов твердых продуктов разложения среды, которые неизбежно образуются при использовании углеводородных жидкостей.

4. Анализ условий формирования микросекундных биполярных импульсов напряжения генераторами импульсов с индуктивными формирователями или импульсными трансформаторами.

5. Технологические процессы электроискрового изготовления деталей электронных СВЧ приборов (клистронов, магнетронов и амплитронов, ЛОВ сантиметрового, миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн и др.) для летательных аппаратов, радиолокационных станций, линий связи наземных и космических объектов, индивидуальных носимых приемно-передающих систем связи, измерительной аппаратуры, **а также сложнопрофильного инструмента** (штампов, дюз для экструзии различных материалов, микроклеим, режущего инструмента и др.), обеспечивающие наиболее эффективное их изготовление.

6. Базовые конструкции электроискровых комплексов с системами ЧПУ со встроенными ЭВМ, обеспечивающие автоматическое изготовление деталей электродом-проволокой диаметром от 0,006 до 0,3 мм; основные требования к конструкциям их функциональных основных устройств и рекомендации по их применению.

7. Перспективы применения электроискровой прецизионной обработки материалов в ближайшем будущем.

Научные основы особо точных методов электроискрового формообразования поверхностей деталей

1.1 Предпосылки к началу исследования возможности применения электроискровой обработки материалов, предназначенной для изготовления особо точных деталей электронных приборов

В начале 50-х годов в связи с разработкой новых электровакуумных приборов, прежде всего приборов миллиметрового диапазона волн, появилась необходимость в изготовлении целого ряда небольших и ажурных деталей с высокой точностью (до 0,002 мм): медных, никелевых, молибденовых, вольфрамовых и других сеток различных приборов, медных и молибденовых замедляющих систем ламп обратной волны, анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона волн, катодов из вольфрама, молибдена, борида лантана и т.п. [1, 2].

Отдельным металлическим деталям и узлам этих приборов приходилось работать в тяжелых условиях: при больших знакопеременных нагрузках, сильных вибрациях, высоких температурах и т.п. Поэтому такие детали и узлы стремились делать из достаточно прочных материалов (специальных сплавов и композиций, тугоплавких материалов и их карбидов), которые, как правило, трудно поддаются традиционным методам обработки.

И хотя многие детали электронных приборов изготавливались из легкообрабатываемых металлов (меди, никеля и др.) или сплавов на их основе, но размеры таких деталей или их элементов часто были настолько малы (порядка десятых, сотых и даже тысячных долей миллиметра), а сами детали столь нежестки, что изготовление их традиционными способами превращалось в проблему, а чаще всего было невозможно.

Изготовление некоторых из таких деталей механическим способом представляло большие трудности, а иногда было связано со значительными отходами дорогостоящих материалов. Поэтому нередко приходилось либо прибегать к существенному изменению конструкции приборов: делать детали составными, применять пайку и мириться со значительным ухудшением качества приборов, либо вообще отказываться от их создания.

Попытки изготовления многих деталей электронных приборов с требуемыми точностью и шероховатостью обработанной поверхности другими способами (ультразвуковым, электрохимическим, фотоспособами, а позже электронно-лучевым и лазерным) не имели успеха.

Таким образом, ограниченность механического и других способов обработки металлов в некоторых случаях стала серьезным тормозом при создании новых электровакуумных приборов и при изготовлении сложнопрофильного инструмента.

Возникли три проблемы:

1. Для создания принципиально новых электронных приборов требовалось изготовление миниатюрных деталей, элементы которых не превышали сотых долей миллиметра, и должны были быть выполнены с точностью до 1–2 мкм;

2. Разработка надежных и долговечных приборов потребовала широкого применения труднообрабатываемых материалов для изготовления из них важнейших деталей таких приборов;

3. Увеличилась потребность в сложнопрофильном инструменте, формообразование которого во многих случаях представляло неразрешимую проблему.

Исследования, выполненные нами к концу 50-х годов [1–6], показали эффективность применения электроискрового способа для изготовления прецизионных деталей электронных приборов (клинтронов для радиорелейных линий связи, магнетронов и ламп обратной волны миллиметрового диапазона длин волн, специальных приемно-усилительных ламп и др.).

Создание в ГНПП «Исток» в марте 1957 г. лаборатории электроискровой обработки материалов (преобразованной в 1960 г. в отдел) значительно активизировало эти исследования. В короткие сроки были разработаны:

- новые методы электроискрового формообразования особо точных деталей,
- научные основы технологии электроискрового прецизионного изготовления деталей изделий электронной техники,
- оригинальные технологические процессы электроискрового изготовления деталей важнейших электронных СВЧ приборов и технологического инструмента,
- принципиально новые электроискровые прецизионные установки, промышленные образцы которых получили затем широкое применение в различных отраслях отечественной промышленности и зарубежных фирм.

В последующих разделах излагаются основные результаты этих работ.

Анализ научно-технической литературы и состояния электроискровой обработки материалов к моменту начала исследований позволил сформулировать следующие задачи:

1) Изучение воздействия электрических искровых разрядов весьма малых энергий и длительностей на различные материалы с целью выяснения возможности применения электроискровой обработки для изготовления прецизионных деталей электронных СВЧ приборов.

2) Установление основных закономерностей образования на поверхности электродов (обрабатываемых деталей и электродов-инструментов) следов эрозии в результате воздействия искровых разрядов в зависимости от используемых материалов электродов, межэлектродной среды, расстояния между электродами (межэлектродного промежутка), удельной мощности искровых разрядов и экспериментальное определение зависимости форм и размеров лунок (объемов удаляемого материала) от указанных факторов.

3) Экспериментальное определение амплитудно-временных и энергетических характеристик электрических импульсов, обеспечивающих эффективное формообразование поверхностей деталей электронных СВЧ приборов с высокой точностью и минимальной шероховатостью обработанной поверхности, а также исключают образование заусенцев, величина которых превышает единицы микрометров.

4) Исследование причин, препятствующих увеличению скорости формообразования деталей и определение путей ее повышения.

5) Изыскание методов электроискрового формообразования поверхностей, которые учитывают особенности электроискрового процесса, исключают влияние износа электрода-инструмента на точность изготовления деталей, обеспечивают хорошие естественные условия для эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки.

6) Разработка технологических процессов изготовления особо точных деталей электронных приборов и технологического инструмента с заданными точностью и шероховатостью обработанных поверхностей.

7) Создание электроискрового прецизионного оборудования, разработка требований к его основным функциональным устройствам и рекомендаций по его промышленному применению.

1.2. Методика исследования, аппаратура и оборудование для проведения исследований

Методика исследований. Для проведения исследований было создано электроискровое оборудование, не имевшее аналогов, оснащенное генераторами микросекундной длительности импульсов (типа RC, на электровакуумных лампах, тиратронного типа и транзисторных).

Исследования проводились на образцах из меди, тугоплавких металлов (поли- и монокристаллического вольфрама, молибдена, тантала, ниобия, рения и др.) и их карбидов, инструментальной и нержавеющей сталей, магнитных и полупроводниковых материалов (кремния, германия, сурьмянистого индия и др.).

В качестве межэлектродной среды использовались: керосин осветительный, этиловый

спирт, вода дистиллированная (удельной электропроводностью не более $5 \cdot 10^{-4}$ См/м, pH = 5,4 – 6,6) и питьевая (удельной электропроводностью 0,1 – 0,01 См/м, pH = 6,0 – 9,0), а также воздух.

Для определения электрической эрозии электродов под действием искровых разрядов малых энергий и длительностей применялась методика групповых лунок [2, 6, 7]. Она исключает влияние на величину эрозии электродов загрязнения межэлектродной среды, эффекта эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, качества регулирования межэлектродного расстояния, износа электрода-инструмента и других факторов.

Достоинством этой методики, помимо ее простоты и быстроты осуществления является возможность получения сведений в виде своеобразных эрозиограмм обо всех геометрических размерах лунок, а также характере выброса из них материала.

Измерения параметров лунок (рис.1), объемов лунок (V) и валиков (V_0) по их периферии проводились с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 (при увеличении в 490 раз – непосредственно на микроскопе, в 290 раз – на фотопленке и в 500–1000 раз – на фотографиях).

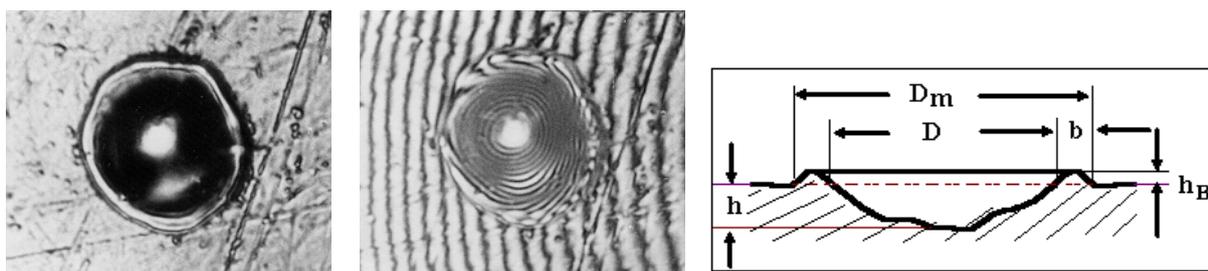


Рис.1. Внешний вид и сечение лунки, образовавшейся на поверхности меди в результате искрового разряда между электродами ($W_0 = 250$ мкДж; $t_u \approx 0,5$ мкс).

Справа – вид с интерференционными кольцами в монохроматическом свете. D_m – диаметр пораженного участка, D – диаметр лунки, h – глубина лунки, b , h_b – ширина и высота валика.

Для выяснения влияния величины межэлектродного промежутка на эффект эрозии на аноде и катоде, осциллографирования соответствующих импульсов напряжения и тока, выяснения характера распределения энергии, запасенной в системе, между анодом и катодом, а также определения энергии, затраченной на образование искрового канала и непосредственно на выброс материала с электродов, была использована методика одиночных импульсов и применялось устройство для возбуждения одиночных разрядов [10], обеспечивающее генерирование импульсов напряжения с достаточно крутым передним фронтом ($\approx 0,15$ мкс), амплитудой 50 – 150 В и длительностью 0,5 – 1,5 мкс.

Исследование форм и размеров эрозионных лунок, образованных искровыми разрядами в реальных условиях электроискровой обработки электродом-проволокой, изучение механизма формирования пазов и определение возникающих при этом микрозаусенцев осуществлялось по следующей методике.

При определенной энергии импульсов осуществлялось врезание электрода-проволоки в образец. Причем проволока устанавливалась под небольшим углом (не более одного градуса) относительно отполированной поверхности образца таким образом, чтобы обеспечить возможность образования на его поверхности отдельных лунок, групп лунок и начало образующегося паза.

При изучении лунок с большой крутизной стенок, с нерегулярной поверхностью, наличием впадин или выступов (возвышений) и других отклонений от правильной формы, а также при размерах лунок, превышающих 80 мкм, когда их размеры при изучении на интерференционном микроскопе МИИ-4 выходят за пределы кадра, изучение профиля исследуемых следов эрозии проводилось щуповым методом с помощью профилографа-профилометра модели 201. Геометрические размеры и объемы лунок определялись по профилограммам [14].

Влияние величины межэлектродного промежутка на интенсивность эрозии при униполярных импульсах напряжения в дистиллированной воде применительно к условиям прецизионной электроискровой обработки деталей электронных приборов исследовалось с использованием транзисторного генератора импульсов [11].

Линейные измерения осуществлялись с помощью универсального измерительного микроскопа УИМ-21, большого инструментального микроскопа БМИ, часового проектора ЧП, большого

проектора БП. Особо миниатюрные элементы измерялись на горизонтальном металлографическом микроскопе МИМ-8.

Обработка и анализ полученных результатов осуществлялись с использованием персональных компьютеров с процессорами не хуже Intel 80486, а затем Pentium 233 MMX и графическим принтером LQ-100 или лазерным принтером Lexmark Optra plus PS и сканером Scan Jet 4c (с помощью программ Microsoft Word, Power Point и электронных таблиц Excel для операционной среды Windows).

Экспериментальные электроискровые установки. Для проведения исследований были созданы специальные электроискровые установки, отличавшиеся повышенной точностью и работающие при энергиях импульсов не более 10^{-3} Дж, которые можно разделить на две группы [2, 6]:

1. Координатные установки для прорезания узких пазов (шириной до 0,04 – 0,07 мм) и изготовления деталей различного профиля непрофилированным электродом-инструментом (вольфрамовой проволокой диаметром 20 – 40 мкм);

2. Установки для изготовления различных отверстий и полостей, наружных профилей в разнообразных деталях традиционным способом копирования профиля электрода-инструмента.

Отличительная особенность установок первой группы – высокая точность отчетных устройств координатных столов (до ± 3 мкм), диапазон энергий импульсов от единиц до 1500 мкДж, частота следования искровых разрядов – десятки тысяч импульсов в секунду, максимальная потребляемая мощность 250 Вт, диапазон регулирования напряжения на электродах до 120 В; шероховатость обработанной поверхности 0,25 – 1,5 мкм.

Установки второй группы отличаются весьма высокой точностью перенесения геометрических форм электрода-инструмента на обрабатываемую деталь (до ± 2 мкм) при шероховатости R_a обработанной поверхности в пределах десятых долей микрометра. Диапазон энергий импульсов от единиц до сотен микроджоулей, частота следования искровых разрядов 100 – 300 тыс. имп/с, максимальная потребляемая мощность 300 – 350 Вт, диапазон регулирования напряжения на электродах до 120 В.

На рис.2 представлены фотографии первых электроискровых прецизионных установок (созданных в начале 50-х годов) для изготовления миниатюрных деталей электронных приборов:

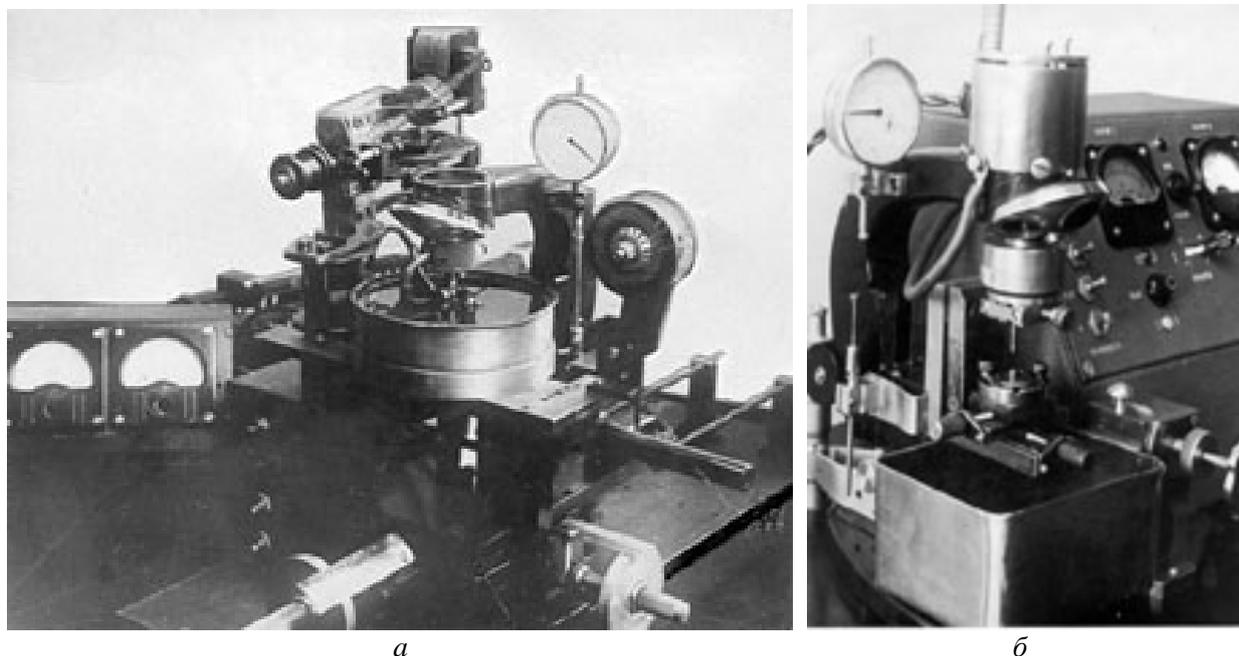


Рис. 2. Первые электроискровые прецизионные установки для изготовления миниатюрных деталей электронных приборов:

а – для прорезания пазов проволокой $\varnothing 0,02 - 0,04$ мм; б – для изготовления сеток клистронов с перемычками шириной 0,02 – 0,04 мм.

для прорезания вольфрамовой проволокой ВА-3 диаметром 0,02 – 0,04 мм узких пазов (шириной 0,03 – 0,05 мм) и изготовления электродов-инструментов, предназначенных для электроискрового изготовления медных сеток клистронов (рис. 2, а);

для изготовления сеток клистронов с квадратными отверстиями размером в несколько десятых долей миллиметра и перемычками между ними шириной 0,02 – 0,04 мм. Все отверстия этих сеток ($\approx 100 - 200$ шт.) изготавливаются одновременно специальным электродом-инструментом, на торце которого прорезаются узкие пазы шириной 40 – 50 мкм (рис. 2, б).

1.3. Результаты исследования электрической эрозии электродов под действием искровых разрядов малой энергии микросекундной длительности

Во многих работах достаточно внимания уделено исследованиям электрической эрозии электродов при искровых и импульсных дуговых разрядах большой энергии и длительности (главным образом в пределах от десятых долей или единиц до нескольких десятков или даже сотен джоулей и от единиц до сотен микросекунд).

Широкая область искровых разрядов малых энергий и длительностей – от миллионных до сотых долей джоуля и от десятых долей до единиц микросекунд оказалась практически не изученной. Но именно в этой области таились возможности создания принципиально новых методов формообразования поверхностей и технологических процессов особо точного изготовления деталей, например, таких, как детали электронных приборов из меди и ее сплавов, тугоплавких металлов и сплавов, полупроводниковых материалов.

Это и послужило основанием для проведения исследования электрической эрозии электродов под действием искровых разрядов малой энергии микросекундной длительности, результаты которых обобщены в настоящем разделе.

1.3.1 Зависимость между геометрическими размерами лунок и энергией импульсов

Выполненные нами исследования позволили установить соответствующие закономерности и выразить их аналитически с помощью предложенной методики групповых лунок, когда размеры лунок и валиков вокруг них, а также их профили в любом сечении с весьма высокой точностью определяются по интерференционным кольцам (изобатам – линиям равной глубины или высоты) [2, 6].

Исследованиями установлено, что диаметр D , глубина h и объем лунки V на аноде связаны с энергией импульса W_o следующими зависимостями (рис. 3):

$$D = k_D \cdot W_o^{1/3}, \text{ мкм}, \quad (1)$$

$$h = k_h \cdot W_o^{1/3}, \text{ мкм}, \quad (2)$$

$$V = k_\phi \cdot D^2 \cdot h \cdot 10^{-9}, \text{ мм}^3, \quad (3)$$

где D , h – диаметр и глубина лунки на уровне исходной поверхности, мкм, k_D , k_h – коэффициенты, зависящие от материала электродов, параметров импульса, межэлектродного расстояния (напряжения на электродах) и состава межэлектродной среды ($k_D=3,6 - 5,7$; $k_h=0,4 - 0,75$); наиболее вероятные средние значения коэффициентов: $k_D=4,5$; $k_h=0,45$, k_ϕ – коэффициент формы лунки, зависящий от материала электродов, параметров импульса, межэлектродного расстояния (напряжения на электродах) и состава среды.

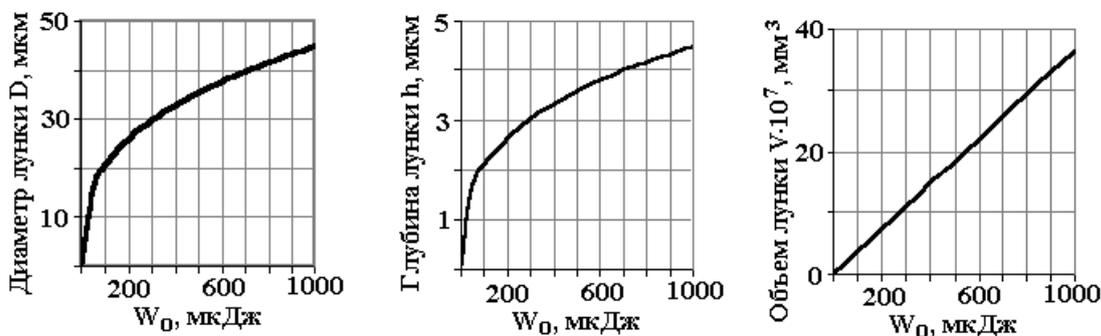


Рис. 3. Зависимость диаметра D , глубины h и объема V лунки от энергии импульса W_o (для $k_d = 4,5$; $k_h = 0,45$ и $k_\phi = 0,4$).

В зависимости от условий обработки (прежде всего от параметров импульсов и материала анода) лунки могут иметь формы, близкие к одной из следующих: круговому цилиндру ($k_\phi \approx 0,7$),

полуэллипсоиду вращения ($k_\phi \approx 0,5$), параболоиду вращения ($k_\phi \approx 0,4$), круговому конусу ($k_\phi \approx 0,3$).

Обычно для меди $k_\phi \approx 0,4$; для вольфрама $k_\phi \approx 0,5 - 0,65$; а его среднее наиболее вероятное значение можно считать равным 0,4.

По сути, коэффициент формы лунки k_ϕ является характеристикой эффективности воздействия на твердое тело искровых разрядов. Как будет показано ниже (в разделе о влиянии межэлектродного промежутка на эффект эрозии), k_ϕ (так же, как диаметр D , глубина h и объем лунки V), существенно зависит от начального напряжения на электродах U_o и межэлектродного промежутка. При этом объем выбрасываемого за импульс материала, а, следовательно, и производительность процесса могут изменяться в несколько раз.

Учитывая выражения (1) – (3), объем лунки на аноде в зависимости от энергии импульса, можно представить в виде

$$V = k_\phi \cdot k_D^2 \cdot k_h \cdot W_o \cdot 10^{-9} = K_\phi \cdot W_o, \text{ мм}^3, \quad (4)$$

где: K_ϕ – удельная эрозия, зависящая главным образом от материала электродов, длительности разряда, величины пробивного межэлектродного промежутка.

Следовательно, удельная эрозия K_ϕ пропорциональна коэффициентам формы и глубины лунки (k_ϕ, k_h) и квадрату коэффициента диаметра лунки (k_D):

$$K_\phi = k_\phi \cdot k_h \cdot k_D^2 \cdot 10^{-9}, \text{ мм}^3/\text{мкДж}. \quad (5)$$

Установлено, что удельная эрозия может изменяться в пределах от $2 \cdot 10^{-9}$ до $10 \cdot 10^{-9}$ мм³/мкДж.

Учитывая наиболее вероятные значения коэффициентов k_ϕ, k_D и k_h (равные соответственно 0,4; 4,5 и 0,45), наиболее вероятное среднее значение удельной эрозии $K_\phi = 3,6 \cdot 10^{-9}$ мм³/мкДж.

В результате воздействия на обрабатываемую поверхность серии импульсов тока (искровых разрядов) образуется своеобразная («лунная») поверхность как следствие взаимного перекрытия лунок. При этом максимальная шероховатость поверхности $R_{max} \approx 1/3h$.

С учетом выражения (2) можно считать, что

$$R_{max} \approx k_h/3 W_o^{1/3}, \text{ мкм}. \quad (6)$$

Для медных электродов при обработке в керосине (а ориентировочно для большинства металлов) $k_h/3 \approx 0,15$, поэтому

$$R_{max} \approx 0,15 W_o^{1/3}, \text{ мкм}. \quad (7)$$

С другой стороны, $W_o \approx 27 / k_h^3 \cdot R_{max}^3$, мкДж или (для $k_h = 0,45$),

$$W_o \approx 296 R_{max}^3, \text{ мкДж}. \quad (8)$$

Таким образом, по размерам образующихся лунок (диаметру D , глубине h , объему V и профилю), а также валиков по их периферии можно судить о том, насколько эффективно было воздействие теплового потока (потока электронов) в точках его приложения, как распределялась энергия разряда между электродами, а также прогнозировать не только шероховатость обработанной поверхности, но и размеры микрозаусенцев по кромкам формообразуемых поверхностей, так как следы эрозии на поверхностях электродов (аноде и катоде) представляют собой эрозиограммы процесса воздействия на твердое тело искровых разрядов.

1.3.2. Влияние межэлектродного промежутка на эффект эрозии и распределение энергии между анодом и катодом

Наряду с величиной энергии разряда на объем вещества, выбрасываемого с электродов в точках приложения разряда микросекундной длительности, существенно влияет расстояние между электродами (межэлектродный промежуток) [10, 11, 13].

В табл.1 показано влияние межэлектродного промежутка L и соответствующего ему напряжения на электродах U_o на удельную эрозию K_ϕ и размеры лунок на аноде (D, h, V), полученных при постоянных значениях энергии импульса W_o (материалы электродов – медь, межэлектродная среда – керосин).

Из табл.1 видно, что с увеличением расстояния между электродами (напряжения на электродах) существенно уменьшается удельная эрозия и объем лунки (в 2,3 – 3,6 раза) и возрастает отношение диаметра к глубине лунки (до 1,9 раза).

Таблица 1. Влияние межэлектродного промежутка L на удельную эрозию K_3 и размеры лунок (диаметр D , глубину h , объем V) для различных энергий импульса W_0 и напряжений на электродах U_0

W_0 , мкДж	L , мкм	U_0 , В	$K_3 \cdot 10^9$, мм ³ /мкДж	D , мкм	h , мкм	D/h	$V \cdot 10^7$, мм ³
50	12,5	100	3,6	15	2,0	7,5	1,8
50	7,5	60	8,4	20	2,6	7,7	4,2
250	25,0	200	2,28	25	2,3	10,87	5,7
250	12,5	100	5,76	32	3,5	9,14	14,4
500	28,0	225	1,86	30	2,6	11,54	9,3
500	10	80	6,7	40	5,2	7,7	33,5
1500	18	140	2,17	50	3,3	15,15	32,6
1500	10	80	5,46	55	6,8	8,1	82,0
2500	23,0	180	2,24	55	4,7	11,7	56,0
2500	12,5	100	5,28	68	7,0	9,7	132,0

Например, объемы лунок практически одинаковы при $W_0 = 500$ мкДж, $L = 10$ мкм и $W_0 = 1500$ мкДж, но $L = 18$ мкм, так как в первом случае $K_3 = 6,7 \cdot 10^{-9}$ мм³/мкДж, $D/h = 7,7$, а во втором – $K_3 = 2,17 \cdot 10^{-9}$ мм³/мкДж, а $D/h = 15,15$.

Отчетливо проявляется зависимость отношения диаметра лунки к ее глубине D/h от межэлектродного промежутка L . При оптимальных значениях L это отношение минимально и равно $\sim 8 - 9$.

На рис.4 показана зависимость от межэлектродного промежутка L объемов лунок на аноде V_a и катоде V_k при воздействии одиночных импульсов с энергией $W_0 = 500$ мкДж, на рис. 5 – составляющих энергии импульса при $W_0 = 500$ мкДж, на рис.6 – удельной эрозии K_3 на аноде для энергий импульсов $W_0 = 500$ и 150 мкДж, а на рис.7 – объемов лунок на аноде V_a и на катоде V_k , а также удельной эрозии K_3 для энергии импульсов 150 мкДж.

На рис.8 показаны фотографии лунок на аноде и катоде из меди в зависимости от межэлектродного промежутка L для диапазона от 30 до 3 мкм при энергии импульса $W_0 = 150$ мкДж.

Результаты исследования влияния межэлектродного промежутка на эффект эрозии и распределение энергии между анодом и катодом позволяют утверждать следующее:

- образование лунок на электродах и условия обеспечения эффективного выброса материала в процессе электроискровой обработки связаны с формированием канала разряда, характеристики которого зависят от межэлектродного промежутка. С его изменением следы воздействия электрических разрядов на материал электродов носят различный характер: от четких, правильной формы лунок при больших промежутках до размытых пятен с проплавлениями глубиной в десятые доли микрометра при промежутках в несколько микрометров;

- с уменьшением межэлектродного промежутка прогрессивно увеличивается диаметр пораженного участка на катоде. При этом катодные лунки теряют овальную форму, объемы их растут, и валики вокруг лунок формируются в виде выплесков;

- при уменьшении и приближении промежутка к оптимальной величине потери энергии W_n в канале разряда уменьшаются почти втрое, а энергия W_p , выделяющаяся на электродах, увеличивается более чем в два раза;

- оптимальная величина межэлектродного промежутка, обеспечивающая максимальный эффект эрозии при одинаковом напряжении, зависит от энергии импульса. С уменьшением энергии импульса максимум эрозии на аноде смещается в сторону малых промежутков (рис.6). Для энергии импульса 500 мкДж оптимальный промежуток равен примерно 15 мкм, в то время как для энергии 150 мкДж – 10 мкм;

- при постоянной энергии импульса уменьшение межэлектродного промежутка (напряжения на электродах) на $67-70\%$ приводит к увеличению диаметра лунок на $10 - 33\%$, их глубины

на 30 – 100%, объема лунок (массы удаляемого материала), а следовательно, и удельной эрозии, в 2,3 – 3,6 раза;

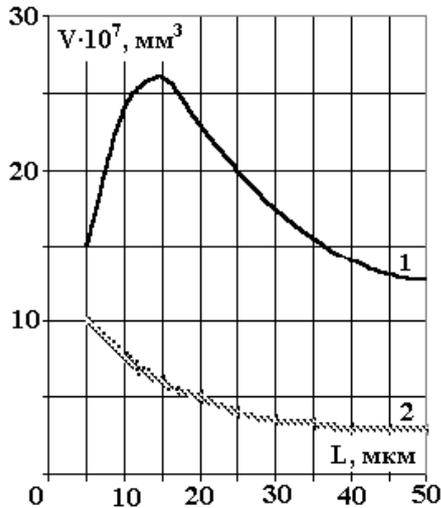


Рис. 4. Зависимость от межэлектродного промежутка L объемов лунок V_a (1) и V_k (2) при $W_o = 500$ мкДж.

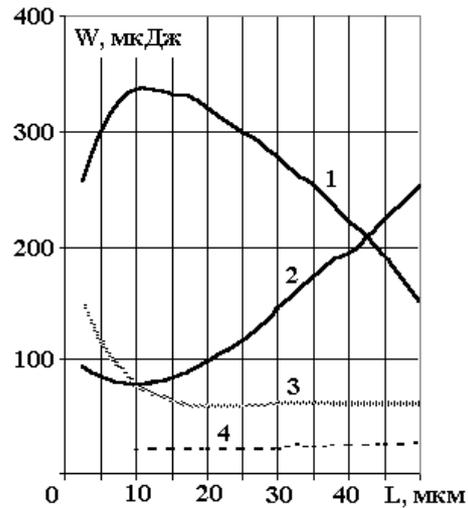


Рис.5. Зависимость от межэлектродного промежутка L составляющих энергии импульса W_o : энергии разряда W_p (1), потерь энергии W_n (2), затрат энергии на образование канала W_k (3), затрат энергии на затухание разряда W_s (4).

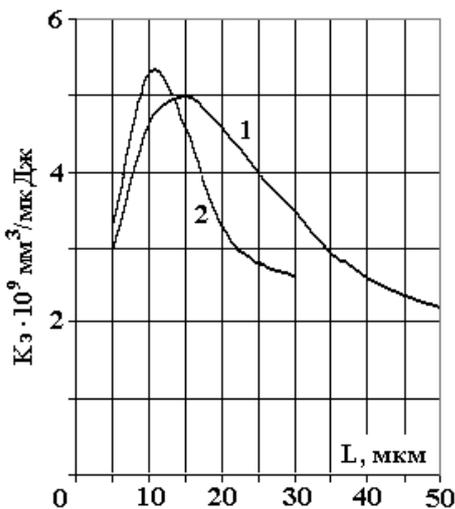


Рис.6. Зависимость от межэлектродного промежутка L удельной эрозии $K_э$ на аноде при энергии импульсов $W_o = 500$ (1) и 150 (2) мкДж.

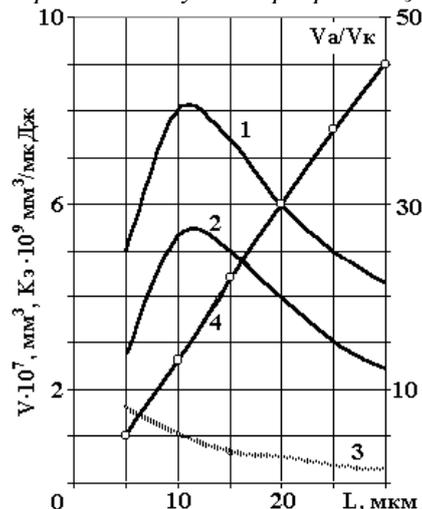


Рис.7. Зависимость от межэлектродного промежутка L объемов лунок V_a (1) и V_k (3), их отношения V_a/V_k (4) и удельной эрозии $K_э$ (2) при энергии импульсов $W_o = 150$ мкДж.

– влияние межэлектродного промежутка (напряжения на электродах) в реальных условиях электроискровой обработки на изменение глубины лунки h , отношения D/h и удельной эрозии $K_э$, столь существенно, что при меньшем его значении электрическая эрозия может быть практически одинаковой для значений энергий импульсов, в три раза отличающихся между собой;

– особенно сильное влияние изменение расстояния между электродами оказывает на величину эрозии на катоде. С его увеличением эрозия на катоде существенно уменьшается, а отношение V_a/V_k возрастает от 10 до 45 раз;

– при промежутках в несколько микрометров процесс формообразования лунок на электродах резко изменяется, площади пораженных разрядами участков на аноде и катоде возрастают, а по внешнему виду их невозможно различить, они приобретают вид, получающийся при воздействии серии разрядов. Однако количество выбрасываемого материала не увеличивается. Это связано с тем, что с уменьшением расстояния между электродами до значений, меньших оптимальных, процесс приближается к границе инверсии разряда из искровой формы в дуговую.

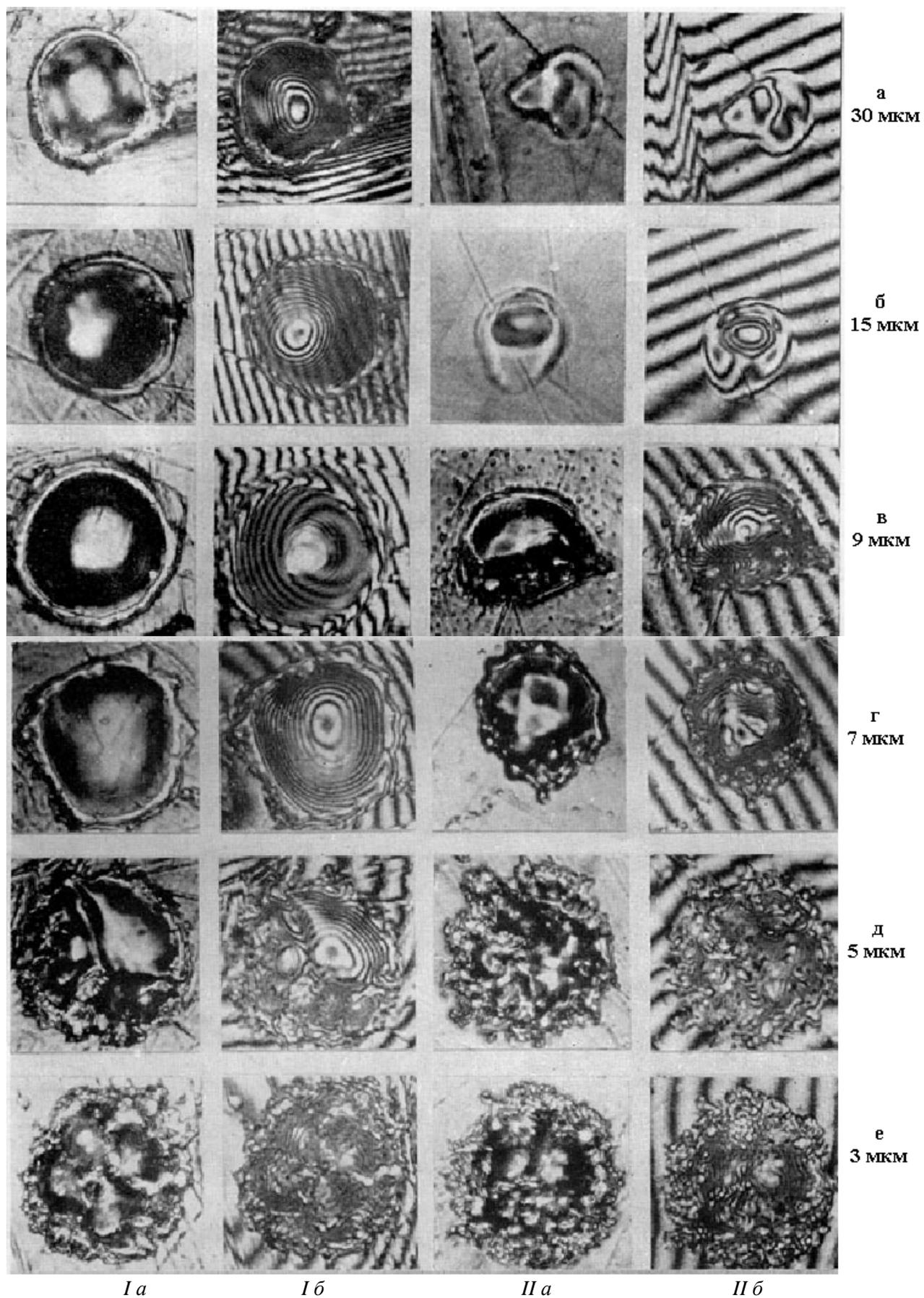


Рис.8. Фотографии лунок на аноде (I а, I б) и катоде (II а, II б).
 Межэлектродные промежутки L , мкм: а - 30, б - 15, в - 9, г - 7, д - 5, е - 3. $W_0 = 150$ мкДж.

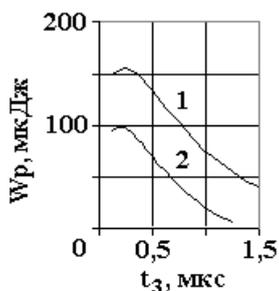


Рис.9. Зависимость энергии разряда W_p от времени его запаздывания t_3 при $t_o = 2,5$ (1) и $1,5$ (2) мкс.

– осуществление электроискрового процесса на слишком малых межэлектродных расстояниях (3 – 5 мкм при энергии импульса более 100 мкДж) сопровождается повышенным износом электрода-инструмента (катода) и существенным уменьшением эффективности процесса на обрабатываемой детали (аноде). В связи с этим электроискровое изготовление деталей целесообразно вести на межэлектродных расстояниях, несколько превышающих оптимальные значения, то есть в большинстве случаев не менее 10 – 15 мкм (напряжениях U_o на электродах не менее 80 – 120 В) и не допускать их уменьшения до критического значения, равного 3 – 5 мкм ($U_o=30 – 40$ В).

– увеличенные межэлектродные промежутки желательны не только из-за существенного уменьшения эффекта эрозии на катоде (то есть уменьшения износа электрода-инструмента), но и из-за более благоприятных при этом условий эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, обеспечивающих увеличение интегрального эффекта эрозии, то есть производительности процесса.

Таким образом, одной из существенных особенностей электроискровой прецизионной обработки токопроводящих материалов является осуществление процесса на строго определенных межэлектродных промежутках (начальных напряжениях на электродах), равных или превышающих оптимальные расстояния.

1.3.3. Влияние запаздывания искрового разряда на эффект эрозии

В ходе исследования электрической эрозии электродов при одиночных униполярных импульсах малой энергии и длительности было отмечено явление запаздывания разряда относительно начала импульса напряжения и его возрастание с увеличением межэлектродного промежутка [11].

На рис.9 представлена зависимость энергии разряда W_p от его запаздывания t_3 относительно начала импульса напряжения U_o при различных его длительностях t_o , на рис. 10 – соответствующие эпюры импульсов напряжения на электродах и эпюры импульсов тока при различных запаздываниях начала разрядов t_3 .

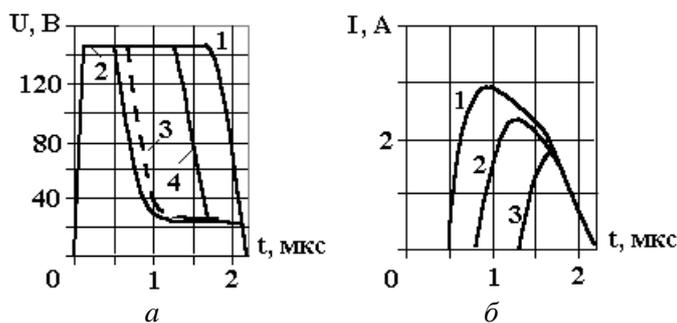


Рис.10. Эпюры импульсов напряжения U на электродах (а) и импульсов тока I (б) с различным запаздыванием разрядов, мкс: 0,5 ($U1, I1$), 0,7 ($U2, I2$), 1,25 ($U3, I3$).

С изменением запаздывания начала разряда (как это видно из эпюр на рис.10) изменяется не только длительность, но и амплитуда тока. Поскольку запаздывание начала разряда определяет длительность и амплитуду импульса тока, то от него зависит энергия разряда, то есть при прочих равных условиях и та часть энергии, которая тратится на съем материала с электродов.

Установлено, что с уменьшением запаздывания начала разряда с 1 – 1,5 до 0,25 мкс энергия импульса W_p увеличивается в несколько раз, а объемы образующихся лунок на один-два порядка.

На рис.11 представлены следы эрозии на аноде (а) и катоде (б) из меди при запаздывании начала разрядов $t_3 = 0,2$ мкс.

Так как запаздывание разрядов существенно влияет на эффект эрозии, то возникновение искровых разрядов должно обеспечиваться при достижении импульсами заданного напряжения или с запаздыванием не более нескольких десятых долей микросекунды.

1.3.4. Исследование форм и размеров эрозионных лунок, образованных на различных материалах

Зависимость величины электрической эрозии материалов от их теплофизических свойств была установлена еще изобретателями электроискрового способа обработки токопроводящих материалов Б.Р. и Н.И. Лазаренко. Изучению этой зависимости посвящен и ряд работ Б.Н. Золотых.

Тем не менее, некоторые существенные моменты электроискрового формообразования в условиях прецизионной обработки (при малых энергиях и длительностях импульсов) были еще недостаточно изучены.

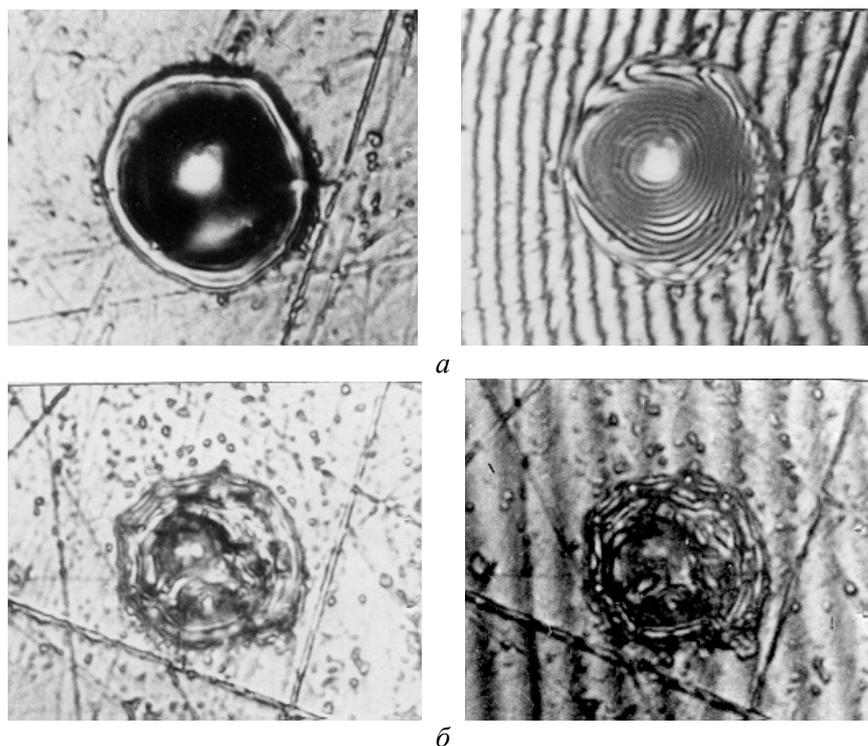


Рис. 11. Следы эрозии на аноде (а) и катоде (б) при запаздывании начала разряда. $t_3 = 0,2$ мкс.

Выполненные нами исследования показали, что внешний вид, форма (в том числе профиль) и размеры лунок, образующихся на аноде, существенно зависят от его материала (рис.12) [7 – 9, 14].

Исследования проводились по методике групповых лунок [2, 7], что исключало влияние на величину эрозии электродов степени загрязнения межэлектродной среды, интенсивности эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, износа электрода-катода и других факторов.

Установлено, что лунки на медных анодах (рис.12, а) имеют четкую форму, близкую к параболоиду вращения или шаровому сегменту ($k_\phi \approx 0,4$). При $W_o = 250$ мкДж их диаметр $D = 28 - 30$ мкм, глубина $h = 3 - 3,5$ мкм, а объем $V = (10 - 12,5) \cdot 10^{-7}$ мм³. Лунки обрамлены довольно четким валиком шириной $b = 5 - 6$ мкм, высота которого ($h_в$) не превышает 0,6 мкм, а объем составляет 3 % от объема лунки. Отношение D/h не более 9.

Лунки на вольфраме (рис. 12, б) в отличие от лунок на меди имеют более плоское дно и профиль полуэллипсоида вращения или кругового цилиндра ($k_\phi \approx 0,625$). Но у них глубина примерно в два раза меньше, отношение $D/h \approx 20$. Они отличаются неравномерностью высоты и ширины валика по периферии. Лунки на поверхности поликристаллического вольфрама имеют объем в 1,5 раза меньше, чем на меди.

Некоторым своеобразием отличаются контуры лунок, полученных на монокристаллическом вольфраме, представляющие собой многогранник.

Анализ размеров элементов лунок, а также их объемов показывает, что на поверхности монокристаллического вольфрама размер лунок больше на 14%, глубина – на 17%, а объем в 1,5 раза больше, чем на поликристаллическом вольфраме, и соизмерим с объемами лунок на меди.

Такую разницу в объемах можно объяснить удалением части материала в первой фазе процесса за счет микроскалывания, так как развитие хрупкого разрушения по плоскостям спайности в монокристаллах происходит значительно легче, чем в поликристаллах. Диаметры пораженных разрядом участков на меди и поликристаллическом вольфраме отличаются незначительно.

В табл.2 приведено сравнение размеров и объемов лунок на меди с лунками на молибдене и вольфраме (поли- и монокристаллическом).

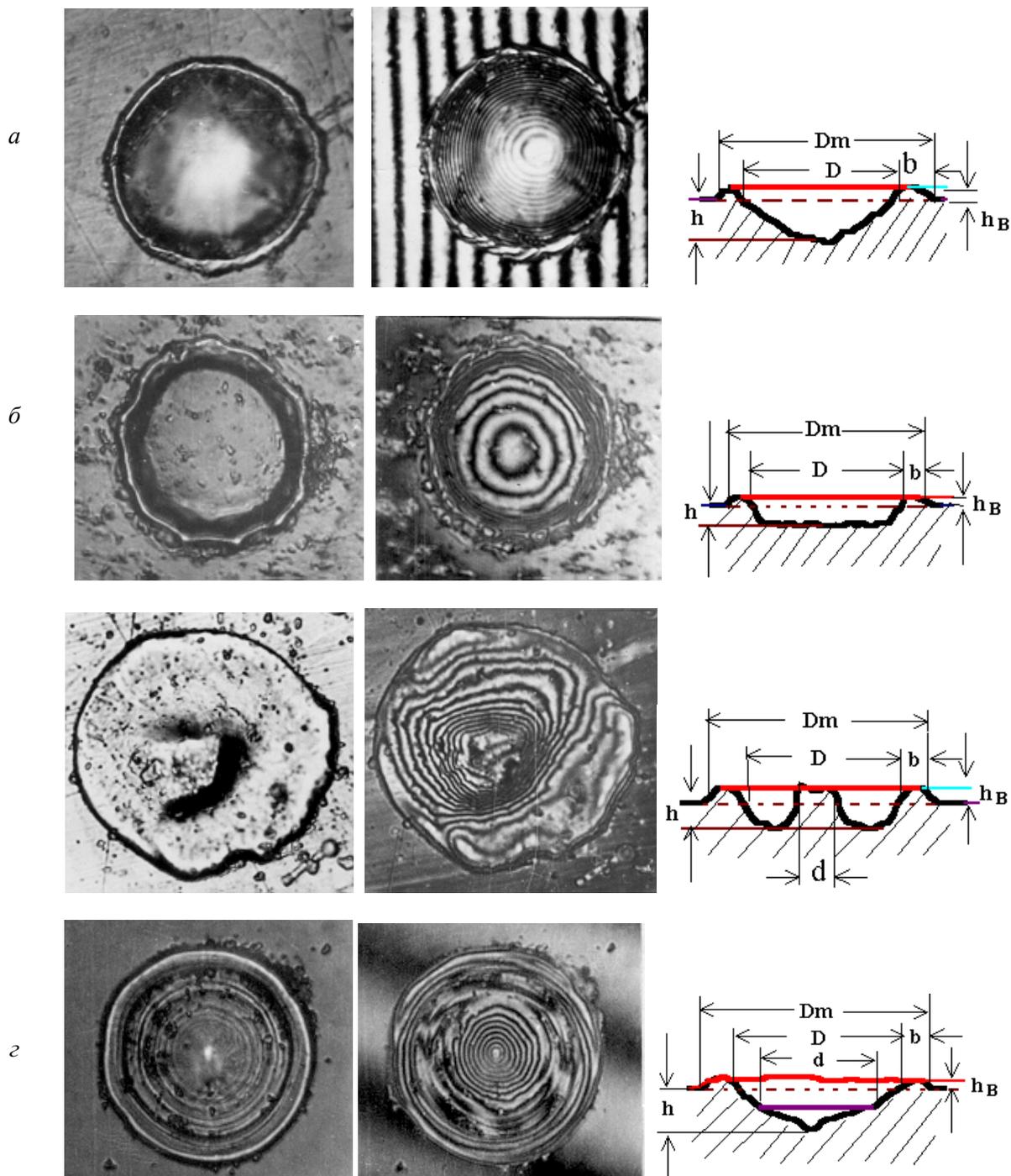


Рис. 12. Внешний вид и сечения лунок, образованных на различных материалах: меди (а), монокристаллическом вольфраме (б), стали (в), кремнии (г) при $W_o = 250$ мкДж, $U_o = 100$ В.

Для лунок на сталях (например, 12Х18Н10Т и ХВГ) характерно наличие выступа в центре лунки, который имеет вид островка неправильной формы (рис. 12, в) [14], что является следствием недостаточности теплового потока для данного случая.

Таблица 2. Размеры и объемы лунок на анодах из меди, молибдена и вольфрама ($W_o = 250$ мкДж, $U_o = 130$ В. Материал катода – медь, межэлектродная среда – керосин)

Материал анода	Размеры лунок					Размеры валика			$k_s \cdot 10^9$, мм ³ /мкДж
	D , мкм	h , мкм	D/h	k_ϕ	$V \cdot 10^7$, мм ³	b , мкм	h_s , мкм	$V_s \cdot 10^7$, мм ³	
Медь	30	3,5	8,6	0,4	12,5	5 – 6	0,6	1,9	5
Молибден	25	1,76	14,2	0,65	7,15	4 – 5	0,88	2	2,82
Вольфрам поликристаллический	30	1,5	20	0,625	8,3	5	0,6	1,95	3,3
Вольфрам монокристаллический	34	1,76	19,3	0,625	12,7	4	0,7	2,35	5,1

Для твердого сплава по сравнению с медью характерны лунки большего диаметра (в 1,2 раза), но меньшей глубины (в два раза), с неровным дном, по форме близкие к полуэллипсоиду вращения ($k_\phi \approx 0,5$). Валик по периферии лунки на твердом сплаве имеет еще более неравномерную высоту по сравнению с монокристаллом вольфрама. Объем лунки на поверхности твердого сплава в 1,25 раза меньше, чем на меди, и в 1,2 раза больше, чем на поликристаллическом вольфраме.

Характерным отличием дна лунки на твердом сплаве является также наличие на ее поверхности большого количества частиц размером около 1 – 2 мкм.

Изучение лунок, возникающих в результате искровых разрядов на поверхностях полупроводниковых материалов, показало, что они имеют характерные особенности по сравнению с лунками, образующимися (при прочих равных условиях) на металлах [8, 9].

Лунки на кремнии с удельным сопротивлением 0,05 Ом·см имеют почти идеальную форму конуса (рис. 12, з) и их объем может быть выражен следующей формулой:

$$V = 0,26 D^2 \cdot h \cdot 10^{-9}, \text{ мм}^3. \quad (9)$$

Кроме формы, они отличаются от лунок на металлах наличием довольно широких валиков по периферии, образующихся в результате «выжимания» части расплавленного, но не выброшенного материала. Ширина этих валиков может достигать половины диаметра лунок.

Для многих лунок на кремнии (рис.12, з) характерно наличие конических выступов или углублений в центре лунок. Их объем V_k может быть определен по следующей зависимости:

$$V_k = 0,26 d^2 \cdot h_k \cdot 10^{-9} \text{ мм}^3, \quad (10)$$

где d , h_k – диаметр и глубина конического углубления или выступа, мкм.

Лунки на кремнии также отличаются от лунок на меди или вольфраме большим диаметром. Аналогичная картина получается и при образовании лунок на других полупроводниковых материалах.

Лунки на германии с удельным сопротивлением 0,05 Ом·см можно разделить на три типа:

– лунки первого типа имеют круглую форму, конусообразный профиль и отличаются от лунок на кремнии в основном меньшим диаметром (примерно в 1,4 раза);

– лунки второго типа имеют внешние контуры почти правильной шестигранной формы, а в остальном они подобны лункам на кремнии;

– лунки третьего типа характеризуются наличием плоского дна, диаметр которого близок к диаметру лунок первого типа. Внешний контур лунок, как и во втором случае, почти правильный шестиугольник, но несколько больших размеров.

На некоторых фотографиях лунок на германии видны застывшие брызги расплавленного материала и отчетливо выделяются следы капель, которые отброшены от периферии лунки на расстояние порядка 50 мкм. Некоторые капли материала, выброшенные из лунки, упали на поверхность недалеко от края лунки и застыли в виде шариков диаметром от десятых долей до 7 – 9 мкм.

1.3.5. Влияние межэлектродной среды на эффект эрозии электродов

Новые сведения о влиянии межэлектродной среды на эффект эрозии электродов под действием искровых разрядов микросекундной длительности были получены нами также с помощью методики групповых лунок [2, 6].

Было установлено, что при прочих равных условиях параметры лунок в керосине и этиловом спирте отличаются незначительно, но их объемы в воде в 2 раза меньше, чем в керосине. Объемы лунок на аноде в воздушной среде в 2 – 5 раз больше, чем в жидких средах [7].

В табл. 3 и на рис.13 показана зависимость от межэлектродной среды параметров лунок (диаметра D , глубины h , ширины валика b , объема V , диаметра плоского дна d), образованных на меди при $W_o = 250$ мкДж, $t_u = 0,5$ мкс.

Таблица 3. Основные параметры лунок, образованных на меди при искровых разрядах малой энергии и длительности ($W_o = 250$ мкДж, $t_u = 0,5$ мкс)

Межэлектродная среда	D , мкм	h , мкм	b , мкм	$V \cdot 10^7$, мм ³	Минимальный диаметр плоского дна d , мкм
Керосин	31	3	2	11,4	2 – 3
Спирт этиловый	30	3	1,7	10,3	6
Вода дистиллированная	24	2,6	1,7	6,0	4
Воздух	40 – 45	3,5 – 4	5 – 6	20 – 30	7 – 10

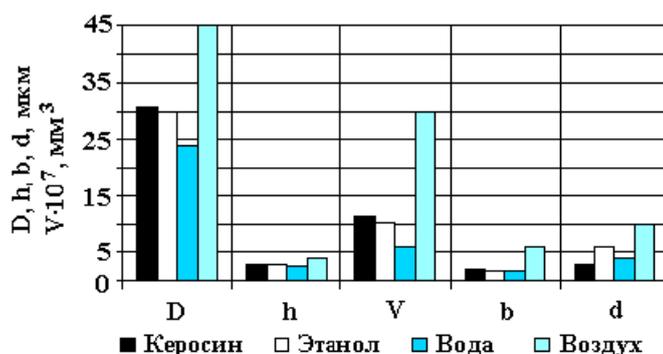


Рис. 13. Зависимость параметров лунок от межэлектродной среды.

На рис.14 представлены фотографии лунок, образованных на меди в различных межэлектродных средах (керосине, воде, этиловом спирте и воздухе) на режимах: $W_o = 250$ мкДж, $U_o = 130$ В, $t_u = 0,5$ мкс.

Анализ фотографий и сечений лунок на поверхности медного анода показывает, что их внешний вид, геометрические размеры кратеров и периферийных зон существенно отличаются в зависимости от межэлектродной среды.

Для лунок, образовавшихся в воздухе, характерно наличие на их периферии многочисленных выплесков и брызг расплавленного металла, неровных краев. Они отличаются плоским дном значительных размеров, крутыми стенками, коэффициентом формы не менее 0,7 (то есть лунки, образовавшиеся на воздухе, по форме приближаются к круговому цилиндру). Как следствие, объем лунок в воздухе в 1,5 – 2,0 раза больше, чем в керосине и в четыре раза больше, чем в воде.

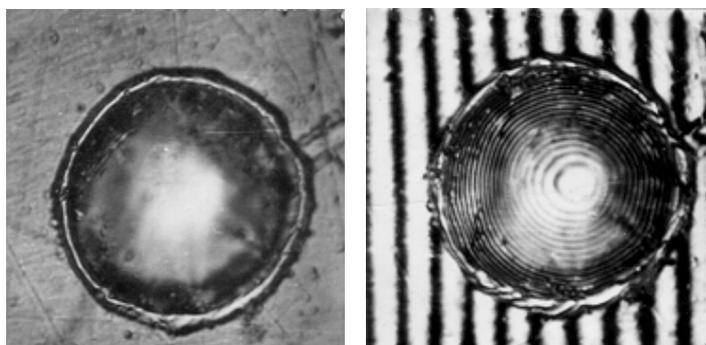
Полученные результаты исследований не противоречат тому факту, что электроискровое изготовление деталей эффективнее в жидких, а не в газообразных средах и процесс формообразования поверхностей более производителен в воде, а не в керосине.

Это кажущееся несоответствие объясняется тем, что скорость формообразования определяется не только объемом выбрасываемого за каждый разряд материала, но и процессами, происходящими в межэлектродном промежутке и обеспечивающими удаление продуктов эрозии и восстановление условий, необходимых для многократного повторения разрядов при формообразовании деталей.

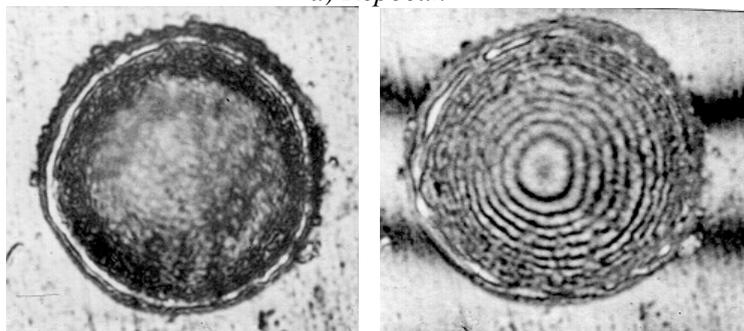
Традиционно в качестве межэлектродной среды при электроискровой обработке используются углеводородные жидкости (например, керосин).

Однако при использовании углеводородов в процессе их разложения образуются твердые углеродные частицы, способствующие засорению межэлектродного промежутка. Если это керосин ($C_{10}H_{22}$), то на 142 г разложенного керосина приходится 3 г твердых углеродных частиц.

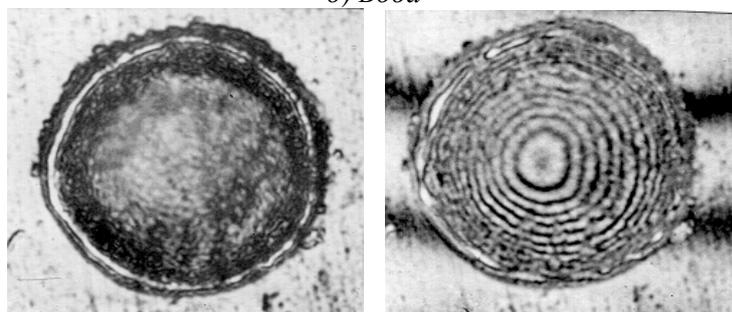
Поэтому при обработке в керосине в зоне обработки выделяется огромное количество твердых продуктов его разложения (в дополнение к металлу, выбрасываемому из зоны поражения разрядом), которые интенсивно забивают межэлектродное пространство, существенно ухудшают условия эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки и приводят к затуханию процесса, если не принять мер по улучшению естественной или созданию принудительной их эвакуации.



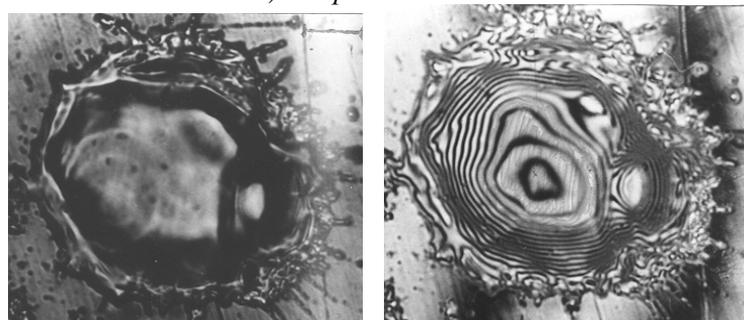
а) Керосин



б) Вода



в) Спирт этиловый



г) Воздух

*Рис.14. Лунки, образованные на меди в различных межэлектродных средах.
 $W_o = 250$ мкДж, $U_o = 130$ В, $t_u = 0,5$ мкс.*

Наилучшей средой для электроискровой обработки деталей электронных приборов является чистая вода (ее удельное электросопротивление находится на уровне 10^4 Ом·см). Она практически не образует в процессе обработки каких-либо твердых продуктов разложения, обычно забивающих межэлектродный промежуток в случае применения углеводородных жидкостей, которые к тому же являются пожароопасными и образуют при своем разложении вредные продукты (например, оксид угле-

рода). Однако вода – слабопроводящая жидкость, которая при пропускании через нее постоянного тока вызывает активные электрохимические процессы анодного растворения вследствие того, что вода слабый электролит. Результатом этих процессов является повышенная коррозия деталей и электродов, растравливание обработанных поверхностей, ухудшение точности обработки и изменение химического состава поверхностных слоев.

Благодаря работам [13, 25 – 21 и др.], выполненным в электронной промышленности, были созданы генераторы биполярных импульсов напряжения микросекундной длительности, позволившие вести электроискровую обработку в обычной водопроводной воде без боязни возникновения электрохимических процессов, существенно повысить производительность процесса (особенно при обработке стальных деталей), улучшить качество обработанной поверхности и условия труда.

Условия и способы формирования импульсов напряжения, исключающие возникновение процесса электролиза при обработке в воде, рассматриваются в [19 – 21].

Здесь же уместно напомнить, что в воде происходит анодный электролитический съем металла. При сравнении характеристик обработки в воде и керосине вкладом электрохимической реакции можно игнорировать (так как более 90% приходится на действие искрового разряда).

Кроме того, количество удаляемого в результате электрохимических реакций металла относительно общего количества снятого металла можно снизить увеличением амплитуды тока искрового разряда (J_p) и уменьшением длительности искрового разряда (t_p).

Скорость обработки в керосине ($V_{кер}$) и в воде ($V_{вод}$) можно оценить по формулам:

$$V_{кер} \propto t_p^{1,1} I_p^{1,4} \quad (11)$$

$$V_{вод} \propto t_p^{0,6} I_p^{1,4}. \quad (12)$$

Отсюда следует, что экспоненциальные показатели при пиковых токах в обоих случаях одинаковы, однако они различаются у длительности искрового разряда t_p (на 0,5). Разница этих показателей при t_p свидетельствует о различии расходов энергии в разрядах при обработке в воде и в керосине.

При плотности тока меньше $(4 - 8) \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$ (в зависимости от межэлектродной среды и обрабатываемого материала) съем металла резко снижается.

Плотность тока в искровом разряде определяется формулой:

$$j = k_a \cdot t_p^{-0,6} \cdot (m)^{0,66}, \quad (13)$$

где k_a – константа (для воды = $3,75 \cdot 10^{-6}$; для керосина = $2,5 \cdot 10^{-6}$), t_p – длительность искрового разряда, мкс, m – физическая константа материала = $\rho \cdot c M^2 \sigma^2$, ρ – плотность, г/см^3 ; c – удельная теплоемкость $\text{Дж/г} \cdot \text{К}$; σ – удельное электросопротивление, $\text{Ом}^1 \cdot \text{см}^{-1}$.

При постоянной длительности искровых разрядов плотность тока при обработке меди должна быть в три раза больше, чем при обработке стали (с учетом физических констант материалов).

С другой стороны, коэффициент термической диффузии α определяется по формуле:

$$\alpha = \lambda / c \rho, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (14),$$

где: c – удельная теплоемкость, $\text{Дж/г} \cdot \text{К}$, ρ – плотность, г/см^3 ; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Дж/см} \cdot \text{с} \cdot \text{К}$.

Значение коэффициента термической диффузии α : для воды – $16,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$, для керосина – $11 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$.

Таким образом охлаждающий эффект воды в 1,5 раза выше, чем керосина.

При снятии 1 г стали в воде затрачивается примерно 6500 Дж энергии на высвобождение 333 см^3 газообразных водорода (H_2) и кислорода (O_2). При такой же обработке в керосине для снятия 1 г стали расходуется примерно 4000 Дж энергии на высвобождение H_2 , $\text{C}_2 \text{H}_2$, $\text{C}_2 \text{H}_4$, и т. п. газов. Предполагается, что в этих случаях энергия связи ОН равна 120 ккал/моль.

Примерно 57% общей тепловой энергии затрачивается на разложение керосина и 93% – на разложение воды (то есть почти в 1,7 раза больше, чем на разложение керосина). Кроме того, для воды требуется дополнительно в 1,5 раза больше энергии для рассеяния тепла в процессе охла-

ждения. Поэтому можно утверждать, что для работы в воде необходимо, по крайней мере, примерно в 2,5 раза больше энергии, чем при работе в керосине.

1.4. Исследование процессов электроискрового особо точного формообразования поверхностей.

Надежность и долговечность, а также выходные параметры электронных приборов и других изделий электронной техники существенно зависят от качества изготовления деталей: точности формообразования, шероховатости обработанных поверхностей, размеров образующихся на них микрозаусенцев, наличия оксидов, загрязнений и структурных изменений в поверхностном слое.

Возрастающие требования к качеству изготовления деталей требуют совершенствования применяющихся при этом технологических процессов.

Так, например, применение воды в качестве межэлектродной среды при изготовлении мелкоструктурных деталей практически исключило их загрязнение продуктами разложения среды, а использование в качестве электрода-инструмента очищенной молибденовой или вольфрамовой проволоки устранило еще один из источников загрязнения межэлектродного промежутка и обрабатываемой поверхности. Это значительно облегчило процесс очистки мелкоструктурных деталей после электроискровой обработки (особенно деталей с шириной пазов меньше 30 мкм).

Однако применение воды и чистой проволоки не устранило окончательно всех источников загрязнения. Так, коллоидные частицы и шарики расплавленного металла, выбрасываемые в процессе обработки с поверхности детали и электрода-инструмента, окисляясь, заполняют имеющиеся и образующиеся в процессе обработки микрополости, существенно ухудшая условия эвакуации продуктов эрозии.

Естественно, что при прочих равных условиях применение только воды и чистых электродов-инструментов не может устранить или даже уменьшить образование на кромках формообразуемых поверхностей микрозаусенцев, размеры которых при изготовлении миниатюрных деталей могут быть соизмеримы с размерами элементов (пазов).

Образование таких заусенцев ухудшает эвакуацию продуктов эрозии из зоны обработки, снижает интенсивность процесса и существенно затрудняет последующую химическую очистку деталей.

Ситуация усугубляется еще и тем, что формообразование поверхностей электродом-проволокой диаметром от 5 – 6 мкм до нескольких десятков микрометров (имеющей большое омическое сопротивление, способствующее потерям энергии и затягиванию разрядов) сопровождается увеличением микрозаусенцев и уменьшением эффективности процесса.

На рис.15 представлена зависимость электросопротивления вольфрамовой проволоки ВА-3 от диаметра. Электросопротивление молибденовой проволоки существенно меньше (например, \varnothing 20 мкм в 2,5 раза).

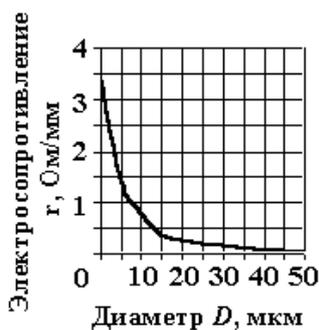


Рис.15. Зависимость электросопротивления r вольфрамовой проволоки ВА-3 от диаметра D .

Так как при изготовлении многих деталей электронных и других приборов, а также миниатюрного прецизионного инструмента (деталей штампов, клейм, дюз и т.п.) используют тонкую вольфрамовую или молибденовую проволоку, а расстояние между токоподводами в лучшем случае не менее 10 – 20 мм, то, очевидно, что электрическое сопротивление отрезка проволоки, включенное в разрядный контур, может превышать 5 – 50 Ом (для вольфрамовой проволоки \varnothing 20 – 5 мкм) или 1 – 2 Ом (для \varnothing 50 – 30 мкм).

Вместе с тем известно, что электрическое сопротивление разрядного контура не должно превышать 0,03 – 0,04 Ом, так как даже незначительное превышение этой величины приводит к резкому падению эффекта эрозии. Это убедительно было показано в работах Б.Р. и Н.И. Лазаренко.

Кроме того, в связи с увеличением длительности и уменьшением энергии искрового разряда возрастает доля металла, выбрасываемая из лунки в жидко капельном состоянии, что приводит к существенному ухудшению эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка и к значительному увеличению размеров образующихся при этом микрозаусенцев.

Изыскание путей уменьшения заусенцев, образующихся при электроискровой обработке, имеет большое значение для улучшения качества изготавливаемых миниатюрных деталей, особенно в тех случаях, когда шероховатость обработанной поверхности не должна превышать десятых долей микрометра.

1.4.1 Влияние удельной мощности искрового разряда на величину микрозаусенцев и эффект эрозии

В исследованиях [12], выполненных автором, показана существенная зависимость размеров образующихся на кромках заусенцев, интенсивности процесса и степени загрязнения зоны обработки продуктами эрозии от удельной мощности искровых разрядов (плотности теплового потока, приходящегося на место приложения искровых разрядов).

Исследования проводились в реальных условиях электроискровой обработки при прорезании узких пазов в различных материалах электродом-проволокой диаметром 15 – 60 мкм с использованием транзисторного генератора импульсов, позволявшего производить обработку в обычной питьевой воде. Однако чтобы не создавать возможные дополнительные источники загрязнения межэлектродного промежутка веществами, растворенными и находящимися во взвешенном состоянии в обычной питьевой воде из водопровода, применялась дистиллированная вода.

Существенное увеличение удельной мощности искровых разрядов, возникающих между электродами при подаче на них импульсов напряжения, за счет резкого уменьшения при этом их длительности, осуществлялось шунтированием электродов конденсаторами различной емкости.

Как показали исследования, каждой длительности импульса напряжения, формируемого генератором, соответствует оптимальная шунтирующая емкость, при которой размеры образующихся на кромках заусенцев минимальны, а интенсивность процесса максимальна.

Установлено, что величина шунтирующей электроды емкости $C_{ш}$ (как оптимальная, обеспечивающая наибольшую интенсивность процесса при минимальных размерах заусенцев, так и минимальная, при которой существенно уменьшаются заусенцы) прямо пропорциональна длительности импульса напряжения, формируемого генератором:

$$C_{ш} = K_c t_{и} n\Phi, \quad (15)$$

где K_c – коэффициент пропорциональности, $n\Phi/мкм$; $t_{и}$ – длительность импульса напряжения, формируемого генератором и заряжающего конденсатор, мкс.

При формообразовании деталей электродом-проволокой диаметром не более нескольких десятков микрометров для длительностей импульсов напряжения U_o в пределах 0,5 – 2 мкс, значения коэффициента пропорциональности K_c равны 2500 пФ/мкс – для максимальной $C_{ш}$ и 1750 пФ/мкс – для минимальной $C_{ш}$.

Отсюда следует, что минимально допустимые значения емкостей шунтирующих конденсаторов лежат в пределах 800 – 3500 пФ, а оптимальные – от 1250 до 5000 пФ.

В табл. 4 приведены длительности и частоты формируемых генератором прямоугольных импульсов напряжения, размеры заусенцев, образующихся по кромкам пазов и соответствующая им скорость формообразования при прорезании пазов в пяти медных пластинах толщиной 70 мкм каждая в дистиллированной воде молибденовой проволокой МЧ диаметром 0,05 мм на различных режимах обработки.

Из табл. 4 видно, что с увеличением шунтирующей электроды емкости до оптимального значения на порядок уменьшается размер образующихся на кромках заусенцев при возрастании скорости формообразования до двух раз.

Естественно, что с увеличением емкости (до определенного значения) несколько повышается напряжение на электродах. Причем момент падения напряжения при дальнейшем возрастании емкости больше определенного значения (зависящего от длительности импульсов напряжения, формируемых генератором и заряжающих емкость) характеризуется резким уменьшением размеров заусенцев.

Если напряжение на электродах при шунтировании их емкостью поддерживать постоянным, то пропорционально увеличению емкости будет возрастать скорость формообразования и уменьшаться размер заусенцев. При постоянном напряжении на электродах скорость обработки может быть увеличена в 3 – 8 раз, а размер заусенцев уменьшается на порядок.

Таблица 4. Изменение размеров заусенцев и скорости формообразования от режимов обработки 5 медных пластин толщиной 0,07 мм каждая. Электрод-проволока МЧ Ø 0,05 мм. Межэлектродная среда – вода дистиллированная

Режимы обработки						Скорость формообразования		Размер заусенцев Z, мкм
Номер режима	$f_o \cdot 10^{-3}$, 1/с	t_u , мкс	$C_{ш}$, пФ	U_o , В	W_o , мкДж	V, мм/мин	S, мм ² /мин	
I	250	2	0	80	–	1,00	0,35	30 – 60
			1000	96	4,6	1,35	0,47	20 – 24
			3000	88	11,6	1,40	0,49	5 – 12
			5000	83	17,3	1,80	0,63	5 – 10
			6000	76	17,4	1,60	0,56	5 – 10
			7800	64	16,0	2,00	0,70	5
II	350	1,4	0	80	–	0,80	0,28	27 – 60
			510	92	2,17	1,20	0,42	20 – 45
			1000	93	4,34	1,40	0,49	18 – 30
			2000	86	7,40	1,60	0,56	8 – 18
			3000	80	9,60	2,00	0,70	5 – 10
			4000	65	8,50	1,75	0,61	5 – 15
III	500	1,1	0	80	–	1,20	0,42	30 – 50
			510	92	2,16	1,35	0,47	20 – 40
			1000	93	4,34	1,80	0,63	20 – 30
			2000	79	6,23	1,70	0,595	5 – 8
			2900	64	6,00	1,80	0,63	4 – 5
			IV	600	0,8	0	80	–
150	86	0,55				0,96	0,336	20 – 55
510	90	2,06				1,52	0,53	20 – 30
1150	80	3,70				1,60	0,56	10 – 15
1690	64	3,50				1,60	0,56	5 – 6

Причем с увеличением $C_{ш}$ (то есть удельной мощности искровых разрядов) резко уменьшается разброс размеров заусенцев. Так, если электроды не шунтируются емкостью, разброс достигает 150%, а при оптимальном значении $C_{ш}$ он снижается до 60%, а размер заусенцев уменьшаются на порядок.

На рис.16 показаны участки пазов в пакетах из пяти медных пластин толщиной 0,07 мм каждая, прорезанные на разных режимах электродом-проволокой МЧ Ø 0,05 мм при питании электродов от транзисторного генератора импульсов ($U_o = 80$ В, $t_u = 1,4$ мкс, $f_o = 350000$ 1/с).

На рис. 17, а представлены зависимости скорости прорезания пазов V от $C_{ш}$ при $U_o=80$ и 64 В, а на рис. 17, б – размеров заусенцев Z при $U_o=64$ В.

В обоих случаях прорезание пазов осуществлялось в деталях из пяти медных пластинах толщиной 70 мкм каждая электродом-проволокой диаметром 0,05 мм на режиме IV ($t_u = 0,8$ мкс, $f_u = 600 \cdot 10^3$ 1/с).

Как видно на рис.17 (а и б), при постоянном напряжении на электродах скорость обработки возросла в несколько раз, а размеры заусенцы уменьшились в 5 – 10 раз.

Анализируя данные табл. 4 и рис.17, можно отметить, что величина заусенцев Z обратно пропорциональна шунтирующей емкости $C_{ш}$ и может быть выражена зависимостью

$$Z = K_z \cdot C_{ш}^{-1}, \text{ мкм}, \quad (16)$$

где K_z – коэффициент пропорциональности, пФ, мкм (для режима I и вышеуказанных условий $K_z=2,5 \cdot 10^4$, пФ, мкм).

Установлено, что с увеличением емкости конденсаторов, шунтирующих электроды до определенного (оптимального) предела, длительность искровых разрядов уменьшается в несколько раз (до 0,2 – 0,3 мкс).

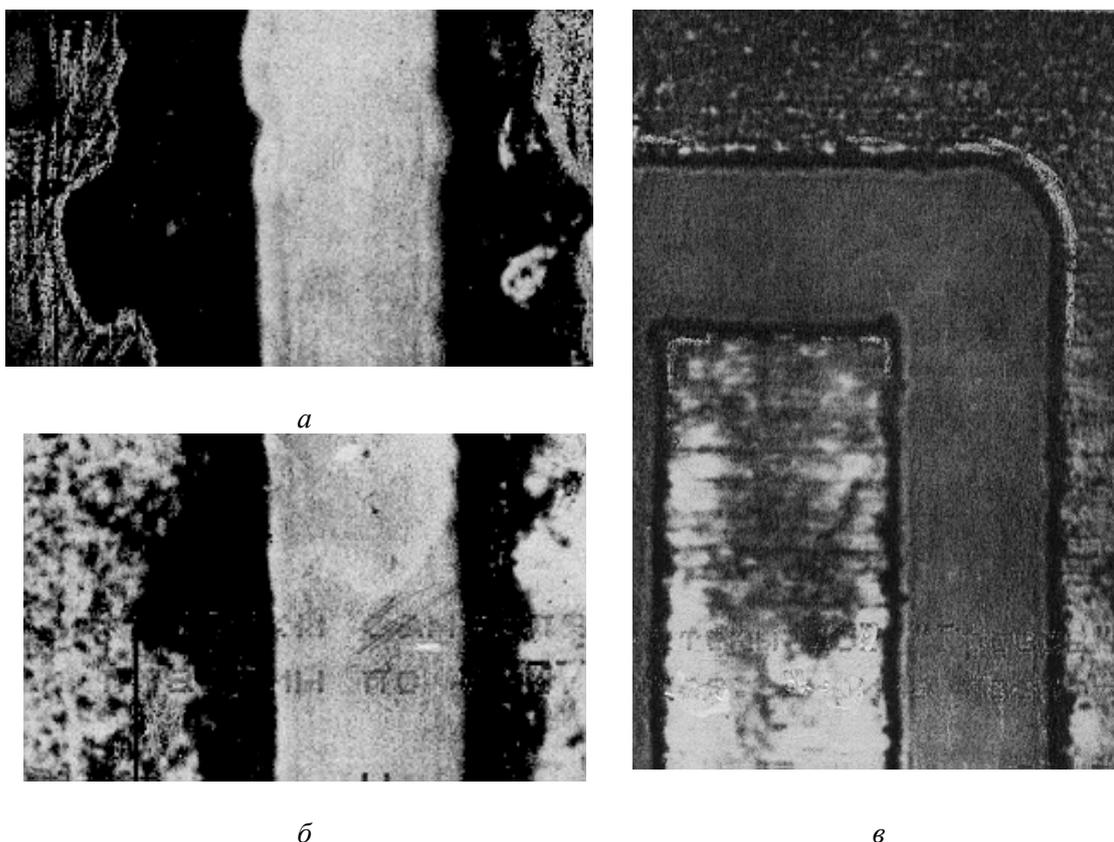


Рис.16. Участки пазов в пакетах из пяти медных пластин толщиной 0,07 мм каждая. Ширина пазов – 0,06 мм. Электрод-проволока МЧ $\varnothing 0,05$ мм. Режим обработки: $U_o = 80$ В, $t_n = 1,4$ мкс, $f_o = 350000$ 1/с. Межэлектродная среда – вода дистиллированная. $C_{ш}$, пФ = 0 (а), 1000 (б), 3000 (в). Заусенцы $Z = 27 - 60$ мкм (а), 14 – 20 мкм (б), 6 – 8 мкм (в). Скорость обработки 0,8 мм/мин (а), 1,4 (б), 2,0 (в).

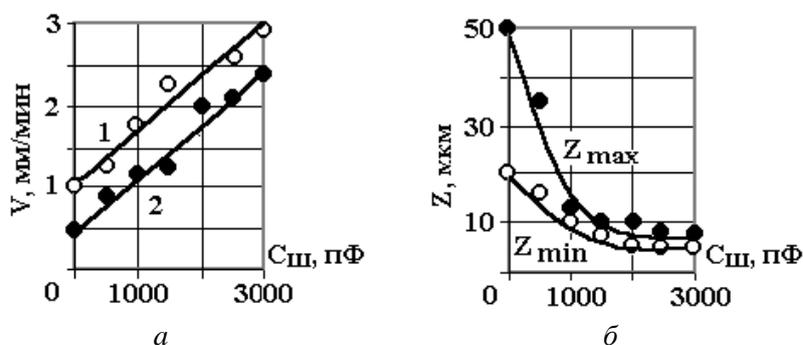


Рис. 17. Влияние $C_{ш}$ на скорость прорезания пазов V при $U_o = 80$ (1) и 64 (2) В (а), размер заусенцев Z при $U_o = 64$ В (б).

Таким образом, оптимальное значение шунтирующей электроды емкости обеспечивает столь высокую концентрацию энергии (вследствие значительного уменьшения длительности разрядов до 0,2 – 0,3 мкс), что материал в точке приложения разряда практически мгновенно испаряется, и только его ничтожная расплавленная часть образует по кромкам обработанной поверхности микрозаусенцы (размером не более нескольких микрометров), различаемые только под микроскопом.

Аналогичные результаты при прорезании пазов молибденовой проволокой диаметром 0,05 – 0,06 мм были получены и при шунтировании электродов емкостью $C_{ш}$ при использовании тиристорного генератора импульсов А671.51, перестроенного на режимы: I ($C_n = 1000$ пФ, $f = 44000$ 1/с), II ($C_n = 500$ пФ, $f = 88000$ 1/с), III ($C_n = 2000$ пФ, $f = 18000$ 1/с).

Так как молибденовая проволока диаметром несколько сотых долей миллиметра обладает значительным электрическим сопротивлением, составляющим несколько единиц или десятков ом (в зави-

симости от расстояния между токоподводами), то для наиболее полного выделения энергии в межэлектродном промежутке (на электродах), последовательно с электродами в зарядную цепь шунтирующего электрода конденсатора включался резистор, величина которого выбиралось несколько большей, чем электрическое сопротивление разрядного контура, зависящего прежде всего от электрического сопротивления электрода-провода.

На рис. 18 представлена зависимость от емкости $C_{ш}$ размеров микрозаусенцев Z и длительности импульса рабочего тока (искрового разряда) t_p при прорезании пазов в медной пластине толщиной 2 мм (электрод-инструмент – молибденовая проволока МЧ диаметром 0,05 мм; $U_{ист} = 800$ В; $C_n = 550$ пФ; $f = 88000$ 1/с).

Как видно из рис.18, зависимость микрозаусенцев имеет экстремальный характер. С увеличением $C_{ш}$ существенно уменьшается размер микрозаусенцев и при определенном оптимальном значении $C_{ш}$ он становится минимальным, уменьшаясь в три раза. Для рассматриваемого случая $C_{ш. опт} = 2000 - 3000$ пФ. Характерно при этом также то, что уменьшается разброс значений Z .

При дальнейшем увеличении $C_{ш}$ (до 10000 пФ) размер микрозаусенцев Z возрастает в 2 – 2,5 раза. Возрастает также разница между их максимальным и минимальным значениями.

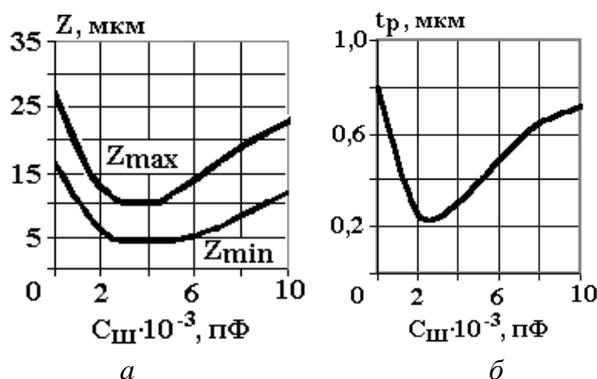


Рис. 18. Зависимость от емкости $C_{ш}$ размеров микрозаусенцев Z (а) и длительности искровых разрядов t_p (б) (электрод-инструмент – молибденовая проволока МЧ диаметром 0,05 мм; материал детали – медь МБ толщиной 2 мм; $U_{ист} = 800$ В; $C_n = 550$ пФ; $f=88000$ 1/с).

Таким образом, оптимальным значениям $C_{ш} = 2000 - 3000$ пФ соответствуют длительности импульсов рабочего тока (искровых разрядов) $t_p = 0,2 - 0,3$ мкс.

Для сравнения на рис.19 показаны заусенцы по кромкам пазов, прорезанных в кремниевых пластинах толщиной 0,26 мм ($\rho = 0,05$ Ом·см) молибденовой электродом-проволокой МЧ= $\varnothing 0,025$ мм, а в табл.5 представлена зависимость размеров заусенцев по кромкам кремниевых пластин ($\rho = 0,05$ Ом·см) и скорости формообразования от режимов. Толщина пластин – 2 мм. Электрод-проволока МЧ $\varnothing 0,05$ мм. Ширина пазов 54 – 56 мкм. Межэлектродная среда – вода дистиллированная.

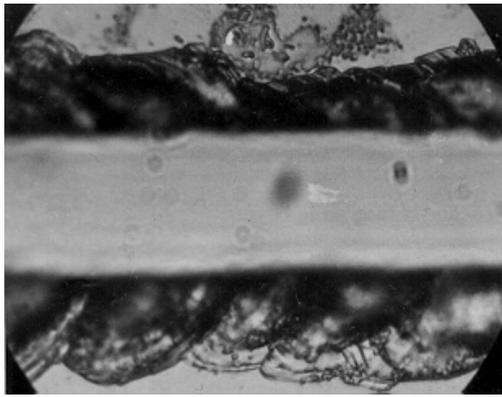
Анализируя результаты исследования влияния удельной мощности искровых разрядов на размер микрозаусенцев и скорость формообразования, можно сделать следующие выводы.

При электроискровом прорезании узких пазов в процессе изготовления миниатюрных сложнопровильных деталей электронных приборов даже на режимах, обеспечивающих шероховатость обработанной поверхности R_a не более 0,5 мкм, неизбежно возникновение микрозаусенцев на их кромках. Размеры этих заусенцев могут быть соизмеримы с размерами пазов или других элементов деталей и зависят от удельной мощности искровых разрядов, которая в свою очередь определяется их длительностью.

Минимальные размеры заусенцев (в пределах нескольких микрометров) обеспечиваются при длительностях искрового разряда не более 0,2 – 0,4 мкс.

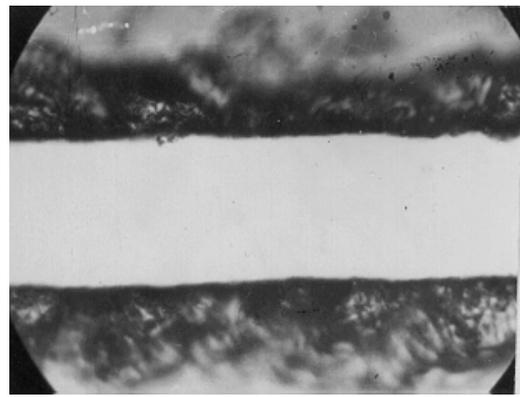
Размеры заусенцев можно прогнозировать по размерам валиков, образующихся вокруг лунок и возникающих на поверхности после искровых разрядов.

При оптимальном значении $C_{ш}$, то есть оптимальной длительности искрового разряда, средний объем лунки (объем выбрасываемого металла) увеличивается в 1,5 раза, средний размер валика по кромкам (объем расплавляемого, но остающегося на обрабатываемой поверхности металла) уменьшается в 4 раза, а размер микрозаусенцев – в 3 – 4 раза, то есть не превышает нескольких микрометров.



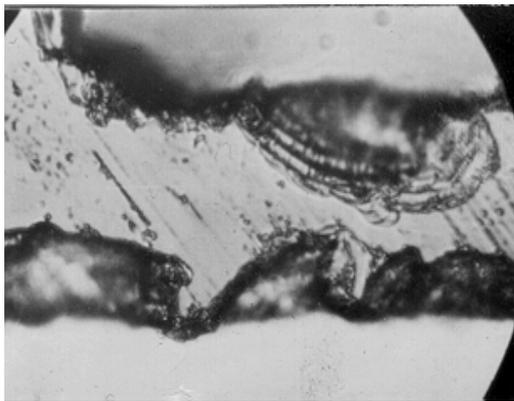
a

(сфокусировано на верхнюю поверхность)

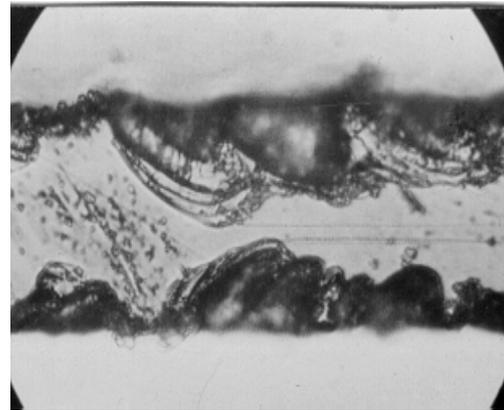


б

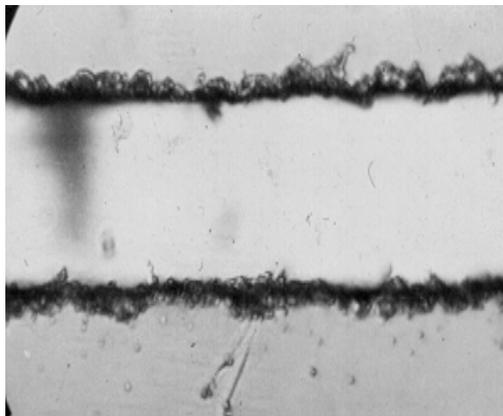
(сфокусировано на нижнюю поверхность)



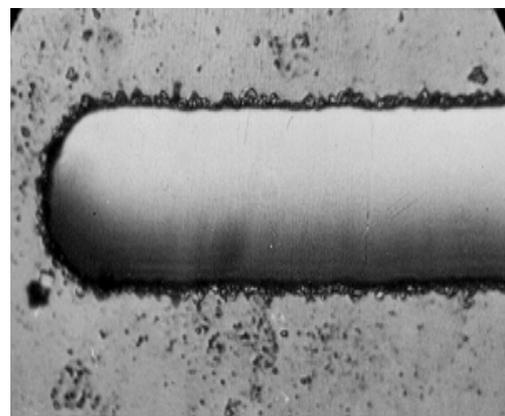
в



г



д



е

Рис.19. Заусенцы по кромкам пазов, прорезанных в кремниевых пластинах толщиной 0,26 мм ($\rho = 0,05 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) электродом-проволокой МЧ $\varnothing = 0,025 \text{ мм}$.

a – режим обработки: $U_o = 70 \text{ В}$, $t_u = 0,8 \text{ мкс}$, $f_o = 6 \cdot 10^5 \text{ 1/с}$, $C_{ш} = 0$; $R_{ш} = 1 \text{ кОм}$. Ширина: пазов (*a*, *б*) – 28 мкм, штырей (*в, г*) – 40 мкм; размер заусенцев Z – до 20 мкм; *д* – режим обработки: $U_o = 60 \text{ В}$, $t_u = 0,5 \text{ мкс}$, $f_o = 1 \cdot 10^6 \text{ 1/с}$, $C_{ш} = 1500 \text{ пФ}$, $R_{ш} = 0,5 \text{ кОм}$. Ширина пазов – 28 мкм. Заусенцы Z – до 4 мкм; *е* – режим обработки: $U_o = 24 \text{ В}$, $C_{ш} = 150 \text{ пФ}$. Ширина паза – 26 мкм, размер заусенцев Z – до 2 мкм.

Изучение следов эрозии, образованных под действием искровых разрядов, показало, что лунки, полученные с подключением шунтирующего электрода конденсатора $C_{ш}$, обеспечивающего оптимальную длительность импульса тока, существенно отличаются по форме и размерам от лунок, полученных при $C_{ш} = 0$, когда они имеют меньшие объемы и широкие валики по периферии, представляющие собой часть материала, выжатого из лунок в расплавленном состоянии и застывшего по периферии.

При этом средний размер лунок на меди (количество выброшенного за импульс материала) уменьшается в 1,5 раза, а средний размер валиков по их краям увеличивается в 4 раза (по сравнению со случаем при оптимальной шунтирующей электроды емкости $C_{ш}$). При этом размер микрозаусенцев возрастает в 3 – 4 раза.

1.4.2. Влияние условий эвакуации продуктов эрозии на процесс электроискрового формообразования

Выполненные исследования показали, что интенсивность процесса электроискровой обработки можно существенно повысить (при сохранении заданной шероховатости поверхности) благодаря созданию условий, которые исключают ухудшение протекания процесса с течением времени и с внедрением электрода-инструмента в обрабатываемую деталь.

К их числу в первую очередь следует отнести применение в качестве межэлектродной среды жидкостей, не образующих твердых продуктов разложения при возникновении в них электрических разрядов, но выделяющих при этом газы, способствующие удалению продуктов эрозии (микрочастиц обрабатываемого материала) из межэлектродного промежутка путем флотации.

Другим условием, исключающим ухудшение протекания процесса во времени, является уменьшение зоны взаимодействия между инструментом и деталью, выполнение которого обеспечивает создание естественных стабильных условий эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка.

Таблица 5. Зависимость заусенцев по кромкам кремниевых пластин и скорости формообразования от режимов. Толщина пластин – 2 мм. Электрод-проволока МЧ Ø 0,05 мм. Ширина пазов 54 – 56 мкм. Межэлектродная среда – вода дистиллированная

Режимы обработки						Скорость формообразования		Размер заусенцев Z, мкм
Номер режима	$f_o \cdot 10^{-3}$, 1/с	t_w , мкс	$C_{ш}$, пФ	U_o , В	W_o , мкДж	V, мм/мин	S, мм ² /мин	
II	350	1,4	0	80	–	0,4	0,8	10 – 18
			150	80	0,5	1,4	2,8	5 – 10
			510	80	1,6	1,20	2,4	5 – 10
			1150	80	3,7	1,08	2,16	5 – 10
			1690	80	5,4	1,8	3,6	8 – 12
			2510	80	8,1	2,0	4,0	4 – 8
			3000	80	9,6	2,0	4,0	4 – 8
			4000	80	12,8	2,8	5,6	4 – 8
			5000	66	11	5	10,00	4 – 8
			6510	54	9,6	3,2	6,4	7 – 10
			7200	48	8,3	2	4,0	4 – 8
8200	38	5,9	0,6	1,2	6 – 9			
III	500	1,1	0	80	–	1,28	2,56	7 – 12
			150	80	0,5	1,60	3,20	6 – 10
			510	80	1,6	1,52	3,04	6 – 8
			1150	80	3,7	1,42	2,84	5 – 7
			1690	80	5,4	1,4	2,80	5 – 7
			3000	80	9,6	2,0	4,00	4 – 7
IV	600	0,8	0	80	–	1,20	2,4	7 – 10
			150	80	0,5	1,80	3,6	6 – 9
			510	80	1,0	1,60	3,2	4 – 7
			1150	80	1,6	1,64	3,3	4 – 9
			1690	80	5,4	2,00	4,0	3 – 7

Применение в качестве межэлектродной среды воды вместо углеводородных жидкостей (например, керосина) при прочих равных условиях увеличивает интенсивность процесса в 2 – 3 раза. А в связи с тем, что при этом значительно уменьшается загрязнение межэлектродного промежутка, имеется возможность повысить интенсивность процесса еще в 2 – 3 раза за счет увеличения частоты следования искровых разрядов.

Поэтому при сохранении заданной шероховатости поверхности электроискровое изготовление прецизионных деталей в воде, при подаче на электроды биполярных микросекундных импульсов напряжения от специальных генераторов импульсов, позволяет увеличить интенсивность процесса на порядок по сравнению с обработкой в керосине.

При создании новых источников питания (генераторов импульсов) следует иметь в виду, что для заданной шероховатости поверхности, наряду со строго определенными значениями энергии импульсов, существует предел возможной частоты следования их, а следовательно, и максимальной интенсивности процесса. Это связано в первую очередь с тем, что повышение энергии импульсов требует некоторого увеличения их длительности. Ориентировочно можно считать, что в течение 1 мкс можно выделить энергию порядка 2000 – 2500 мкДж [17].

Например, для энергии импульсов $W_o=70$ мкДж, обеспечивающей получение R_a не более 0,12 мкм при длительности разрядов в несколько десятых долей микросекунды, интенсивность процесса выше 10 – 15 мм³/мин практически не достижима. Соответственно для энергии импульсов порядка 10000 мкДж, обеспечивающей R_a не более 0,8 мкм, максимально возможная интенсивность процесса не превышает 200 мм³/мин.

Это обстоятельство (так же, как и то, что при электроискровой обработке в данное мгновение выброс материала осуществляется только в одной точке) еще раз подтверждает необходимость уменьшения зоны взаимодействия между инструментом и деталью, а также применения таких технологических приемов, при которых в «стружку» превращается минимальное количество материала, подлежащего удалению, а основная его часть отделяется в виде сравнительно крупных частей.

Поверхности заданной формы могут быть образованы электроискровым способом одним из двух приемов: копированием профиля электрода-инструмента; вырезанием электродом-проволокой.

В первом случае электрод-инструмент, представляя негативное изображение обрабатываемого профиля, размеры которого уменьшены (при обработке внутренних поверхностей) или увеличены (при обработке наружных поверхностей) на двойную величину межэлектродного зазора, постепенно внедряется в обрабатываемую деталь на необходимую глубину или пронизывает ее насквозь.

Обычно длину электрода-инструмента выбирают такой, чтобы имелась возможность калибровки изготавливаемого отверстия за счет введения в работу неизношенной части электрода-инструмента. При этом длина его рабочей части должна значительно превышать толщину изготавливаемой детали. Иногда приходится использовать несколько электродов или как-то восстанавливать изношенный профиль.

При изготовлении деталей по этой схеме при любых условиях неизбежна конусность обрабатываемого отверстия или наружной поверхности. Это объясняется тем, что в зоне обработки наряду с необработанной частью детали постоянно находится уже обработанная ее часть, и зона взаимодействия между электродом-инструментом и деталью, простираясь на значительную длину, существенно ухудшает эвакуацию продуктов эрозии из межэлектродной зоны по мере внедрения электрода-инструмента в деталь.

Улучшить условия эвакуации продуктов эрозии в этом случае можно одним из следующих способов.

1. Торец электрода-инструмента заостряется подобно тому, как это происходит при его естественном износе по мере изготовления деталей. Этот прием приводит к существенному уменьшению времени на изготовление отверстия, особенно при малой толщине деталей (до нескольких миллиметров).

2. Длина электрода-инструмента (то есть зона взаимодействия между инструментом и деталью) выбирается минимальной.

Эта величина определяется режимом обработки и сечением обрабатываемого отверстия или стержня.

Малая зона взаимодействия между электродами (инструментом и обрабатываемой деталью) обеспечивает хорошие естественные условия для эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, а также исключает влияние износа электрода-инструмента на точность формообразования поверхности. После износа такой электрод заменяется новым, изготовленным совместно с изношенным (в одном пакете с общими базовыми поверхностями).

Длина формообразующей части электрода-инструмента определяется режимами обработки. Обычно (при заданной шероховатости обработанной поверхности $R_a = 1 - 2$ мкм) она должна быть не более 2 – 4 мм. Такая схема процесса обеспечивает высокую точность формообразования поверхностей и увеличивает интенсивность процесса благодаря улучшению условий эвакуации продуктов эрозии.

Однако, несмотря на любые усовершенствования, метод изготовления деталей копированием профиля электрода-инструмента имеет существенные недостатки:

- необходимо применять электрод-инструмент, точно воспроизводящий профиль изготавливаемой детали;
- электродом-инструментом определенного профиля можно изготовить деталь только подобного профиля;
- формообразование электродов-инструментов очень трудоемко;
- невозможно изготовить электроды с острыми углами (радиусами меньше 0,03 мм);
- необходима точная выверка оси электрода-инструмента с направлением его движения (подачи). Этим недостатком лишен метод изготовления деталей непрофилированным обрабатывающим электродом-инструментом – тонкой проволокой, непрерывно движущейся с определенной скоростью вдоль своей оси.

Идея применения в качестве электрода-инструмента непрерывно перематывающейся проволоки для разрезания металлов была высказана еще в 1945 г. Г.Л. Перфильевым и Б.В. Бауэром, но ее практическое осуществление стало возможным лишь в середине 50-х годов после проведения ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ГС НИИ по радиоэлектронике (ныне ГНПП «Исток») [1, 2].

При формообразовании поверхностей электродом-проволокой обеспечиваются наилучшие (естественные) и постоянные условия эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, а также наиболее полно реализуются преимущества электроискрового способа обработки.

При этом действие электрических разрядов сосредотачивается на узком участке площадью от 0,002 до нескольких десятков квадратных миллиметров (в зависимости от диаметра проволоки и толщины обрабатываемой детали) и подлежат удалению (превращению в «стружку») минимальные объемы обрабатываемого материала.

1.4.3. Условия и способы формирования импульсов напряжения, исключаящие возникновение электрохимических процессов при обработке в воде

Электроискровая обработка в воде в случае применения генераторов импульсов, формирующих на межэлектродном промежутке (МЭП) холостые импульсы напряжения с постоянной составляющей, сопровождается электролизом воды и связанными с ним нежелательными электрохимическими явлениями на электродах [19 – 21]: неуправляемым процессом электрохимического растравливания обработанной поверхности, приводящим к потере точности; повышенной коррозии или окислению обрабатываемых деталей; невозможности обработки молибдена и его сплавов в связи с появлением на их поверхности диэлектрической оксидной пленки.

Для устранения этих недостатков, исходя из общих соображений, известных в электрохимии и заключающихся в том, что для устранения электролиза воды необходимо через воду пропускать переменный ток, Е.И.Слепушкиным, В.М.Щитовой и др. в 1972 г. был предложен способ электроэрозионной обработки с использованием разнополярных импульсов напряжения, у которых соблюдается равенство средних значений за период импульса положительного и отрицательного напряжений.

Иначе говоря, последовательность разнополярных импульсов не должна содержать постоянной составляющей напряжения (среднее напряжение равно нулю, площадь положительного импульса за один период должна быть равна площади отрицательного импульса на временной эпюре импульсов напряжения, подаваемых на МЭП). Это условие было отнесено к импульсам напряжения прямоугольной, ступенчатой или гребенчатой форм большой длительности.

Однако при использовании таких импульсов не удастся исключить электролиз обычной воды из водопровода, имеющей проводимость в пределах 50 – 100 мкСм.

Позже установлено [20], что для устранения нежелательных электрохимических явлений при электроискровой обработке в воде не обязательно соблюдать равенство нулю постоянной составляющей последовательности, содержащей и холостые, и рабочие импульсы напряжения. Достаточно, чтобы последовательность холостых импульсов напряжения не содержала постоянной составляющей, так как при возникновении искрового разряда между электродами напряжение на межэлектродном промежутке резко уменьшается, весь ток проходит через канал пробоя, поэтому электрохимические процессы в окружающей среде практически исчезают.

При возникновении искрового разряда между электродами напряжение на МЭП резко уменьшается, весь ток проходит через канал пробоя и концентрируется в рабочей зоне. Поэтому электрохимические процессы в окружающей среде практически исчезают.

Очевидно, что для обеспечения направленности электроискрового процесса у последовательности биполярных импульсов напряжения амплитуда положительного импульса должна быть

значительно больше амплитуды отрицательного. В этом случае вероятность пробоя промежутка при действии положительного импульса напряжения значительно больше, чем у отрицательного импульса.

Если исходить из того, что вероятность пробоя среды прямо пропорциональна времени присутствия на электродах пробивного напряжения, то положительные импульсы напряжения должны быть прямоугольной формы, так как у них по сравнению с импульсами любой другой формы (одинаковой длительности, измеренной по нулевому уровню) время присутствия на электродах пробивного напряжения максимальное.

Установлено [20], что при прецизионной обработке в воде наиболее подходящими импульсами напряжения являются биполярные, у которых амплитуда положительного импульса не менее чем в два раза больше амплитуды отрицательного, а форма положительного и отрицательного импульсов близка к прямоугольной.

Анализируя особенности обработки в воде, отметим еще одно очень важное обстоятельство.

Несмотря на то, что удельное сопротивление воды значительно меньше удельного сопротивления таких жидкостей, как масло или керосин, оно, тем не менее, составляет величину порядка $10^4 - 10^5$ Ом·см, что во много раз больше внутреннего сопротивления источника рабочих импульсов. Следовательно, величина тока определяется не внутренним сопротивлением источника рабочих токовых импульсов, как при пробое промежутка, а значительным сопротивлением среды. При этом ток, протекающий через МЭП в холостом режиме работы, практически равен нулю.

Исследования показали, что генераторы импульсов с индуктивными формирователями подают на электроды импульсы напряжения, не содержащие постоянной составляющей, в результате чего практически исключаются нежелательные электрохимические процессы при электроискровой обработке в воде и возможность случайного поражения оператора электрическим током [19, 21].

Установлено, что обнаруженное явление уменьшения амплитуды рабочего тока через МЭП при увеличении запаздывания начала пробоя промежутка от начала импульса напряжения на электродах, связано с возрастанием тока, протекающего через индуктивность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Труды НИИ МРТП СССР. 1957. №11(47). С. 67–88.
2. Ставицкий Б.И. Исследование возможности применения электроискровой обработки для изготовления прецизионных деталей электровакуумных приборов. Канд. дис., ГС НИИ ГК СМ СССР по радиоэлектронике. Фрязино, 1958.
3. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Практика применения электроискровой обработки металлов. Сб. № 2. МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. 1959. С. 35–52.
4. Ставицкий Б.И. Электроискровое формообразование наружных и внутренних поверхностей непрофилированным электродом // Технология машиностроения. ЦИНТИМАШ. 1960. № 3. С. 42–47.
5. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление деталей непрофилированным обрабатывающим электродом // Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. 1960. № 3–4.
6. Ставицкий Б.И. Электроискровое изготовление прецизионных деталей электровакуумных приборов // Электроискровая обработка металлов. Вып. 2. АН СССР. 1960. С. 67–113.
7. Ставицкий Б.И. К вопросу об электрической эрозии токопроводящих материалов при искровых разрядах малой энергии и длительности // Электронная обработка материалов. 1969. №2. С. 11–14.
8. Ставицкий Б.И. Об электрической эрозии низкоомных полупроводниковых материалов при малых энергиях и длительностях искрового разряда // Электронная обработка материалов. 1969. №4. С. 3–5.
9. Stavitskii B. I. Electrical Erosion of Low-Resistance Materials Presence of Low Energy Sparcover Duration // Applied electrical phenomena, Consultants bureau. Translated from Elektronnaya obrabotka materialov. № 4 (28). P. 3–5. July - August 1969.
10. Ставицкий Б.И., Безрук А.И. Влияние величины межэлектродного промежутка на эффект эрозии и распределение энергии между анодом и катодом // Электронная обработка материалов. 1969. № 5. С. 7–14.
11. Безрук А.И., Пушков Ю.Т., Ставицкий Б.И. Электрическая эрозия при одиночных униполярных импульсах малой энергии и длительности // Электронная обработка материалов. 1971. № 1. С. 3–7.

12. Ставицкий Б.И. К вопросу о влиянии удельной мощности искрового разряда на величину микрозаусенцев и интегральный эффект эрозии // Электронная обработка материалов. 1972. № 1. С. 3–9.
13. Ставицкий Б.И., Ставицкая Н.Б. Основные особенности электроискровой прецизионной обработки материалов // Электронная обработка материалов. 1979. № 4. С. 5–9.
14. Ставицкий Б.И., Ставицкая Н.Б. Исследование форм и размеров эрозионных лунок, образованных на различных материалах искровыми разрядами // Электронная обработка материалов. 1980. № 1. С. 9–13.
15. Ставицкий Б.И. Некоторые виды оборудования для прецизионной электроискровой обработки металлов // Электронная обработка материалов. 1966. № 1. С. 11–27.
16. Stavitsky B. I. Equipment for precision electrospark machining of metals. // Applied electrical phenomena, Consultants bureau №1, 1966. Translated from Elektronnaya obrabotka materialov. №. 1, PP. 11 - 27, January – February.
17. Ставицкий Б.И. Современный уровень и перспективы развития электроискровой прецизионной обработки материалов // Электронная обработка материалов. 1967. № 5. С. 20–35.
18. Ставицкий Б.И., Конушин С.В., Пушков Ю.Т. Электроискровое формообразование деталей электродом-проволокой с применением малогабаритных транзисторных генераторов // Электронная обработка материалов. 1975. № 2. С. 5–9.
19. Ставицкий Б.И., Конушин С.В. Генераторы импульсов с индуктивными формирователями импульсов напряжения на межэлектродном промежутке // Электронная обработка материалов. 1978. № 1. С. 14–17.
20. Ставицкий Б.И., Конушин С.В. К вопросу об оптимальной форме холостых импульсов напряжения и рабочих импульсов тока при прецизионной электроискровой обработке в воде // Электронная обработка материалов. 1979. № 3. С. 5–8.
21. Ставицкий Б.И., Конушин С.В. Некоторые особенности работы транзисторных генераторов с индуктивно-емкостными формирователями для прецизионной электроискровой обработки // Электронная обработка материалов. 1979. № 3. С. 8–13.

Поступила 27.09.2001

Summary

The memoir is devoted to scientific fundamentals of a precision electric-spark processing of materials. The original technique of researches is used. The influence of an interelectrode gap to effect of erosion and distribution energy between the anode and cathode, role of delay of a beginning of a spark discharge on effect of erosion is noticed. The outcomes of research of the shapes and sizes erosive craters, making on different materials and also influence of the interelectrode environment to effect of erosion of electrodes are considered. The influence of a specific power of a spark discharge to magnitude micro rough edges and effect of erosion is resulted; conditions of evacuation of products of erosion on the process electrospark forming. The conditions and ways of pulse forming of voltage pulses, eliminating origin of electrochemical processes at handling in water are stipulated.
