

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 маломощных 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, бориды 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).

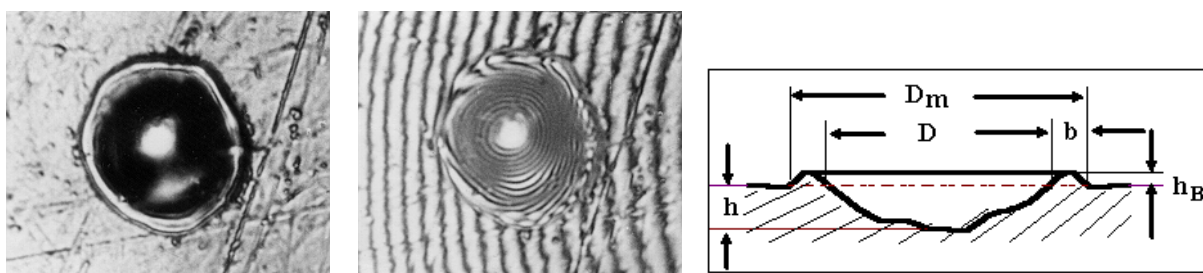


Рис.1. Внешний вид и сечение лунки, образовавшейся на поверхности меди в результате искрового разряда между электродами ($W_0 = 250$ мкДж; $t_u \approx 0,5$ мкс).

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 размере 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:

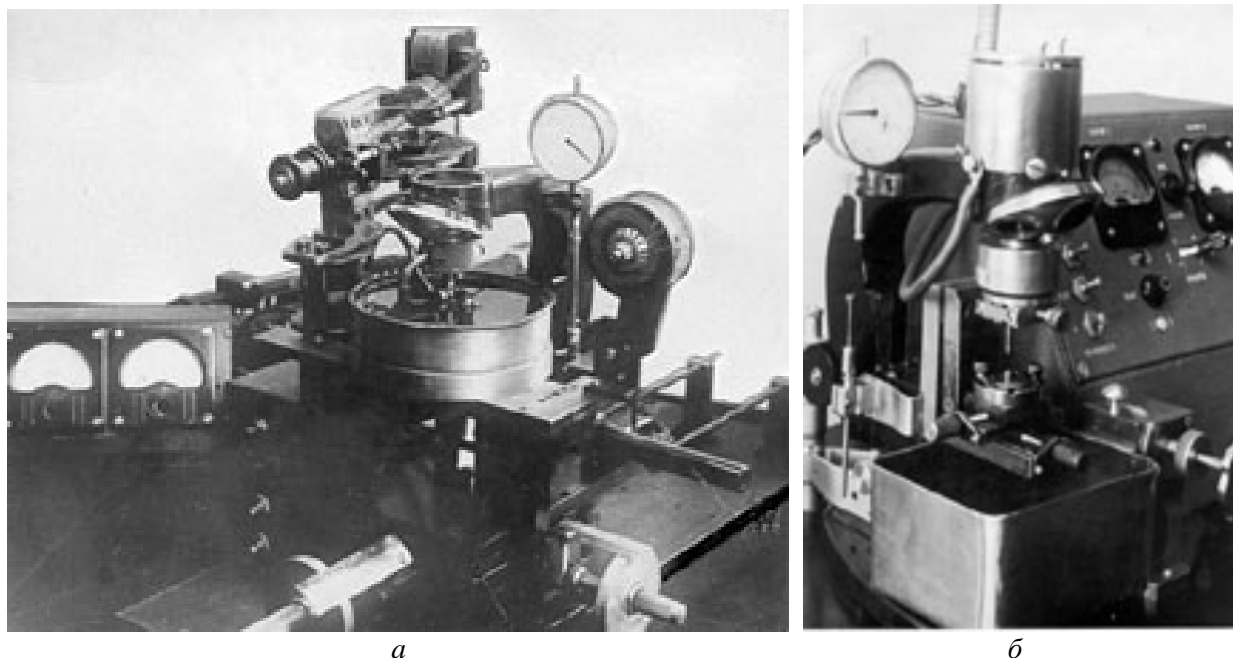


Рис. 2. Первые электроискровые прецизионные установки для изготовления миниатюрных деталей электронных приборов:

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.

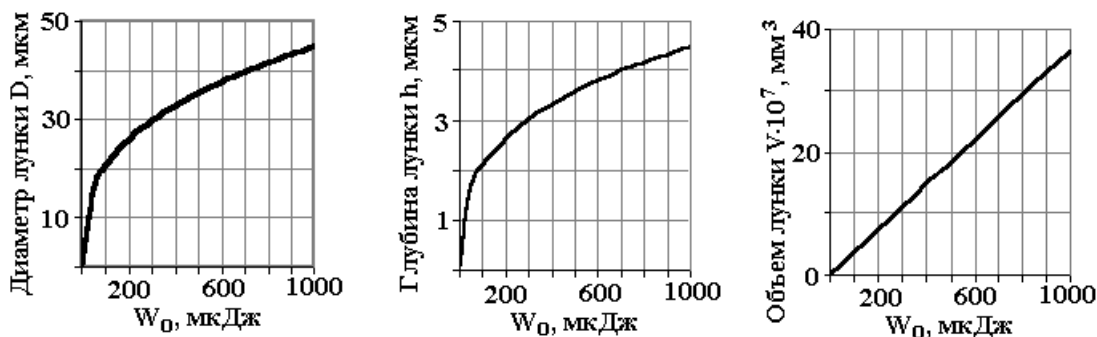


Рис. 3. Зависимость диаметра D , глубины h и объема V лунки от энергии импульса W_o (для $k_d = 4,5$; $k_h = 0,45$ и $k_\phi = 0,4$).

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 микроразрывов 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;

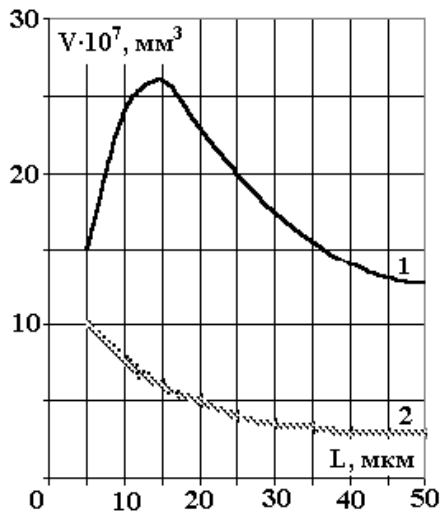


Рис. 4. Зависимость от межэлектродного промежутка L объемов лунок V_a (1) и V_k (2) при $W_o = 500$ мкДж.

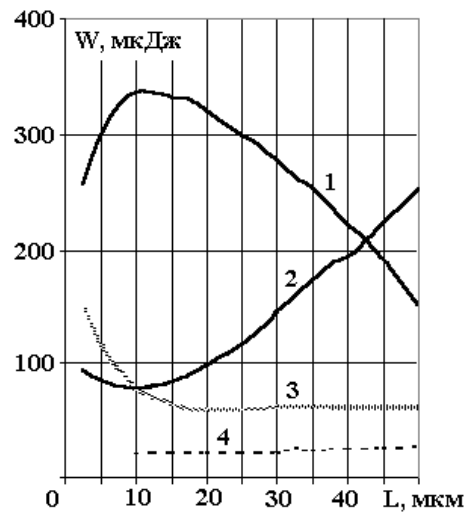


Рис.5. Зависимость от межэлектродного промежутка L составляющих энергии импульса W_o : энергии разряда W_p (1), потерь энергии W_n (2), затрат энергии на образование канала W_k (3), затрат энергии на затухание разряда W_s (4).

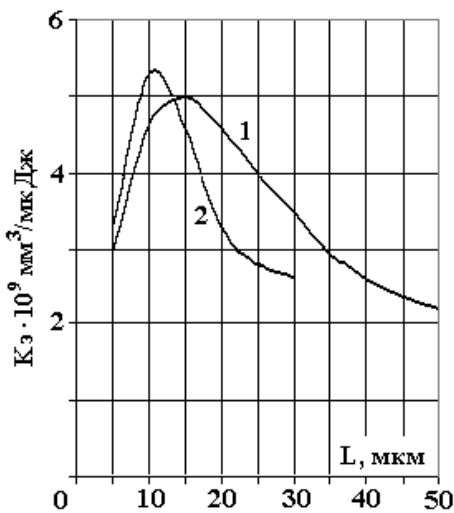


Рис.6. Зависимость от межэлектродного промежутка L удельной эрозии K_s на аноде при энергии импульсов $W_o = 500$ (1) и 150 (2) мкДж.

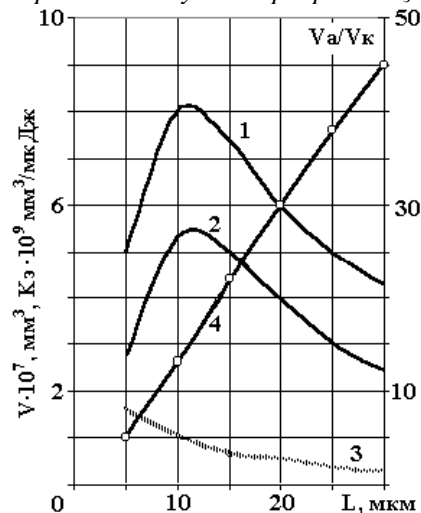


Рис.7. Зависимость от межэлектродного промежутка L объемов лунок V_a (1) и V_k (3), их отношения V_a/V_k (4) и удельной эрозии K_s (2) при энергии импульсов $W_o = 150$ мкДж.

– влияние межэлектродного промежутка (напряжения на электродах) в реальных условиях электроискровой обработки на изменение глубины лунки h , отношения D/h и удельной эрозии K_s , 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.

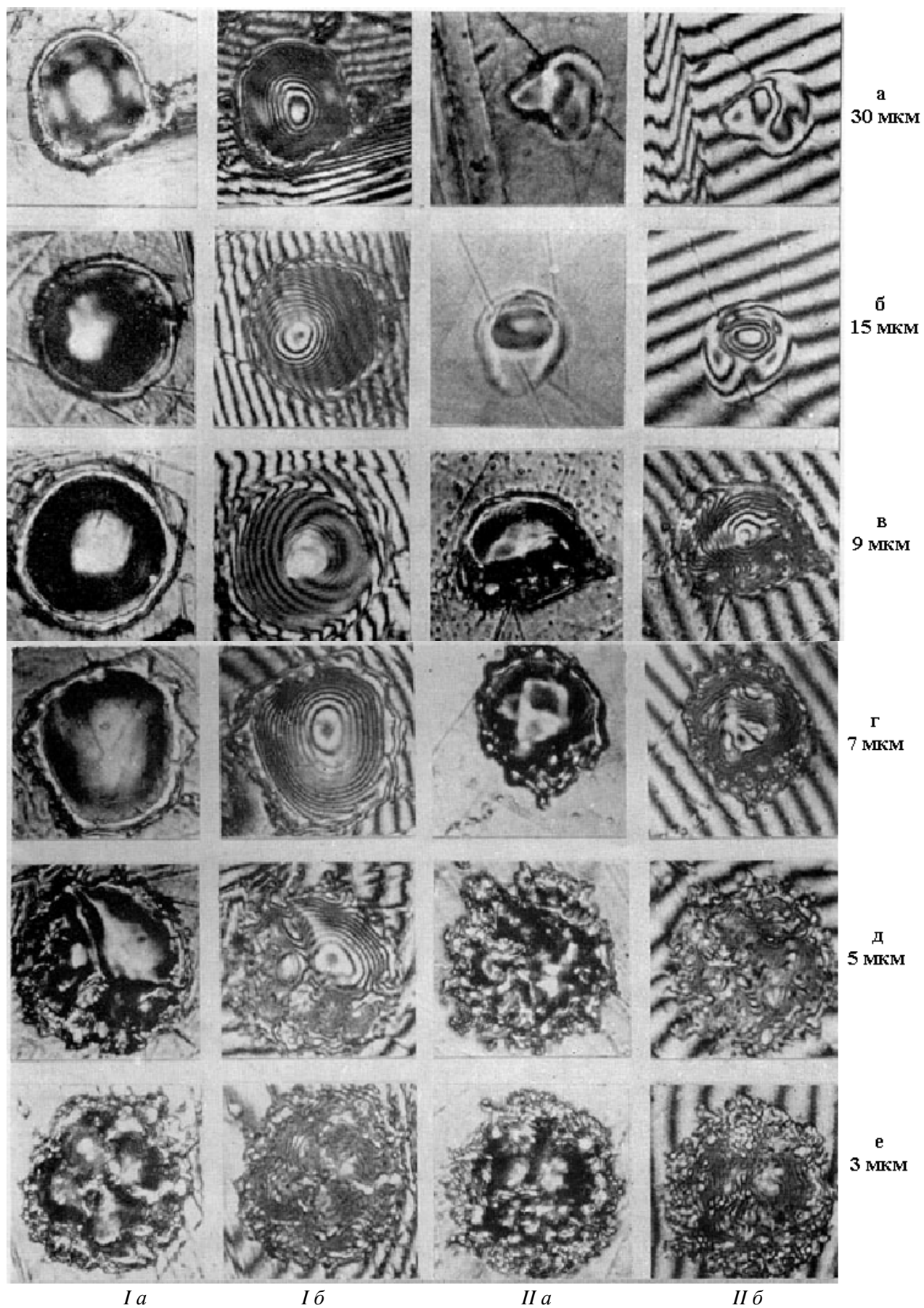


Рис.8. Фотографии лунок на аноде (I а, I б) и катоде (II а, II б).
 Межэлектродные промежутки L , мкм: а - 30, б - 15, в - 9, г - 7, д - 5, е - 3. $W_0 = 150$ мкДж.

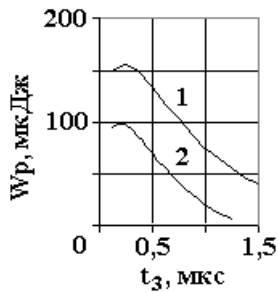


Рис.9. Зависимость энергии разряда W_p от времени его запаздывания t_3 при $t_o = 2,5$ (1) и $1,5$ (2) мкс.

– 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 .

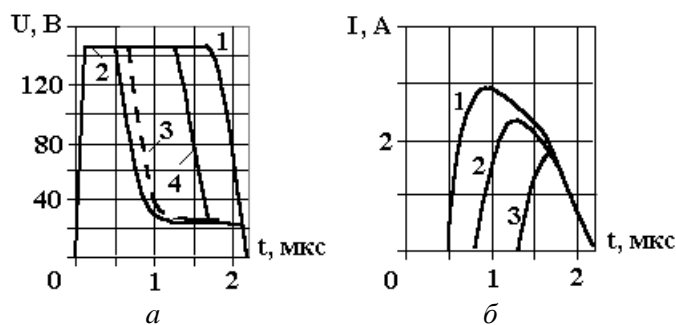


Рис.10. Эпюры импульсов напряжения U на электродах (а) и импульсов тока I (б) с различным запаздыванием разрядов, мкс: 0,5 ($U1, I1$), 0,7 ($U2, I2$), 1,25 ($U3, I3$).

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.

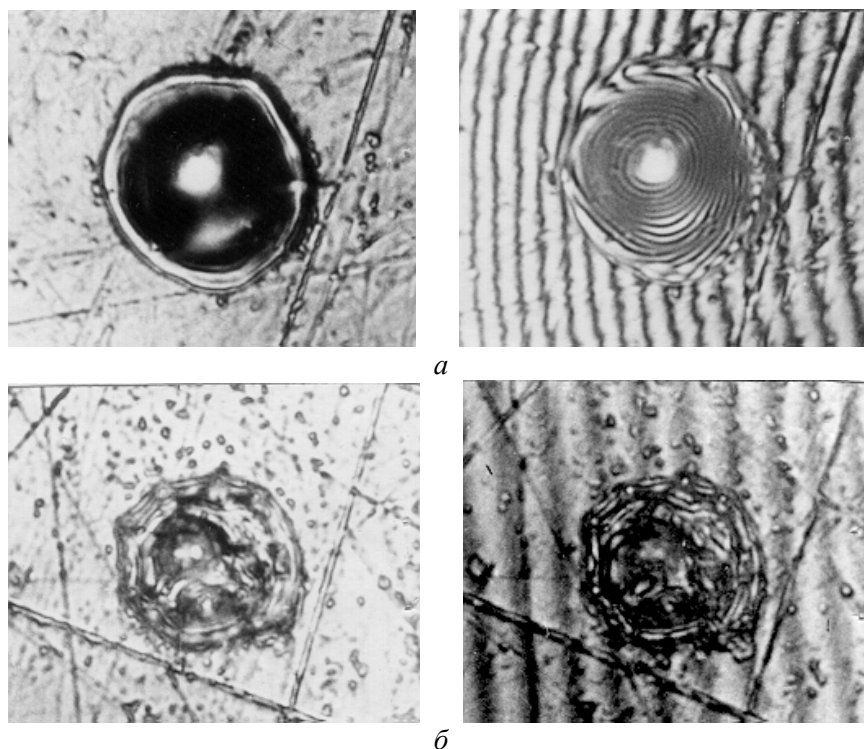


Рис. 11. Следы эрозии на аноде (а) и катоде (б) при запаздывании начала разряда. $t_3 = 0,2$ мкс.

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).

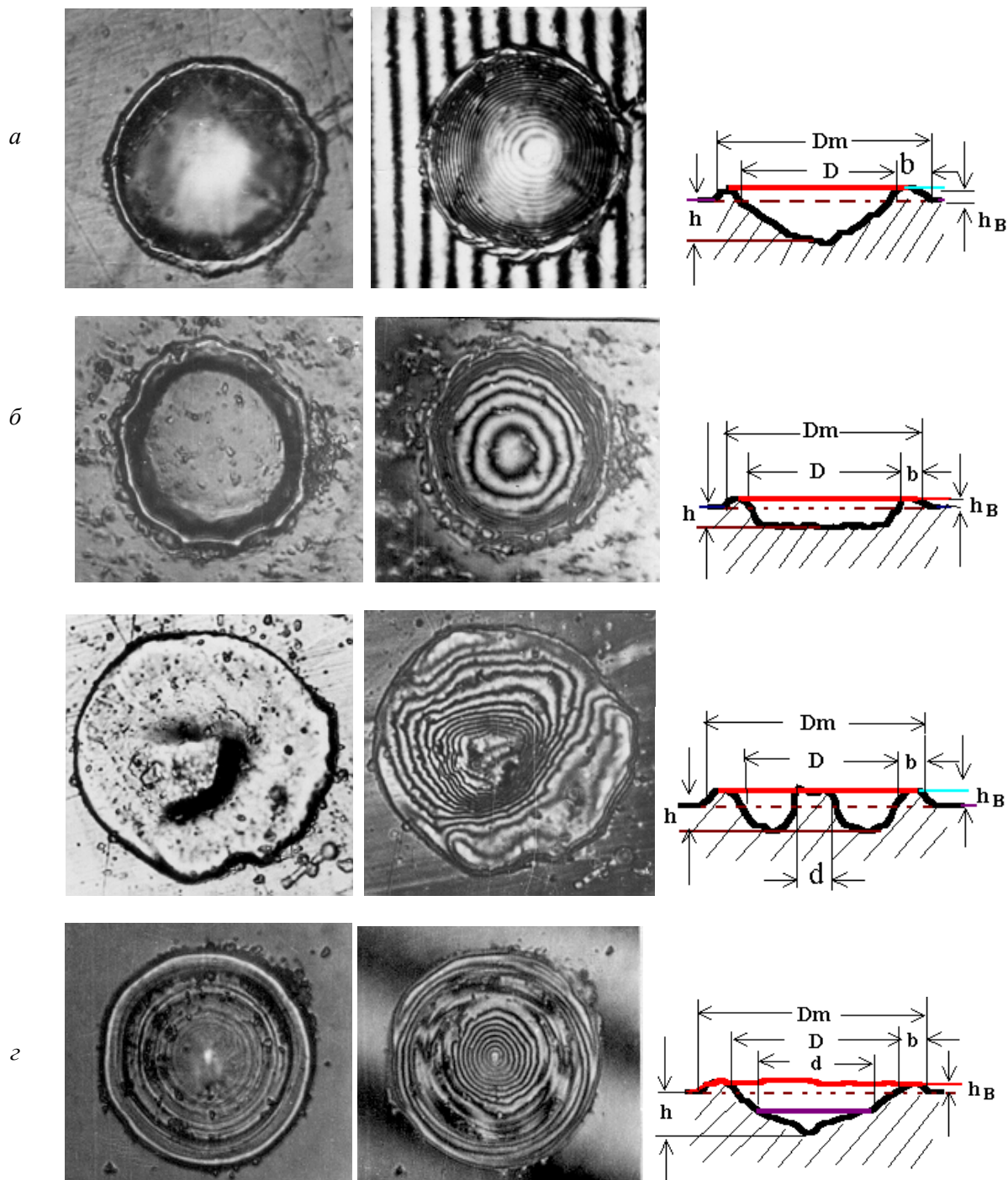


Рис. 12. Внешний вид и сечения лунок, образованных на различных материалах: меди (а), монокристаллическом вольфраме (б), стали (в), кремнии (г) при $W_o = 250$ мкДж, $U_o = 100$ В.

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

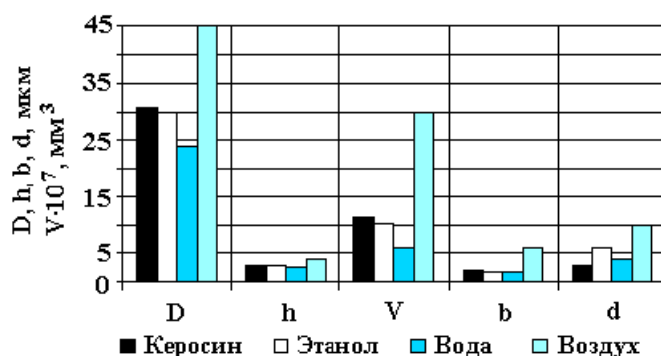


Рис. 13. Зависимость параметров лунок от межэлектродной среды.

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.

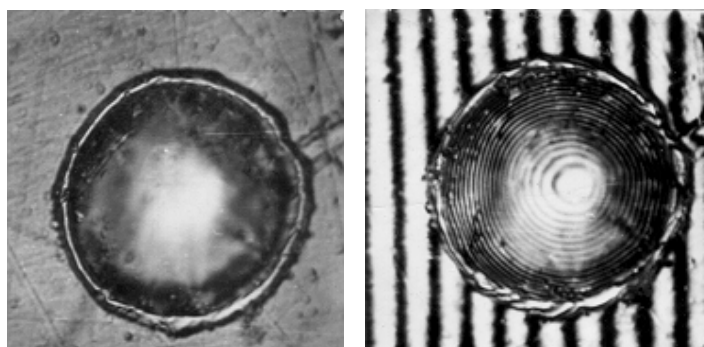
Полученные результаты исследований не противоречат тому факту, что электроискровое изготовление деталей эффективнее в жидких, а не в газообразных средах и процесс формообразования поверхностей более производителен в воде, а не в керосине.

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.

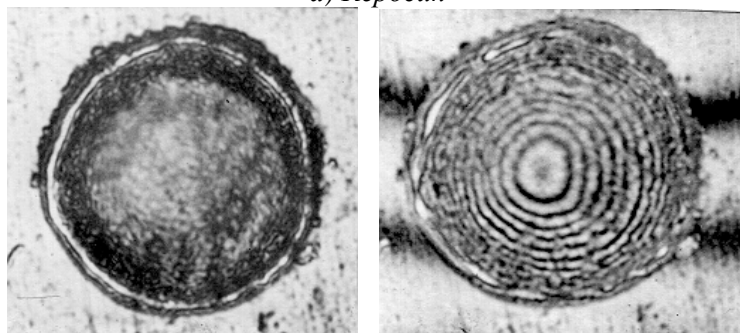
Традиционно в качестве межэлектродной среды при электроискровой обработке используются углеводородные жидкости (например, керосин).

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.

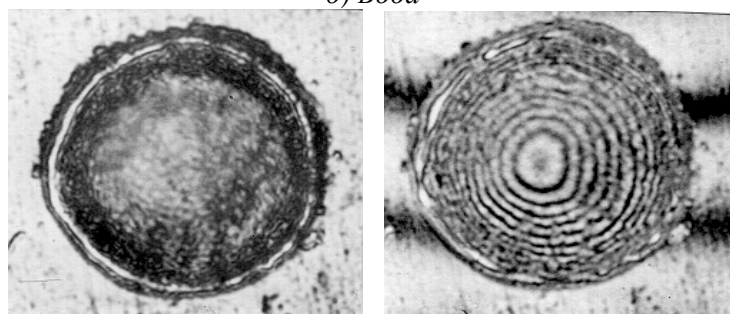
Поэтому при обработке в керосине в зоне обработки выделяется огромное количество твердых продуктов его разложения (в дополнение к металлу, выбрасываемому из зоны поражения разрядом), которые интенсивно забивают межэлектродное пространство, существенно ухудшают условия эвакуации продуктов эрозии из зоны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



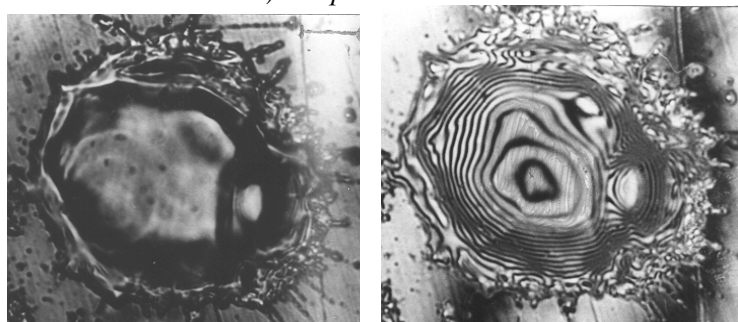
а) Керосин



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).

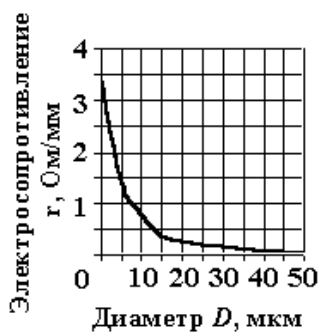


Рис.15. Зависимость электросопротивления r вольфрамовой проволоки ВА-3 от диаметра D .

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).

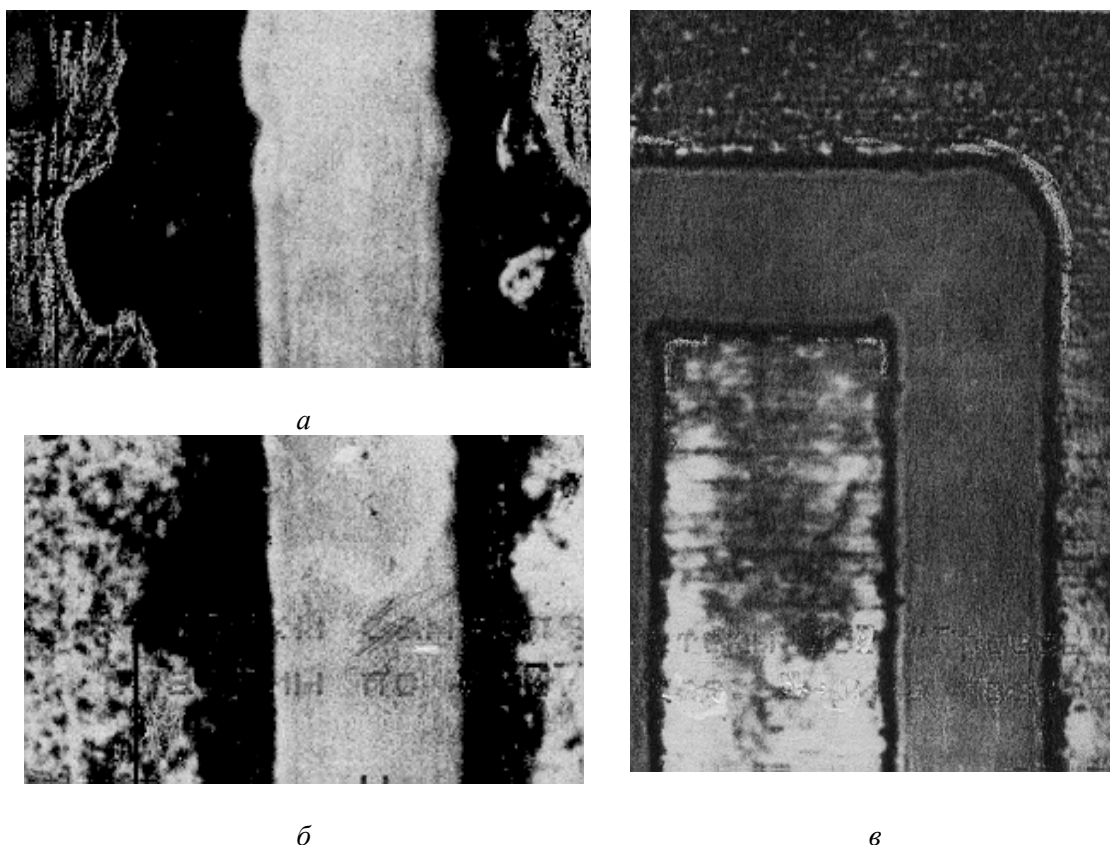


Рис.16. Участки пазов в пакетах из пяти медных пластин толщиной 0,07 мм каждая. Ширина пазов – 0,06 мм. Электрод-проволока МЧ $\varnothing 0,05$ мм. Режим обработки: $U_o = 80$ В, $t_n = 1,4$ мкс, $f_o = 350000$ 1/с. Межэлектродная среда – вода дистиллированная. $C_{ш}$, пФ = 0 (а), 1000 (б), 3000 (в).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

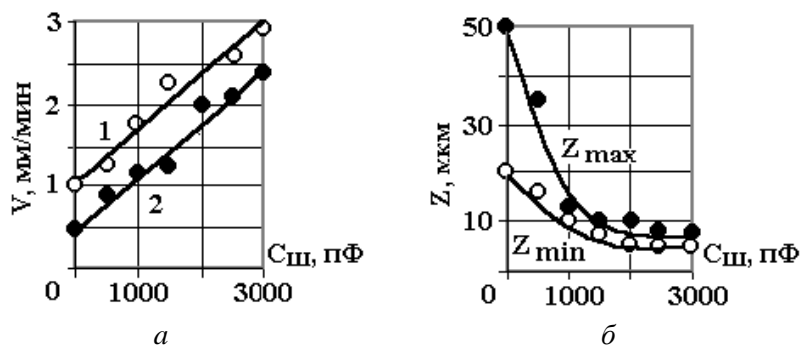


Рис. 17. Влияние $C_{ш}$ на скорость прорезания пазов V при $U_o = 80$ (1) и 64 (2) В (а), размер заусенцев Z при $U_o = 64$ В (б).

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.

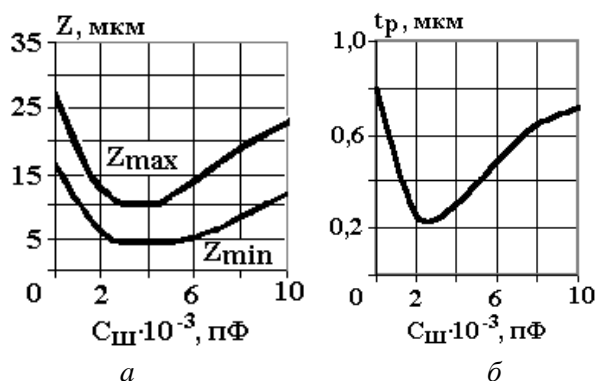


Рис. 18. Зависимость от емкости $C_{ш}$ размеров микрозаусенцев Z (а) и длительности искровых разрядов t_p (б) (электрод-инструмент – молибденовая проволока МЧ диаметром 0,05 мм; материал детали – медь МБ толщиной 2 мм; $U_{ист} = 800$ В; $C_n = 550$ пФ; $f=88000$ 1/с).

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.

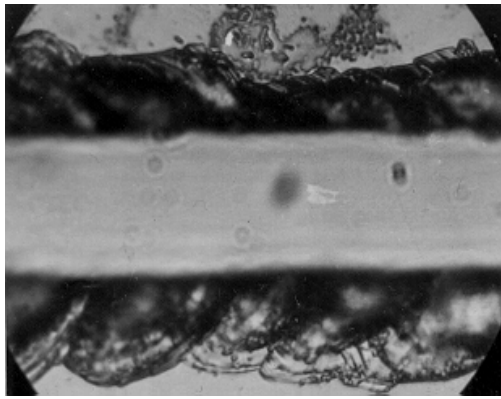
Анализируя результаты исследования влияния удельной мощности искровых разрядов на размер микрозаусенцев и скорость формообразования, можно сделать следующие выводы.

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.

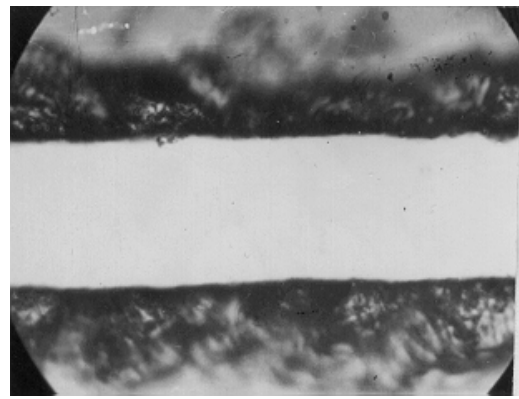
Размеры заусенцев можно прогнозировать по размерам валиков, образующихся вокруг лунок и возникающих на поверхности после искровых разрядов.

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.



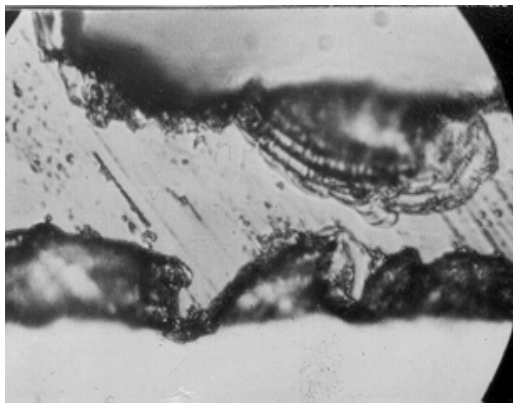
a

(сфокусировано на верхнюю поверхность)

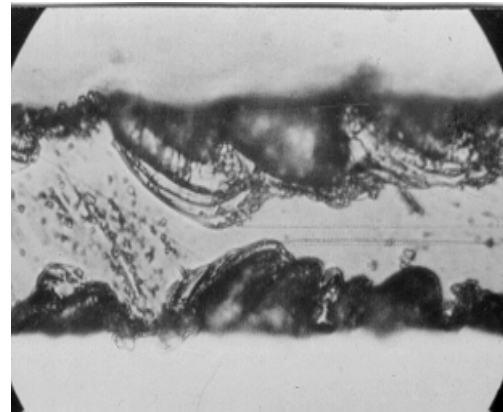


б

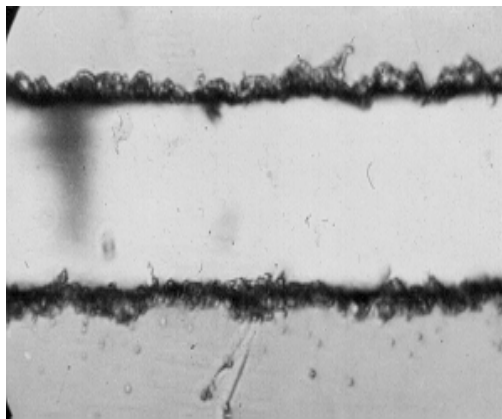
(сфокусировано на нижнюю поверхность)



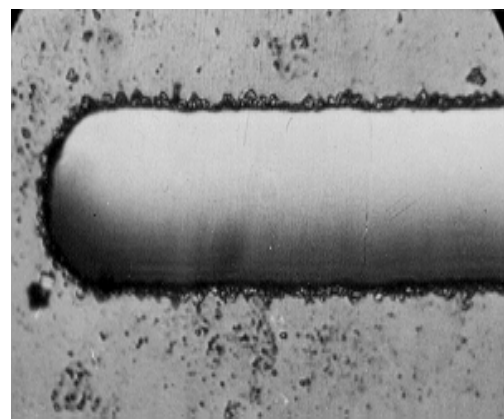
в



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.

Г.А. Бовкун, А.В. Лаптев, Ю.Г. Ткаченко, Л.М. Юрчук

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ИХ ЭРОЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины,
ул. Кржижановского, 3, г. Киев-142, 03142, Украина*

Введение

В литературе накоплен обширный материал о зависимости эрозионных характеристик электродных материалов, в частности твердых сплавов, от состава, структуры и напряженного состояния частиц твердой фазы. На основании экспериментальных данных сформулирован принципиальный подход к созданию электродных материалов с высокими эрозионными свойствами, который заключается в создании материалов с ослабленной прочностью межзеренных связей. Это достигалось либо введением специальных добавок, располагающихся на межфазной границе карбид-связка [1], либо введением добавок, ухудшающих смачивание карбида вольфрама кобальтом [2], либо использованием особого режима спекания [3]. Следует отметить, что все эти подходы оказываются достаточно эффективными и позволяют в 1,5–2 раза повысить интенсивность массопереноса. Однако все эти методы модифицирования структуры и свойств твердых сплавов не позволяют вполне однозначно выявить основную причину наблюдаемого эффекта, так как обычно при использованных методах воздействия меняется не только структура сплава, но и его химический состав. При этом существует способ воздействия на твердые сплавы, который не приводит к изменению химического состава сплава, дисперсности структурных составляющих, но существенно изменяет качество межфазных контактов. Это метод высокоэнергетического термомеханического воздействия, заключающийся в том, что заготовка спеченного твердого сплава подвергается действию высоких давлений порядка 1–1,2 ГПа. Для сплавов, предварительно спеченных при температурах ниже температуры достижения плотного состояния, такое воздействие приводит к резкому увеличению количества и повышению качества межфазных контактов, проявляющееся в повышении механической прочности, электропроводности, а для сплавов, спеченных при более высоких температурах – к разрушению сформировавшейся в процессе спекания структуры и формированию качественно новой структуры и всего комплекса физико-механических свойств [4].

Целью настоящего исследования было изучение влияния высокоэнергетической термомеханической обработки (ВТМО) на эрозионные свойства твердых сплавов.

Методика эксперимента

В качестве объектов исследования выбран твердый сплав ВК16М. Твердосплавная смесь получена путем смешивания в шаровом барабане в течение 24 часов в среде ацетона стандартной мелкозернистой смеси ВК6М и порошка кобальта. Удельная поверхность измельченной порошковой смеси S составляла 1,9 м²/г, что соответствует условному диаметру частиц карбида вольфрама $d_{WC} = 0,22$ мкм. Из полученной шихты без пластификатора при давлении 100 МПа прессовали при комнатной температуре цилиндрические брикеты диаметром 25 мм. Брикеты имели пористость 55%. Такие брикеты загружали в нагревательную камеру установки для высокоэнергетической термомеханической обработки и осуществляли консолидацию сплава по двум технологическим схемам. В первом случае брикеты нагревали до заданной температуры и выдерживали при этой температуре, то есть

образцы практически спекались без приложения внешнего давления. Во втором случае образцы после нагрева и изотермической выдержки при заданной температуре подвергали операции ВТМО. В дальнейшем образцы, полученные по первой технологической схеме, будем называть спеченными, а по второй – обработанными давлением. Температуры консолидации образцов составляли 950, 1050, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350 °С, а длительность изотермической выдержки при этих температурах во всех случаях составляла 15 мин. После термомеханической обработки образцы имели диаметр 25–26 мм и высоту 10–13 мм в зависимости от условий изготовления. Нагрев образцов, спекание, ВТМО и охлаждение проводили в вакууме 0,133 Па. Часть образцов подвергали изотермическому отжигу при температуре 1150 °С в течение 4 часов. Полученные брикеты разрезали электроискровым способом на прямоугольные штабики размером 5x5x25 мм (для измерения прочности при изгибе) или 5x2x25 мм (для определения трещиностойкости сплавов). Все штабики подвергали алмазной шлифовке. Для всех образцов определяли плотность γ , удельное электросопротивление ρ , проводили анализ открытой пористости сплавов, определяли предел прочности при изгибе и трещиностойкость, изучали структуру сплавов на полированных образцах и на поверхностях изломов; эти данные приведены в работе [5].

Эрозионные характеристики твердых сплавов изучали при проведении процесса электроискрового легирования на установке ЭИЛВ-8 при следующих параметрах процесса: $C = 150$ мкФ, сдвоенный импульс, мощность режима $N = 60$ Вт, амплитуда вибрации электрода задается мощностью управляющего сигнала, подаваемого на катушку вибратора, а именно: 15,5 В, частота следования электрических импульсов $\nu = 250$ Гц. В процессе исследования определяли эрозию материала анода Δ_a , прирост массы катода Δ_k , коэффициент переноса $K = \Delta_k/\Delta_a$. В качестве подложки использовали сталь 45 нормализованную, длительность процесса легирования составляла 5 мин/см². Качественные характеристики покрытий (толщина, твердость) изучали на металлографических шлифах, фазовый состав поверхностных слоев исследовали на микроанализаторе ДРОН-0,5 в Cu-K α излучении.

Результаты

Изучение качественных характеристик защитных покрытий, нанесенных электродными материалами, изготовленными по различным технологическим схемам, показало, что фазовый состав покрытий практически не зависит от метода изготовления электродного материала. По данным рентгеновского анализа в покрытии обнаружены фазы WC, W₂C, γ -Fe. Твердость защитного покрытия составляет 17–18 ГПа, несколько снижаясь с повышением температуры консолидации твердого сплава, а его толщина колеблется в диапазоне 25–50 мкм в зависимости от температуры консолидации твердого сплава и последующей термомеханической и термической обработки.

Экспериментальные данные об эрозионных характеристиках исследованных сплавов, полученных по различным технологическим схемам, приведены на рис. 1–3.

Обсуждение

Видно, что для образцов, изготовленных в температурном диапазоне 1250–1350 °С, эрозионные характеристики практически не зависят ни от метода консолидации, ни от последующего изотермического отжига. Для сплавов, изготовленных в температурном диапазоне 950–1250 °С спеканием с последующей ВТМО, эрозионная стойкость всегда выше по сравнению со стойкостью спеченных при этих температурах сплавов тем в большей степени, чем ниже температура консолидации. Значения прироста массы катода для обработанных давлением сплавов, изготовленных в температурном диапазоне 950–1250 °С, также превышают значения Δ_k спеченных сплавов.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует также о том, что независимо от метода консолидации значения эрозионных характеристик неотожженных сплавов (Δ_a и Δ_k) монотонно увеличиваются по мере снижения температуры консолидации. Существенно иной характер зависимости эрозионных свойств от температуры консолидации наблюдается для сплавов, полученных любым из описанных способов и подвергнутых длительному изотермическому отжигу при $T = 1150$ °С. Во-первых, сплавы, изготовленные при температурах 950–1250 °С, подвергнутые ВТМО и последующему изотермическому отжигу, имеют практически неизменные значения эрозионных свойств, соответствующие свойствам сплавов, изготовленных при температурах 1250–1300 °С, в то время как для спеченных и отожженных сплавов характерно повышение значений Δ_a и Δ_k при снижении температуры спекания.

Во-вторых – для всех сплавов на кривых Δ_a , $\Delta_k - f(T_{конс.})$ имеются характерные перегибы при $T=1200^\circ\text{C}$ для спеченных сплавов и $T = 1250^\circ\text{C}$ для обработанных давлением сплавов, причем эти перегибы достаточно отчетливо проявляются на кривых $\Delta_k - f(T_{конс.})$ и менее заметны на кривых $\Delta_a - f(T_{конс.})$. Именно при этих температурах мы наблюдаем резкое уменьшение значения коэффициентов переноса для сплавов, изготовленных по любой технологической схеме (рис. 3). Причиной наблюдаемой зависимости может быть то, что отжигу подвергаются сплавы в различном структурном состоянии. В первом случае – отжигают предварительно спеченные сплавы со сформированной, характерной для каждой температуры консолидации субструктурой, во втором - сплавы, ранее сформированные в процессе спекания, структура которых в результате ВТМО разрушена. И если в первом случае наблюдается эффект наследственности по структуре и свойствам, то во втором случае окончательная структура сплавов, а значит, и комплекс свойств, формируются уже в процессе длительной изотермической выдержке при $T = 1150^\circ\text{C}$.

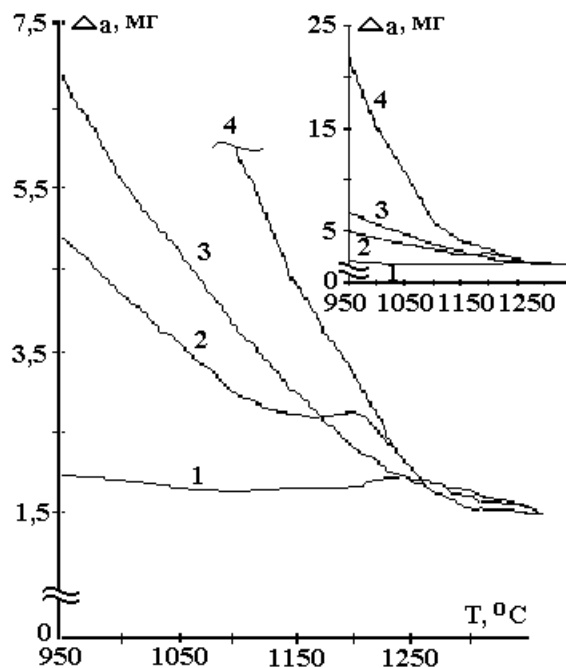


Рис. 1. Зависимость потери массы эрозии твердых сплавов от температуры консолидации.

1, 3 – спеченные и подвергнутые ВТМО; 2, 4 – спеченные;
1, 2 – отожженные; 4, 3 – неотожженные.

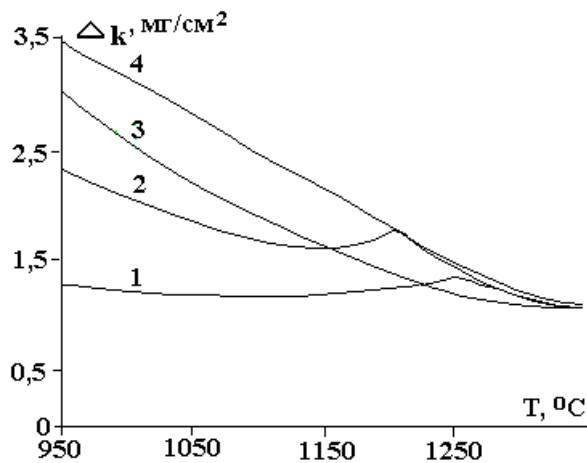


Рис. 2. Зависимость прироста массы катода от температуры консолидации твердого сплава.

1, 3 – спеченные и подвергнутые ВТМО; 2, 4 – спеченные; 1, 2 – отожженные,
4, 3 – неотожженные.

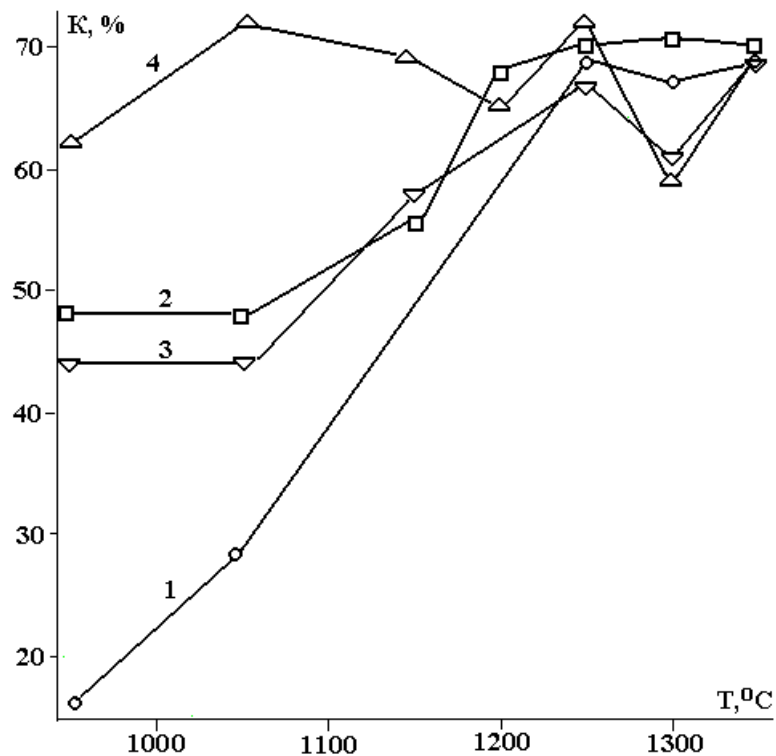


Рис.3. Зависимость коэффициента переноса K от температуры консолидации твердых сплавов.
 1, 2 – спеченные; 3, 4 – спеченные и подвергнутые ВТМО; 1, 3 – неотожженные;
 2, 4 – отожженные.

Для выяснения природы обнаруженных закономерностей целесообразно привлечь к рассмотрению зависимости механических свойств исследованных материалов от способа и температуры консолидации, от последующего изотермического отжига. В работе [4], посвященной изучению закономерностей твердофазной консолидации мелкозернистого твердого сплава ВК16М, показано, что с повышением температуры консолидации для всех сплавов наблюдается снижение пористости, размера поровых каналов, повышение прочности, трещиностойкости, удельного электросопротивления. Кроме того, авторы установили, что температуры 1200–1250 °C являются критическими для всех структурных и прочностных характеристик твердых сплавов. При этих температурах наблюдается резкий излом на кривых K_{1C} , $\sigma_{изг}$, $f(T_{конс.})$. Кроме того, по данным Оже-спектроскопии изломов образцов, позволяющим судить о степени межфазной когезии в твердых сплавах, видно, что и по состоянию межфазных границ температуры 1200–1250 °C являются специфическими для исследованных материалов. Авторы связывают наблюдаемые закономерности с явлениями рекристаллизации зерен карбида вольфрама при температуре 1200 °C. Именно при этой температуре в сплавах наблюдается аномальный рост частиц WC, резко повышается относительная плотность, прочность, трещиностойкость, уменьшается удельное электросопротивление. Было бы понятно, если бы и эрозионная стойкость сплавов, изготовленных при этой температуре, тоже повышалась. Но экспериментально это не фиксируется. Эрозионная стойкость сплавов, изготовленных по любой технологической схеме, если и реагирует на температуру 1200 °C, то в противоположном от ожидаемого направлении, чего нельзя сказать о значениях прироста массы катода. Перегибы на кривых $\Delta_k - f(T_{конс.})$ выявляются достаточно надежно и отчетливо. Следует отметить, что наличие таких перегибов мы наблюдали и раньше при исследовании влияния условий изготовления и структуры твердых сплавов, как вольфрамсодержащих, так и безвольфрамовых, на их эрозионные свойства [6]. В этих работах было показано, что при температурах консолидации на 150–200° меньших температур достижения плотного состояния на кривых $\Delta_k - f(T_{конс.})$ всегда появляется перегиб. Наблюдаемые закономерности связывали с тем, что по мере снижения температуры консолидации твердых сплавов не только уменьшается их эрозионная стойкость, но и существенно изменяется размер продуктов эрозии материала анода. Плохо спеченные образцы практически рассыпаются при использовании их в качестве материала анода в процессе электроискрового легирования. Осколки размером от 0,2 до нескольких миллиметров (в зависимости от температуры консолидации и остаточной пористости) при переходе через

искровой промежуток не разогреваются до необходимых температур и не закрепляются на подложке. Это приводит к заметному снижению коэффициента переноса и при монотонном повышении значений Δ_a по мере снижения температуры консолидации на кривой $\Delta_k - f(T_{\text{конс.}})$ наблюдается характерный перегиб. Таким образом наличие перегибов на кривых Δ_a , $\Delta_k - f(T_{\text{конс.}})$ все же связано с изменением структурного состояния сплавов, изготовленных при различных температурах, и с изменением их механических свойств в диапазоне температур консолидации 950–1250°C, однако явления рекристаллизации частиц WC в сплавах, изготовленных при температурах равных или выше 1200°C в данном случае не оказывают заметного влияния на их эрозионные свойства. Почему перегибы на кривых $\Delta_k - f(T_{\text{конс.}})$ четче проявляются для отожженных сплавов и почему эти перегибы значительнее для спеченных сплавов по сравнению со сплавами, обработанными давлением, по нашему мнению, связано со следующим. Исходя из данных [5], можно заключить, что степень межфазной когезии в материалах, подвергнутых ВТМО при температурах выше 1150 °С, меняется незначительно с изменением температуры консолидации и практически не зависит от последующей изотермической выдержки. И только для сплавов, изготовленных при температуре, равной или меньшей 1150 °С последующий отжиг приводит к заметному повышению отношения I_{Co}/I_w . Это свидетельствует о том, что длительный отжиг таких сплавов способствует значительному улучшению межфазной когезии как в спеченных, так и в обработанных давлением сплавах, увеличивает долю интеркристаллитного разрушения сплава по отношению к транскристаллитному. Последнее неизбежно приводит к повышению значений их прочности при изгибе, трещиностойкости, снижению интенсивности эрозии электродного материала и одновременному уменьшению размеров твердофазных продуктов эрозии. В сплавах, не подвергнутых изотермическому отжигу, подобные явления не происходят и значения их эрозионных свойств плавно изменяются при изменении температуры консолидации. Характерно, что процесс ВТМО, проведенный при любой температуре, обеспечивает значительно более высокое качество межфазных контактов и последующий изотермический отжиг не оказывает столь существенного влияния на его прочностные и эрозионные свойства.

Заключение

Таким образом, экспериментальные данные показывают, что процесс высокоэнергетической термомеханической обработки обеспечивает более высокое качество межфазных контактов во всем диапазоне температур консолидации, а длительный изотермический отжиг при $T = 1150$ °С позволяет достичь такого качества контактов, которое достигается при температурах консолидации 1250–1300 °С. Этим можно объяснить то, что эрозионная стойкость пресованных и отожженных образцов практически не меняется для сплавов, пресованных при различных температурах, а эрозионная стойкость только пресованных образцов, хотя и существенно выше, чем у спеченных сплавов, но все же снижается с уменьшением температуры консолидации. Отжиг спеченных образцов также приводит к повышению межфазной когезии в материале. Но качество контактов для спеченных и отожженных сплавов зависит от состояния контактов в исходном спеченном материале. Учитывая более высокие значения пористости сплавов, спеченных в температурном диапазоне 950–1250°C, большие значения диаметров поровых каналов, меньшие значения прочности и трещиностойкости, меньшая эрозионная стойкость спеченных сплавов оказывается закономерной.

Требуется обсуждения еще один факт. Ранее было проведено исследование эрозионной стойкости среднезернистых сплавов ВК15 и ВК15С, изготовленных по тем же технологическим схемам, что и сплав ВК16М, а именно: спеканием при температуре 1350 °С в течение 15 мин, ВТМО с последующим изотермическим отжигом. Эрозионные свойства этих сплавов изучались на той же установке при том же режиме обработки. Было установлено, что хотя механические свойства сплавов, подвергнутых ВТМО, превосходят свойства спеченных сплавов, их эрозионная стойкость ниже стойкости спеченных и отожженных сплавов. Причину этого авторы искали в особенностях напряженного состояния сплавов, подвергнутых ВТМО. Для сплавов, исследованных в настоящей работе, напряженное состояние не изучалось, однако нет оснований предполагать, что оно будет принципиально отличаться от состояния крупнозернистых сплавов ВК15, то есть напряжения в зернах карбида вольфрама в сплавах, подвергнутых ВТМО, будут значительно больше по сравнению с напряжениями в частицах WC спеченных сплавов. Тем не менее, для мелкозернистых сплавов ВК16М эрозионная стойкость спеченных и подвергнутых ВТМО сплавов практически одинакова для сплавов, изготовленных при температуре 1350 °С, и не зависит от последующей термической обработки при $T = 1150$ °С. Так как различие в содержании связки незначительно, то сплавы ВК15 и ВК16М отличаются главным образом размером частиц WC, который составляет 1,0–3,0 мкм для сплавов ВК15 и 0,5–1,0 мкм для

сплавов ВК16М. Можно предположить, что уровень микроискажений кристаллической решетки частиц карбида вольфрама в мелкозернистых сплавах, подвергнутых ВТМО, будет ниже, чем в крупнозернистых вследствие того, что меняется механизм деформации сплавов при ВТМО, а именно – для мелкозернистых сплавов большой вклад в общую деформацию образцов вносит зернограничное проскальзывание, в то время как для крупнозернистого сплава оно затруднено и энергия ВТМО гасится главным образом за счет повышения дефектности зерен WC. Кроме того, вследствие высокой дисперсности исходного порошка смеси ВК16М содержание кислорода в компактном материале составляет 2–3 %, что значительно превышает содержание его в крупнозернистом сплаве. Наличие кислорода в сплавах ВК16М приводит к существенному снижению механической прочности, трещиностойкости и эрозионной стойкости мелкозернистых сплавов и, возможно, нивелирует разницу в напряженном состоянии частиц карбида вольфрама спеченных и подвергнутых ВТМО в сплавах.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1476933. СССР. МКИ С 04 В. Спеченный электродный материал на основе карбида вольфрама для нанесения покрытий / Ковальченко М.С., Паустовский А.В., Кириленко С.Н. Заявка N 4226234 от 7.04.87, дата регистрации 3.01.1989.
2. Kovalchenko V.S., Paustovsky A.V., Botvinko V.P. Increase in durability of high - speed steel cutting tools by spark hardening with subsequent laser treatment // Functional materials. 2001. V. 8. N 1. P. 1–5.
3. Ткаченко Ю.Г., Игнатенко Э.Т., Бовкун Г.А. и др. Влияние структуры анода на закономерности электроискрового упрочнения твердыми сплавами // Электронная обработка материалов. 1981. № 4. С. 21–24.
4. Ковальченко М.С., Лаптев А.В., Подрезов Ю.Н. и др. Влияние параметров импульсного горячего прессования на физико-механические свойства твердого сплава ВК20 // Порошковые тугоплавкие материалы и покрытия на их основе. Киев, 1990.
5. Laptev A.V., Ponomarev S.S., Ochka L.F. Solid-Phase Consolidation of Fine-Grained WC-16 % Co Hardmetal // J. Adv.Mat. 2001. V.33. № 3. P. 42–51.
6. Бовкун Г.А., Моляр В.Н., Чайковский Н.С. Влияние остаточной пористости на эрозионные характеристики безвольфрамовых электродных материалов // Спекание и горячее прессование тугоплавких соединений. Киев, 1986.

Поступила 22.08.2001

Summary

The influence of compacting conditions, of pressure and thermal treatment on the erosive characteristics of fine-grained WC-16%Co hard metals has been investigated. It is shown, that the erosive characteristics of sintered and not annealed hard metals, which were not subjected to pressure treatment, monotonously change with the change of consolidation temperature, while for alloys obtained by sintering with subsequent pressure treatment, and isothermal annealing the erosive characteristics practically do not depend on temperature of consolidation. It is established, that the erosive resistance of alloys, sintered at temperatures 950–1150°C and subjected to pressure treatment and isothermal annealing is 5 to 10 times higher than that of alloys sintered at the same temperatures, and is comparable with the erosive resistance of the alloys prepared at temperatures 1300–1350°C. The latter effect is due to the formation of the structure with high strength of intergranular boundaries under conditions high-energy pressure treatment.

ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНОСТИ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА-СУСПЕНЗИИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ И СООСАЖДАЕМОСТЬ ИХ С МЕТАЛЛОМ МАТРИЦЫ

*Казанский государственный медицинский институт,
ул. Бутлерова, 49, г. Казань, 420012, Россия*

Изменение кислотности оксидных композиционных покрытий (ОКП) при получении композиционных электрохимических покрытий (КЭП) может существенно влиять на поверхностные свойства частиц дисперсной фазы (ДФ). Так, моделирование рН ОКП в сульфатном электролите-суспензии (ЭС) цинкования с Al_2O_3 приводит к увеличению отрицательной величины ξ -потенциала частиц до значений, соответствующих ξ -потенциалам частиц в фоновом электролите [1]. Это свидетельствует о слабой связи ионов Zn^{2+} с поверхностью Al_2O_3 и связывании их с ионами гидроксила. Согласно [2] адсорбированные катионы не заменяют гидратной оболочки частицы. В этом случае заряд поверхности и адсорбция катионов не будет зависеть от концентрации электролита. Поэтому при осаждении КЭП частица, попадая в приэлектродную зону, легко теряет ионы Zn^{2+} и обогащает ОКП гидроксидом цинка. Это предположение подтверждается микроскопическими и рентгеноструктурными исследованиями покрытий, полученных из сульфатного электролита [3]. На поверхности осадка в присутствии Al_2O_3 имеется губка, а на дифрактограммах – рефлексы, принадлежащие $Zn(OH)_2$ с интенсивностью до 70%; включения частиц не обнаружено.

В аммиакатном электролите цинкования адсорбции катионов на поверхности частиц Al_2O_3 и TiO_2 не обнаружено независимо от рН электролита. В то же время изменение ξ -потенциала частиц Al_2O_3 в электролите никелирования при росте рН свидетельствует об увеличении адсорбции ионов Ni^{2+} , а это, в свою очередь, благоприятствует включению и зарастанию ДФ в осадок. Данные по возрастанию адсорбции ионов Ni^{2+} с увеличением рН находятся в согласии с исследованиями [4].

Поведение TiO_2 в сульфатном и трилонатном электролитах цинкования сходно с Al_2O_3 , однако при повышении рН склонность к десорбции катионов с поверхности TiO_2 меньше. Наличие более прочной связи адсорбированных катионов с поверхностью TiO_2 подтверждается фактом образования КЭП из данных электролитов. Моделирование рН ОКП в этплениаминовом электролите также приводит к уменьшению ξ -потенциала частиц TiO_2 . Образование КЭП имеет место, видимо, вследствие только частичной десорбции комплексных катионов с поверхности ДФ. И, наконец, в электролите никелирования адсорбционные явления на частицах TiO_2 мало зависят от кислотности среды, и для включения и зарастивания частиц не создается особых затруднений при подщелачивании рН [1, с. 90].

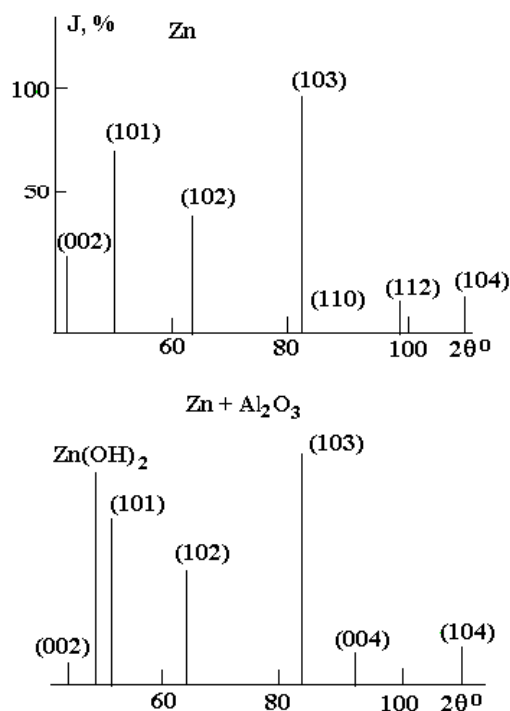
Во всех рассматриваемых электролитах (кроме сульфатного электролита цинкования) при увеличении рН ЭС наблюдается возрастание адсорбируемости электроположительных ионов поверхностью Cr_2O_3 . Вероятно, что в случае проводящих частиц адсорбционные эффекты не являются доминирующими. Тем не менее, способствуют адгезии частиц к катоду и облегчают их зарастивание вследствие разряда адсорбированных катионов на поверхности самих частиц.

В заключение остановимся на влиянии оксидов на рН модельных электролитов. В реальных растворах его практически нет, однако в пределах ОКП это влияние может заметно проявиться, например, увеличивая гидроксиобразование. Так, в водных суспензиях в зависимости от природы вводимой ДФ наблюдается подщелачивание в различной степени (см. таблицу).

Возрастание рН воды на величину около 3 единиц рН после введения Al_2O_3 может свидетельствовать о значительной адсорбции ионов H_3O^+ , а высокий отрицательный заряд частиц [3] можно объяснить недостатком протонов для его компенсации и ориентацией диполей адсорбированной воды отрицательным концом к границе скольжения. Кроме того, гидролиз поверхностных слоев и диссоциация имеющегося на поверхности гидроксида алюминия с образованием ионов AlO_2^- – должны также увеличивать отрицательный заряд поверхности и адсорбируемости протона.

Изменение кислотности модельных электролитов после введения ДФ ($C = 50$ г/л) различной природы, фракция 0,5 – 5 мкм

Электролит	исх. pH	pH с Al_2O_3	pH с Cr_2O_3	pH с TiO_2
H_2O	6,7	9,4	7,2	7,3
Na_2SO_4	6,7	7,8	7,7	7,1
$ZnSO_4+Na_2SO_4$	5,9	6,8	6,0	5,15
$Na_2SO_4+ЭТДА$	10,8	10,8	10,5	10,0
$ZnSO_4+Na_2SO_4+ЭТДА$	5,5	7,3	6,15	6,6
Na_2SO_4+En	11	10,7	10,8	10,5
$ZnSO_4+Na_2SO_4+En$	8,0	8,1	8,0	8,0
NH_4Cl	5,7	8,6	6,8	7,1
$ZnO+NH_4Cl$	6,8	7,8	7,2	6,6
$NiSO_4+NiCl_2$	6,0	7,5	6,7	5,5



Аналогично ведет себя в воде TiO_2 , но сдвиг pH составляет всего одну единицу, а оксид хрома заряжается положительно. По возрастанию адсорбируемости протона исследованные оксиды можно расположить в ряд: $Al_2O_3 > Cr_2O_3 > TiO_2$. Поэтому можно считать, что повышенное сродство поверхности Al_2O_3 к протону приводит к локализации ионов Zn^{2+} на внешней стороне гидратной оболочки частиц. Подобное ослабление связи катионов цинка с поверхностью ДФ облегчает гидроксиобразование в сульфатном и аммиакатном электролитах при внедрении частиц Al_2O_3 в ОКП, способствующих его дополнительному подщелачиванию, что отмечено при соосаждении никеля с Al_2O_3 [5]. В результате на дифрактограммах цинковых покрытий, полученных из аммиакатного и сульфатного электролитов в присутствии Al_2O_3 , появляются новые рефлексы относительной интенсивностью до 90% (см. рисунок). Эти рефлексы относятся к $Zn(OH)_2$, включившемуся в осадок. Таким образом, поверхностные и адсорбционные свойства ДФ, даже при отсутствии включения частиц в покрытия, могут существенно влиять на структуру и свойства осаждаемых металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давлиев М.М., Абдуллин И.А., Головин В.А. Поверхностные свойства некоторых оксидов и их соосаждение с цинком и никелем. Деп. рукопись (г. Черкассы). 1985. № 495 XII=85Д.
2. Кокарев Г.А., Колесников В.А. Адсорбция и точки нулевого заряда оксидов в водных растворах электролитов // Некоторые проблемы современной электрохимии // Тр. МХТИ. 1981. Вып. 117. С. 18–32.
3. Давлиев М.М., Абдуллин И.А., Головин В.А., Сайфуллин Р.С. Роль поверхностных свойств дисперсной фазы в процессе формирования композиционных электрохимических покрытий с матрицей из цинка // Прикладная электрохимия, Казань, 1986. С. 117–121.
4. White G., Foster J. Study of Particle-Cathode Aghesion during the Formation of Electrodeposited Composite Coatings-Trans // Inst. Metal Finish. 1978. V. 56. № 2. P. 92–96.
5. Сайфуллин Р.С., Надеева Ф.И. Электрохимическое и динамическое действие твердых частиц на электродную поверхность при электроосаждении никеля // Защита металлов. 1975. Т. 11. № 3. С. 375–377.

Поступила 09.10.2000

Summary

It is shown that conversion of one electrolyte to another in production of compositioned electrochemical is accompanied by reorganization of superficial loyers of particles, similar phenomenon being observed under pH change of pericatodic space in corecipitation of the second phase particles with marix metals.

А.И. Григорьев, В.А. Коромыслов, М.В. Рыбакова, С.О.Ширяева

О РАВНОВЕСНОЙ ФОРМЕ ЗАРЯЖЕННОЙ КАПЛИ, ДВИЖУЩЕЙСЯ ОТНОСИТЕЛЬНО СРЕДЫ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
ул. Советская, 14, г. Ярославль, 150000, Россия*

Феномен деформации капель во внешних полях (электрических, гравитационных, аэродинамических) и их устойчивости в этих полях представляет интерес в связи с многочисленными приложениями в геофизике, технической физике, технологии и научном приборостроении (см., например, [1, 2] и указанную там литературу). Существенная часть исследований по этой теме связана с интересом к элементарным процессам внутри грозового облака. Согласно существующим качественным представлениям зарождение разряда линейной молнии может быть связано с зажиганием коронного разряда в окрестности крупной капли или обводненной градины (в частности, с реализацией неустойчивости заряженной поверхности капли воды с последующей эмиссией сильно заряженных высокодисперсных капелек) [3, 4]. Тем не менее, максимальные величины измеряемых собственных зарядов капель и внутриоблачных электрических полей много меньше [5] необходимых для реализации неустойчивости поверхности капли по отношению к собственному и индуцированному зарядам [6]. По всей видимости, при построении физической модели инициирования разряда молнии упускается какой-то важный фактор, например, аэродинамическое давление в окрестности падающей капли, которое согласно [7] приводит к снижению критических условий реализации неустойчивости свободной поверхности капли.

1. Будем искать равновесную форму капли идеальной несжимаемой жидкости с зарядом Q , обдуваемой ламинарным потоком газа плотностью ρ и скоростью \vec{U} , направленным коллинеарно внешнему однородному электростатическому полю: $\vec{U} \parallel \vec{E}_0$. Примем, что скорость потока \vec{U} много меньше скорости звука в газе и будем моделировать газ идеальной несжимаемой жидкостью.

Сферическая форма и радиус R изолированной капли идеальной несжимаемой жидкости при $Q = 0$, $E_0 = 0$, $U = 0$ легко находятся из условия баланса давлений на ее поверхности:

$$\frac{2\sigma}{R} = \Delta p;$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Δp – перепад постоянных давлений в капле и среде.

Пусть теперь $Q \neq 0$, $E_0 \neq 0$, $U \neq 0$. Тогда равновесная форма капли будет уже не сферической. Новую равновесную осесимметричную форму капли представим в виде

$$r(\theta) = R + h(\theta) \equiv R + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot P_n(\mu). \quad (1)$$

В выражении (1) $P_n(\mu)$ – полиномы Лежандра n -го порядка; a_n – амплитуды отдельных мод; $\mu \equiv \cos(\theta)$; $h(\theta)$ – виртуальное искажение сферической поверхности капли. Будем искать возмущение сферической поверхности $h(\theta)$ (амплитуды возмущенных мод a_n) опять же из условия баланса давлений на равновесной поверхности капли:

$$p_\sigma = \Delta p + p_E + p_U, \quad (2)$$

определяя слагаемые, стоящие в правой части (2) на исходной сферической поверхности, а лапласовское давление p_σ , стоящее в левой части (2) на виртуально возмущенной сферической поверхности. Согласно сказанному p_E – электростатическое давление поля собственного и поляризованного зарядов на поверхность сферической капли; p_U – аэродинамическое давление на поверхность сферической капли со стороны обдувающего ее ламинарного потока газа.

Будем искать амплитуды мод a_n , которые возбуждятся в результате взаимодействия виртуального возмущения $h(\theta)$ с электрическим и аэродинамическим полями в окрестности электропроводной сферической капли. Для этого отметим, что [8, 9]

$$p_\sigma = \frac{2\sigma}{R} - \frac{\sigma}{R^2} \sum_{n=0}^{\infty} [2 - n(n+1)] a_n \cdot P_n(\mu); \quad (3)$$

$$p_E = \frac{1}{8\pi} \left\{ 3E_0^2 [P_0(\mu) + 2P_2(\mu)] + 6E_0 \frac{Q}{R^2} P_1(\mu) + \frac{Q^2}{R^4} P_0(\mu) \right\}; \quad (4)$$

$$p_U = \frac{3}{4} \rho U^2 [P_0(\mu) - P_2(\mu)]. \quad (5)$$

Подставим (3) – (5) в (2) и, приравнявая коэффициенты при полиномах Лежандра разного порядка, найдем амплитуды возбужденных мод. Несложно видеть из (4) – (5), что могут возбуждаться лишь три первые моды: $\sim P_0(\mu)$, $\sim P_1(\mu)$ и $\sim P_2(\mu)$. Мода $\sim P_1(\mu)$ соответствует трансляционному движению капли и на ее форме не сказывается. Моды: $\sim P_0(\mu)$ и $\sim P_2(\mu)$ легко рассчитываются, но в амплитуду моды $\sim P_0(\mu)$ входит неизвестный перепад постоянных давлений Δp и поэтому a_0 удобнее рассчитать через a_2 , используя условие постоянства объема капли несжимаемой жидкости. Для a_2 получится соотношение:

$$\frac{a_2}{R} = \frac{1}{3} \left(\frac{9}{16\pi} w - \frac{9}{16} We \right); \quad w \equiv E_0^2 R \sigma^{-1}; \quad We \equiv \rho U^2 R \sigma^{-1}. \quad (6)$$

Выражение для амплитуды a_0 , рассчитанное из условия постоянства объема, оказывается квадратичным по безразмерной амплитуде основной моды ($n=2$): $(a_0/R) \sim (a_2/R)^2$, и при расчетах в линейном по амплитуде деформации приближение учитываться не должно.

Сравним полученное выражение с уравнением эллипсоида

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1,$$

у которого $a = b < c$ (то есть вытянутого вдоль \vec{U} и \vec{E}_0 сфероида), в определенной выше сферической системе координат с началом в центре эллипсоида записываемым в виде

$$r(\theta) = R(1 - e^2)^{1/6} (1 - e^2 \cos^2 \theta)^{-1/2}.$$

Несложно найти, что в приближении линейном по квадрату эксцентриситета $e^2 = 1 - b^2/c^2$ сфероида полученное изменение амплитуды основной моды капиллярных осцилляций капли соответствует деформации капли к сфероиду с эксцентриситетом

$$e = \left(\frac{9}{16\pi} w - \frac{9}{16} We \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Итак, в линейном по амплитуде деформации приближении приращение получает лишь основная мода, что при $(w/\pi) > We$ соответствует деформации капли к вытянутому сфероиду [6, 8], а при $(w/\pi) < We$ – к сплюснутому.

Наличие на капле заряда в использованном приближении (когда ищется деформация исходной сферической капли) на величине равновесной деформации капли не сказывается. Тем не менее известно [6], что в отсутствие аэродинамического потока, обдувающего каплю, в линейном по амплитуде отклонения поверхности такой капли от сферы ее форма является вытянутой сфероидальной с эксцентриситетом e , зависящим от величины заряда Q , и определяемым соотношением:

$$e^2 = \frac{9}{16\pi} \cdot \frac{w}{1-W}; \quad W \equiv \frac{Q^2}{16\pi\sigma R^3}. \quad (8)$$

Параметр W характеризует устойчивость капли по отношению к собственному заряду и его критическое значение, при достижении которого капля становится неустойчивой, равно единице [10]. Из (8) видно, что наличие на капле заряда усиливает величину ее деформации во внешнем однородном электростатическом поле \vec{E}_0 . Выражение (8) получено на основе принципа минимальности при некоторой величине равновесной деформации потенциальной энергии заряженной капли в поле \vec{E}_0 . Поэтому представляется целесообразным применить этот метод для расчета величины равновесной деформации заряженной капли в ламинарном потоке идеальной несжимаемой жидкости.

2. Пусть капля идеальной несжимаемой жидкости с зарядом Q обдувается ламинарным потоком газа плотностью ρ и скоростью \vec{U} . Согласно сказанному в предыдущем пункте в линейном по амплитуде деформации приближении такая капля деформируется к сплюсненному сфероиду $a > b = c$. Найдем величину эксцентриситета ($e^2 = 1 - c^2/a^2$) равновесной в указанных условиях сплюснутой сфероидальной формы капли, требуя минимальности в состоянии равновесия полной потенциальной энергии капли, которая состоит из энергии сил поверхностного натяжения:

$$U_\sigma = 2\pi R^2\sigma(1-e^2)^{-1/3}(1+e^{-1}(1-e^2)\text{Arth } e);$$

энергии собственного заряда капли:

$$U_q = \frac{Q^2}{2R} e^{-1}(1-e^2)^{1/6} \arcsin e;$$

энергии капли в аэродинамическом потоке:

$$U_U = -\int p_U^0(\theta) r^2 \cos^2\gamma \sin\theta d\theta d\varphi dr$$

где p_U^0 – аэродинамическое давление на поверхность сплюснутой сфероидальной капли [9]:

$$p_U^0 = \frac{\rho U^2}{2} (1-0,5 C_0)^{-2} \frac{(1-e^2)^2 \sin^2\theta}{[1-e^2(2-e^2)\sin^2\theta]};$$

$$C_0 \equiv 2e^{-2} \left(1 - \frac{(1-e^2)}{e} \arcsin e \right);$$

$\cos \gamma$ – косинус угла между вектором нормали к поверхности сплюснутой сфероидальной капли и ортом \vec{n}_r сферической системы координат с началом в центре капли, а интегрирование по R проводится от нуля до сфероидальной поверхности

$$r(\theta) = R(1-e^2)^{1/3}(1-e^2 \sin^2\theta)^{-1/2}.$$

Выражение для U_U получено интегрированием по сфероидальной поверхности капли работы силы $p_U^0 \cdot dS$, действующей на элементарную площадку на поверхности капли $dS \equiv r^2 \sin \theta \, d\theta \, d\varphi / \cos \gamma$, при смещении площадки dS вдоль нормали к ней на $dn \equiv dr / \cos \gamma$.

Приравняв теперь нулю производную от полной потенциальной энергии капли по эксцентриситету, несложно найти в линейном по e^2 приближении связь величины эксцентриситета равновесной сплюснутой сфероидальной формы капли в ламинарно ее обтекающем потоке от скорости потока U (от числа Вебера We) и от величины заряда Q (от параметра Рэлея W):

$$e^2 = \frac{9}{16} \cdot \frac{We}{(1-W)}. \quad (9)$$

Видно, что наличие на капле заряда усиливает величину ее деформации в обтекающем каплю ламинарном потоке идеальной несжимаемой среды.

3. Рассмотрим более общую ситуацию, когда имеется и внешнее однородное электростатическое поле: $\vec{E}_0 \parallel \vec{U}$. Известно, что в поле \vec{E}_0 капля деформируется к вытянутому сфероиду, в тоже время в потоке \vec{U} , согласно вышесказанному, она деформируется к сплюснутому сфероиду. Примем, что соотношение между величинами E_0 и U таково, что из этих двух противоположных тенденций преобладает стремление к вытягиванию и капля имеет форму вытянутого сфероида ($e^2 = 1 - b^2/c^2$). Зададимся вопросом, каков вклад E_0 , U и Q в величину равновесного эксцентриситета.

Выпишем выражение для полной потенциальной энергии капли, которая в указанных условиях состоит из энергии сил поверхностного натяжения:

$$U_\sigma = 2\pi R^2 \sigma (1 - e^2)^{1/3} (1 + e^{-1} (1 - e)^{-1/2} \arcsin e);$$

энергии собственного заряда капли:

$$U_q = \frac{Q^2}{2R} e^{-1} (1 - e^2)^{1/3} \text{Arth } e;$$

энергии поляризационного в E_0 заряда капли:

$$U_E = -\frac{1}{6} E_0^2 R^3 \frac{e^3}{(1 - e^2)(\text{Arth } e - e)};$$

энергии капли в аэродинамическом потоке:

$$U_U = -\int p_U^*(\theta) r^2 \cos^2 \gamma \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \, dr$$

где p_U^* – аэродинамическое давление на поверхность вытянутой сфероидальной капли [9]:

$$p_U^* = \frac{\rho}{2} \frac{U^2}{(1 - 0,5 C_0)^2} \frac{\sin^2 \theta}{[1 - e^2 (2 - e^2) \cos^2 \theta]};$$

$$C_0 \equiv 2e^{-3} (1 - e^2) (\text{Arth } e - e).$$

$\cos \gamma$ – косинус угла между вектором нормали к поверхности вытянутой сфероидальной капли и ортом \vec{n}_r сферической системы координат с началом в центре капли, а интегрирование по R

проводится от нуля до поверхности вытянутого сфероида (уравнение поверхности вытянутого сфероида приведено выше, в п.1).

Аналогично тому, как это было сделано в предыдущем разделе, приравняем нулю производную по величине эксцентриситета от полной потенциальной энергии и получим обобщение формул (7) и (9):

$$e^2 = \frac{9}{16} \cdot \frac{(w\pi^{-1} - We)}{(1 - W)}. \quad (10)$$

Таким образом, собственный электрический заряд капли, не приводя к деформации сферической формы, усиливает равновесные деформации капли во внешних силовых полях.

Интересно, что в ситуации, когда и заряд капли, и напряженность внешнего электрического поля капли, движущейся с конечной (малой) скоростью не равны нулю $Q \neq 0$, $E_0 \neq 0$, $U \neq 0$, капля может сохранять сферическую форму при $(w/\pi) = We$ и произвольном, меньшем критического по Рэлею, заряде. При $(w/\pi) > We$ капля деформируется к вытянутому сфероиду, при $(w/\pi) < We$ – к сплюснутому. При наблюдениях в природных условиях регистрируются все три формы капель: сферическая, сплюснутая сфероидальная и вытянутая сфероидальная [11].

4. Заключение. Капля жидкости в потоке идеальной несжимаемой жидкости (газа) ламинарно ее обтекающем деформируется к сплюснутому сфероиду с осью симметрии, ориентированной по потоку. Наличие на капле электрического заряда увеличивает степень сплюснутости (увеличивает эксцентриситет капли). Если имеется также однородное внешнее электростатическое поле, в котором капля в отсутствие обтекающего потока деформируется к вытянутому по полю сфероиду (наличие на капле заряда приводит к увеличению степени удлинения), то имеет место конкуренция стремления к сплюсыванию в гидродинамическом потоке и к вытягиванию во внешнем электростатическом поле. При некотором соотношении между величиной напряженности электростатического поля и скорости потока форма капли остается сферической.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А.И. Неустойчивости заряженных капель в электрических полях (обзор) // Электронная обработка материалов. 1990. № 6. С. 23–32.
2. Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И. Деление заряженных капель во внешнем электрическом поле на части сравнимых размеров (обзор) // Электронная обработка материалов. 2000. № 4. С. 17–28.
3. Дячук В.А., Мучник В.М. Коронный разряд обводненной градины как основной механизм иницирования молнии // ДАН СССР. 1979. Т. 248. № 1. С. 60–63.
4. Grigor'ev A.I., Shiryayeva S.O. The Possible Physical Mechanism of Initiation and Growth of Lightning // Physica Scripta. 1996. V.54. P. 660–666.
5. Мазин И.П., Хргиан А.Х., Имянитов И.М. Облака и облачная атмосфера. Справочник. Л., 1989.
6. Григорьев А.И., Ширяева С.О., Белавина Е.И. Равновесная форма заряженной капли в электрическом и гравитационном полях // ЖТФ. 1989. Т.59. Вып. 6. С. 27–34.
7. Григорьев А.И., Коромыслов В.А., Ширяева С.О. Григорьев О.А. Неустойчивость заряженной сферической поверхности в обтекающем потоке идеальной жидкости // Электронная обработка материалов. 1998. № 1–2. С. 48–50.
8. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Равновесная форма проводящей капли в электрическом поле // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 9. С. 1863–1866.
9. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Часть 1. М., 1963.
10. Rayleigh Lord (J.V. Strett). On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity // Phil. Mag. 1882. V.14. P. 184–186.
11. Jones D.M. The shape of raindrops // J.Meteorology. 1959. V.16. № 5. P. 504–510.

Поступила 26.11.2001

Summary

Is shown, that the drop of a fluid in a laminar stream of an ideal incompressible fluid is deformed to an oblate spheroid with a symmetry axis oriented on a stream. If there is also homogeneous electric field a drop is deformed to a prolate spheroid, the competition of actions takes place. The presence on a drop of electric charge is increased a degree of deformation.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПРОЦЕСС ТЕПЛОПЕРЕНОСА ВО ВЛАЖНОМ МИКРОПОРИСТОМ ТЕЛЕ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Бендеры, 12, г. Ровно, 33028, Украина*

Научно-технический прогресс в различных областях техники и технологий неразрывно связан с использованием электрических полей (ЭП) высокой напряженности E . Возрастающие требования к поддержанию заданных тепловых режимов в этих условиях обуславливают расширение и углубление исследований взаимосвязанных процессов тепло – и массопереноса (ТМП) в ЭП [1].

Во влажном капиллярно-пористом теле (КПТ) вместе с переносом энергии в виде тепла происходит перенос внутренней энергии за счет массопереноса, на который в значительной мере влияет присутствие ЭП [2]. Поэтому теплопроводность во влажных КПТ, которые находятся в разнообразных ЭП должна рассматриваться в неразрывной связи с влагопереносом. Следовательно, задача определения термических коэффициентов при ТМП во влажных КПТ в условиях действия внешних ЭП имеет актуальное значение.

При наличии ТМП во влажном КПТ основной закон теплопроводности имеет вид

$$j_T = -\lambda \nabla T + \sum_i h_i j_i, \quad (1)$$

где j_T – плотность теплового потока, λ – истинный коэффициент теплопроводности влажного твердого скелета пористого тела, j_i – поток влаги в виде пара, жидкости или иных субстанций, h_i – удельное теплосодержание того или иного потока внутри тела. Разумеется, что определенный экспериментально коэффициент теплопроводности влажного КПТ, рассчитанный по формуле

$$\lambda_{эф} = \frac{j_T}{\nabla T}, \quad (2)$$

где j_T – определен экспериментально, дает не истинное, а эффективное его значение $\lambda_{эф}$. В случае аддитивности

$$\lambda_{эф} = \lambda + \lambda_{л} + \lambda_{к} + \lambda_{в} + \lambda_{п} + \lambda_{ж}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент молекулярной (атомной) теплопроводности твердого скелета КПТ, $\lambda_{л}$ – коэффициент лучистой теплопроводности между стенками пор, $\lambda_{к}$ – коэффициент конвективной теплопроводности газовой среды в порах, $\lambda_{в}$, $\lambda_{п}$, $\lambda_{ж}$, – соответственно, коэффициенты теплопроводности через внутривоздушный воздух, пар и жидкость (адсорбционные, смачивающие пленки, влага капиллярной конденсации в микропорах и влага капиллярных состояний в макропорах КПТ). Как известно [2], когда диаметр пор меньше $5 \cdot 10^{-5}$ м конвективным и лучистым теплообменом при перепаде температуры между стенками пор $\Delta T \approx 10$ К практически можно пренебречь. Таким образом, в сухом КПТ (радиусы капилляров меньше 10^{-5} м) при обычных перепадах температуры передача тепла конвекцией и излучением ничтожно мала в сравнении с истинной теплопроводностью.

В микрокапиллярах коэффициент теплопроводности воздуха пропорционален давлению газа и радиусу капилляра, поэтому он не является постоянной величиной. Механизм переноса тепла в таких микрокапиллярах определяется молекулярным (кнудсеновским течением). Но концентрация молекул воздуха и водяного пара в увлажненных микрокапиллярах незначительная в сравнении с количеством молекул воды в единице объема пленки адсорбционно связанной влаги. Их отношение составляет примерно 10^{-5} [2, 3]. Следовательно, передача тепла в микрокапиллярах влажных КПТ в основном происходит путем молекулярной (атомной) теплопроводности через скелет тела и внутривоздушное

связанное вещество – жидкость в виде полимолекулярных пленок и столбиков капиллярно сконденсированной влаги. В макрокапиллярах не полностью увлажненных КПТ концентрация молекул возду-

ха и водяного пара, которые находятся в динамическом равновесии со смачивающими пленками воды и менисками влаги капиллярного состояния, уже значительная. Поэтому присутствие парогазовой фазы в макрокапиллярах оказывает заметное влияние на теплоперенос.

Имеется немало работ, например, [3–6], посвященных исследованию зависимости коэффициента теплопроводности от влагосодержания при определенной пористости дисперсных и полимерных тел. Во всех работах отмечено, что $\lambda_{эф}$ в основном значительно увеличивается при уменьшении коэффициента пористости указанных тел и увеличении их влагосодержания при заданной пористости.

В неоднородном электрическом поле (НЭП) перенос влаги обусловлен действием не только сил диффузии (∇U), термодиффузии (∇T), но и действием движущей термодинамической силы, обусловленной НЭП (∇E) и электроосмотических сил ($\nabla \varphi$) [2]. В общем случае поток влаги во влагонасыщенном теле в присутствии постоянного НЭП будет в соответствии с уравнением Онзагера определяться соотношением

$$J = -\lambda_m \nabla U - \lambda_T \nabla T - \lambda_e \nabla E - \lambda_{eo} \nabla \varphi. \quad (4)$$

Таким образом, на величину $\lambda_{эф}$ влажного пористого тела существенным образом влияют градиенты влагосодержания U , температуры T , напряженности E и потенциала φ ЭП. Поэтому в выражение (3), в случае действия во влажном микропористом теле ЭП, как дополнительные члены должны входить термоградиентный коэффициент теплопроводности λ_T , обусловленный термодиффузией влаги, коэффициент электровлагодиффузионной теплопроводности $\lambda_{эвт}$ и коэффициент электроосмотической теплопроводности $\lambda_{эот}$. Тогда при условии аддитивности величина $\lambda_{эф}$ в случае действия ЭП на влажное тело, когда в нем присутствуют микро- и макропоры, определяется выражением

$$\lambda_{эф} = \lambda + \lambda_{пр} + \lambda_k + \lambda_{пв} + \lambda_{п} + \lambda_p + \lambda_T + \lambda_{эвт} + \lambda_{эот}. \quad (5)$$

$$K_{\lambda_{ЭП}} = \frac{\lambda_{эф} - \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}. \quad (6)$$

Согласно [3], величину $K_{\lambda_{ЭП}}$ можно назвать критерием теплопроводности влажных тел, находящихся в ЭП.

Направление перемещения жидкости в влагонасыщенном КПП под действием приложенной постоянной разности потенциалов (электроосмос) изучен достаточно полно. Согласно уравнению Гельмгольца-Смолуховского скорость движения жидкости через пористую мембрану равна

$$U_0 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\xi}{\eta} E. \quad (7)$$

где U_0 – линейная скорость электроосмотического течения жидкости; ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость воды; ξ – электрокинетический потенциал; η – вязкость воды; E – напряженность электрического поля.

При неполном влагонасыщении КПП (влагосодержание меньше максимального гигроскопического) на влагоперенос в постоянном, а тем более в переменном невысокой частоты, ЭП в основном влияет НЭП. Это влияние распространяется на отдельные дипольные молекулы водяного пара, дискретные пленки воды на поверхности микро- и макрокапилляров и образования (столбики) объемного конденсата в микрокапиллярах или воды капиллярного состояния в макрокапиллярах. В первом случае скорость перемещения молекул прямопропорциональна ∇E , в другом – $E \nabla(E)$ [7, 8].

Таким образом, на процесс теплопереноса в достаточно влажном микропористом теле влияют постоянные однородные и неоднородные ЭП. В переменном ЭП невысокой частоты такое влияние может оказывать только НЭП [9]. В грубодисперсных телах (диаметр макропор больше 10^{-5} м) должна проявляться дополнительная интенсификация взаимосвязанного ТМП за счет явления электроконвекции водяного пара и воздуха [1]. Насколько нам известно, исследования теплопроводности во влажных КПП в условиях действия на них ЭП не проводились. Это и послужило поводом для проведения экспериментальных работ по тепло- и массопереносу во влажном силикагеле как модельном КПП [10].

Из существующих методов экспериментальных исследований $\lambda_{эф}$ был выбран универсальный метод М. М. Бабьева [3]. В нашей модификации он является дальнейшим развитием методов определения термовлагокоэффициентов из одного и того же опыта в условиях действия внешнего ЭП.

Основной частью установки служил фторопластовый цилиндр (длиной 0,150 м, диаметром 0,025 м), который был подвешен своими концами к коромыслу аналитических весов АДВ-200. Расстояние между точками подвеса, равное 0,140 м, точно соответствовало расстоянию между призмами коромысла весов. Часть цилиндра (0,115 м по длине) была залита парафином (эталонным мате-

риалом), а другая часть (0,035 м) заполнялась исследуемым материалом. Парафин обеспечивал влагоизоляцию одного конца исследуемого материала. Второй конец материала (торец цилиндра) закрывался диском из медной фольги толщиной 0,0001 м и диаметром 0,050 м. Медный диск обеспечивал надежную влагоизоляцию. Вместе с тем, он служил электродом и выравнивал температуру по сечению цилиндра, предотвращая проникновение инфракрасных лучей в торец цилиндра, который нагревался лучистым потоком от лампы инфракрасного излучения. Вторым электродом служил тонкий медный провод, пропущенный по оси цилиндра через парафин. Он заканчивался на границе между парафином и образцом. Температура измерялась термомпарами в специальных точках: 1) в плоскости соприкосновения медного диска и исследуемого материала, то есть на внутренней поверхности диска T_1 ; 2) в середине слоя исследуемого материала T_m ; 3) в плоскости контакта материала и парафина T_2 ; 4) в парафине на расстоянии 0,02 м от второго торца цилиндра T_0 . Для защиты цилиндра от влияния потоков воздуха он помещался в специальный термостат. Опыт осуществлялся так: свободный от парафина конец цилиндра заполнялся силикагелем с известным влагосодержанием, а потом закрывался диском, места соединения дополнительно покрывались специальным термостойким и гидрофобным лаком. После уравнивания цилиндра включался источник постоянного напряжения и лампа инфракрасного излучения и синхронно регистрировалось время электронным секундомером. Потом с помощью показаний термомпар регистрировалась разность температур ($T_1 - T_0$) и ($T_2 - T_0$).

Имея эти данные, можно рассчитать коэффициент $\lambda_{эф}$ по формуле

$$\lambda_{эф} = \lambda_e \left(\frac{1-h}{1+h} \right) \sqrt{\frac{a}{a_e}}, \quad (8)$$

где индекс “e” относится к эталону (парафину); a и a_e - коэффициенты температуропроводности образца и эталона (в английской и американской литературе они называются коэффициентами диффузии тепла (thermal diffusivity), а в немецкой литературе - коэффициентами температуропроводности (temperaturleitzaal)); h - вспомогательный параметр, который определяется формулой

$$h = \frac{\text{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - 0,5642 \frac{N_1}{N_2}}{\text{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - \frac{N_1}{N_2} \text{ierfc} \frac{1}{\sqrt{Fo}}}, \quad (9)$$

где N_1 / N_2 - отношение показаний гальванометра для термомпар 1 и 2 в промежутке времени τ_1 ; Fo - критерий Фурье для данного промежутка времени τ_1 и

$$\text{ierfc}x = \int_x^{\infty} \text{erfc}\xi d\xi = \frac{1}{\pi} e^{-x^2} - x \text{erfc}x. \quad (10)$$

Полученные термические коэффициенты относились к средней температуре тела и к среднему градиенту ЭП.

Следует отметить, что измерение температуры в материале проводилось термомпарами с соблюдением рекомендаций, приведенных в [9]: термомпары были укороченными, малого диаметра, во время наложения ЭП отключались от гальванометра, измерение температуры материала проводилось при отключенном ЭП.

В качестве объекта исследования использовался порошок промышленного адсорбента – силикагель КСМ-5 с эффективным диаметром почти сферических зерен $d = 0,5$ мм. Для удаления возможных органических примесей силикагель прожаривался в электрической тигельной печи при 773 К на протяжении 3 часов. Потом образец промывался дистиллированной водой. Перед всеми опытами силикагель сушился в сушильном термостате при 393 К на протяжении 10 часов до постоянного веса. Влагосодержание таким образом высушенного силикагеля при теплофизических опытах полагается равным нулю. Определение адсорбционно и капиллярно связанной с силикагелем влаги осуществлялось на сорбционных вакуумных весах [8]. Величины влагосодержаний U макрокапиллярной (межзерновой) влаги - стыкового, канатного и капиллярного состояний определялись по термограммам сушки [2]. Механическим встряхиванием достигалось максимальное уплотнение и можно считать, что упаковка частиц была гексагональной. Согласно [2, 3], слой таких зерен можно считать грубопористой системой с однородным составом, хоть и со сравнительно сложным профилем макрокапилляров. Такая система все же является наиболее простой моделью реальных макропористых тел, на основе которой можно осуществлять расчеты термических коэффициентов влажных и сравнивать их с экспериментальными. Размеры микропор в гранулах силикагеля КСМ -5, составляют 13 Å [7].

Опытные данные относились снимались при температуре образца $T_m = 305$ К при $\nabla T = 570$ К/м.

Погрешность определения градиентов напряженности поля составляла 3–5%. В самом худшем случае (в передпробойной области значений E) погрешность экспериментов не превышала 15% для доверительной вероятности 0,95 при коэффициенте Стьюдента 4,3, что полностью соответствует практике теплофизических измерений.

Из рисунка следует, что коэффициент $\lambda_{эф}$ увеличивается с увеличением влагосодержания силикагеля, но характер этого увеличения различный для фазных градиентов поля. Пунктирными линиями отмеченные границы различных форм связи влаги в микрокапиллярах: МА – максимальное количество адсорбционно связанной влаги, МГ – максимальное гигроскопическое влагосодержание, а также различные состояния воды в макрокапиллярах: СТ – стыковое, КН – канатное и КП – капиллярное. Кривая 1 зависимости $\lambda_{эф}(U)$ получена без наложения ЭП аналогична кривым для силикагеля других марок [2, 3]. При малых влагосодержаниях, то есть в области $0 < U \leq U_{МА}$ (физико-химическая связь влаги), коэффициент $\lambda_{эф}$ увеличивается достаточно медленно, что свидетельствует о малой интенсификации теплопереноса за счет молекулярной теплопроводности пленки адсорбированной влаги и паровой фазы над ней, поскольку подвижность адсорбированных молекул незначительна вследствие большой энергии связи с адсорбционными центрами силикагеля, а концентрация молекул водяного пара в микрокапиллярах незначительна. В связи с малостью толщины полимолекулярно адсорбированной пленки (10^{-9} м) интенсивность термокапиллярного потока в ней также незначительна. С переходом в область влагосодержаний капиллярно-сконденсированной влаги $U_{МА} < U \leq U_{МГ}$ наблюдается сравнительно резкое увеличение теплопроводности. Это объясняется существенным уменьшением энергии связи капиллярно удерживаемой влаги (физико-механическая связь влаги) и, естественно, увеличением подвижности как отдельных молекул воды, так и отдельных столбиков капиллярного конденсата. Первое явление увеличивает молекулярную теплопроводность, а второе вызывает дополнительный, значительно больший перенос теплоты за счет молярного термоградиентного движения влаги. Это движение обусловлено изменением капиллярного потенциала с ростом температуры, поскольку коэффициент поверхностного натяжения с повышением температуры уменьшается. Движение жидкости в пористом теле по направлению потока тепла также осуществляется за счет расширения защемленного между столбиками воды газов воздуха и водяного пара. При повышении температуры давление защемленной паровоздушной смеси увеличивается и пузырьки расширяясь проталкивают жидкость в направлении потока тепла.

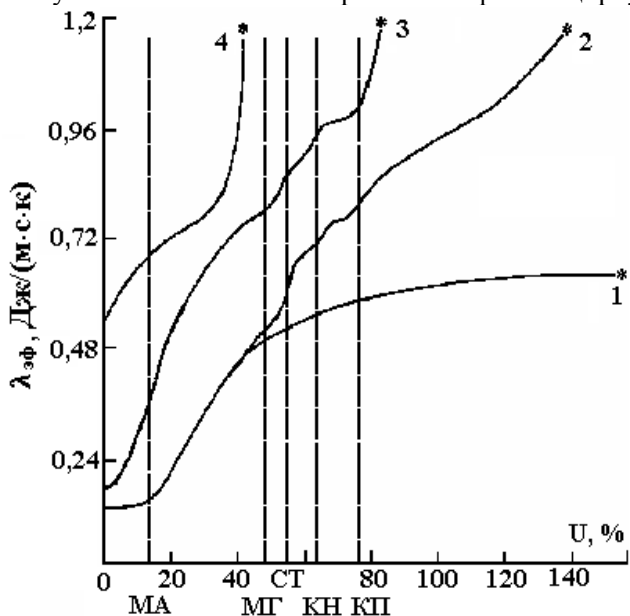
С завершением капиллярной конденсации пары в микропорах ($U = U_{МГ}$) столбики капиллярного конденсата сливаются и поверхность зерен силикагеля представляет собой мозаичную картину чередования островков практически свободной воды (заполненные устья микрокапилляров) и пленок полимолекулярно адсорбированной влаги между ними. Но поскольку после слияния столбиков жидкости остается лишь процесс молекулярной теплопередачи, а термоосмотический перенос пристеночной влаги в микрокапиллярах осуществляется в направлении градиента температуры, то темп роста $\lambda_{эф}$ спадает при приближении к $U_{МГ}$.

Концентрация водяного пара при $U > U_{МГ}$ в межзерновом пространстве уже будет значительной, ибо ее давление практически будет равно давлению насыщенного пара над свободной поверхностью воды при данной температуре. Разумеется, что макропоры межзернового пространства будут заполнены паровоздушной смесью, давление которой будет равно атмосферному. Количество молекул воздуха будет уже значительно превосходящим. Это приводит к дальнейшему возрастанию теплопереноса за счет молекулярной теплопроводности парогазовой среды и молярной термодиффузии газовой смеси, что приводит к циркуляции пара и газа в такой замкнутой системе макропор, что стимулирует значительный отвод тепла от нагретой поверхности.

С последующим увеличением влагосодержания возникают и утолщаются вокруг мест контакта зерен скопления жидкости, которые имеют вид вогнутой линзы (жидкостная манжета или стыковая влага). Их термическое сопротивление меньше, чем силикагеля. Поэтому они становятся дополнительными тепловыми мостиками между зернами вследствие увеличения площади соприкосновения их между собой. Тем не менее объем парогазовой фазы в макропорах (капиллярно-разобщенное состояние или состояние защемленной жидкости) уменьшается, а, следовательно, уменьшается циркуляция паровоздушной среды и поэтому интенсивность роста $\lambda_{эф}$ замедляется.

С переходом от стыкового в канатное состояние, когда смачивающие пленки влаги достигают макроскопических толщин и они сплошь покрывают всю внутреннюю поверхность макропор (состояние защемленного воздуха) происходит дальнейшее увеличение $\lambda_{эф}$ не только вследствие их более значительной молекулярной теплопроводности в сравнении с сухим силикагелем, но и за счет термокапиллярного потока в смачивающих пленках против градиента температуры. Тем не менее наблю-

дается дальнейшее падение скорости возрастания величины $\lambda_{эф}$, по-видимому, вследствие значительного уменьшения объема парогазовой фазы и циркуляции ее компонентов.



Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$ от влагосодержания U силикагеля КСМ-5 для средней температуры 305 К и различных градиентов постоянного электрического поля, V/m^2 : 1 – 0; 2 – $1,3 \cdot 10^5$; 3 – $8 \cdot 10^7$; 4 – $5 \cdot 10^9$.

В начале возникновения капиллярного состояния (отдельные разъединенные паровоздушными пузырьками столбики жидкости) $\lambda_{эф}$ увеличивается как вследствие возрастания молекулярной теплопроводности, ибо жидкость находится в растянтом состоянии между двумя менисками, так и за счет молярного термоградиентного перемещения столбиков нагретой жидкости с изменением разности капиллярных потенциалов на их концах, которые находятся при различных температурах. К

более холодному концу пористого тела отдельные столбики также проталкиваются и при расширении пузырьков, в которых происходит циркуляция газов паровоздушной смеси и термоградиентное перетекание жидкости по смачивающей пленке между двумя соседними столбиками воды. Но поскольку количество защемленного между столбиками жидкости влажного воздуха по мере увеличения влагосодержания уменьшается, то темп роста $\lambda_{эф}$ продолжает падать, хотя при слиянии столбиков в области $U > 82\%$ величина $\lambda_{эф}$ превышает теплопроводность свободной дистиллированной воды.

Следовательно, проявляются и другие механизмы теплопроводности. В частности в микро- и макропорах полностью увлажненного образца находиться не чистая вода, а электролит вследствие привнесения ионов из окружающей образец среды, а, главным образом, за счет растворения вещества контактирующего с водой поверхностного слоя силикагеля [11]. Поэтому возникает дополнительный перенос тепла в растворах (термодиффузия растворенных веществ в классическом понимании Максвелла-Чепмана). Это вызвано взаимодействием растворенных частиц с молекулами растворителя. Исходя из феноменологических представлений Л.Д.Ландау и Е.Н.Лифшиц [12] получили выражение для плотности потока тепла

$$q = \left[k_T \left(\frac{\partial \mu}{\partial c} \right)_{p,T} - T \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_{p,c} + \mu \right] i - \chi \nabla T, \quad (11)$$

где

$$i = -\rho D \left(\nabla c + \frac{k_T}{T} \nabla T \right) \quad (12)$$

диффузионный поток растворенного вещества. В закрытых капиллярах при наличии температурного градиента может иметь место циркуляция жидкости по той же схеме, как и в случае теплового скольжения газа. Вблизи стенок жидкость движется в сторону горячего конца, а в центре – в обратную сторону, отводя нагретую жидкость к холодному концу [2,3].

Влияние наложенного НЭП со сравнительно незначительным градиентом ($\nabla E = 1,3 \cdot 10^5 \text{ В/м}^2$) заметно начинает сказываться лишь при подходе к влагосодержанию стыкового состояния. При образовании достаточно толстых водных манжет наблюдается если и не прыжок, то определенный перелом в ходе кривой зависимости $\lambda_{эф}(U)$ (кривая 2). Это объясняется уменьшением термического сопротивления влажной дисперсной системы за счет перемещения воды в границах жидкостной манжеты под действием пондеромоторных сил в сторону возрастающих значений ∇E^2 ЭП [7], то есть по направлению теплового потока. С переходом в область канатного состояния влаги подобное пленочное течение возникает по всей внутренней поверхности макропор и потому возникает очередное, более четко выраженное изменение величины $\lambda_{эф}$. Еще более резкий прыжок величины $\lambda_{эф}$ имеет место при переходе в капиллярное состояние влаги, когда в пондеромоторном движении в направле-

нии противоположном ∇T образуются объемные, разобщенные столбики жидкости, переносящие с собою теплоту.

Увеличение U свыше $U_{КП}$ приводит к постепенному слиянию разъединенных столбиков жидкости, а следовательно, к замыканию каналами влаги электродов. В результате возникает электроосмотический перенос влаги. При дальнейшем увеличении U все большее количество каналов воды подключается к электродам и все большее количество тепла переносится при электроосмотическом течении влаги. Поэтому $\lambda_{эф}$ почти линейно возрастает с увеличением $U > U_{КП}$; джоулево тепло, которое выделяется в процессе электроосмоса, в связи с малостью величины тока ($0 < I < 10$ мкА), заметным образом не влияло на разность температур в образце. Последнее проверялось специальными опытами. При достижении $I = 10$ мкА автоматическая защита маломощного источника высокого напряжения "Разряд-1" отключала наложенное ЭП. Эта процедура отмечена звездочкой в конце кривых $\lambda_{эф}(U)$.

Таким образом, сингулярные точки на кривой $\lambda_{эф}(U)$ при наложении НЭП достаточно надежно фиксируют влагосодержание, которое отвечает различным формам связи и состояниям влаги в микро- и макропорах силикагеля.

Дальнейшее увеличение напряжения на образце при $U \geq 0$ приводит к стремительному росту ∇E и как видно из рис. 1 кривые $\lambda_{эф}(U)$ размещаются все выше. Величине $\nabla E = 5 \cdot 10^9$ В/м² отвечает предпробойное напряжение, когда даже в сравнительно сухом образце возникают частичные разряды, которые существенным образом интенсифицируют теплоперенос в капиллярно-пористом теле. Это обусловлено возникновением ударных волн, которые ионизируют и турбулизируют паровоздушную смесь в макропорах. В результате парогазовая фаза приходит в молярное движение и легче проталкивается через сужение макропор в направлении теплового потока, поскольку при наличии свободных зарядов кулоновские силы, которые действуют на единицу заряженного объема парогазовой смеси на несколько порядков превышают пондеромоторные, действующие на единичный объем незаряженного диэлектрика.

Таким образом, приведенные теоретические соображения и экспериментальные данные несомненно свидетельствуют об интенсификации теплопереноса во влажном капиллярно-пористом теле при наложении внешних неоднородных и однородных электрических полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Дидковский А.Б., Климов С.М.* Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле. Кишинев, 1987.
2. *Лыков А.В.* Теория сушки. М., 1968.
3. *Лыков А.В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М., 1954.
4. *Чудновский А.Ф.* Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., 1962.
5. *Кобранова В.Н.* Физические свойства горных пород. М., 1962.
6. *Филлипов П.И., Тимофеев А.М.* Методы определения теплофизических свойств твердых тел. Новосибирск, 1977.
7. *Панченко М.С.* Повышение эффективности процесса сушки при использовании неоднородных электрических и магнитных полей // Электронная обработка материалов. 1980. № 3. С. 42–47.
8. *Панченко І.М.* Вплив електричних полів на вологообмінні процеси в металонаповнених гнучколанцюгових полімерах: Дис. канд. фіз.-мат. наук. Рівне, 1998.
9. *Мустяцэ В.Т.* Тепло- и массообмен во влажных материалах в электрических полях высокой частоты: Автореф. дисс. доктора техн. наук. Кишинев, 1985.
10. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). М., 1971.
11. *Соболев В.Д., Сергеева И.П., Чураев Н.В.* Экспериментальные исследования электрокинетических явлений в тонких капиллярах: Тезисы докладов на VII конференции по поверхностным силам. М., 1980.
12. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М., 1986.

Поступила 15.05.2001

Summary

On an example of industrial adsorbent silicagel KSM, which is typical synthetic inorganic polymer, by practical consideration shown, that the constant non-uniform electrical field essentially intensifies process of transposition of heat in a broad interval of moisturecontains including hygroscopic and moisture conditions.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО УДАРА НА ГРАНИЦАХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТОКА

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

1. Введение

Как известно, проводимость вещества обусловлена движением свободных зарядов под действием электрического поля. Связанные электрические заряды обычно входят в состав вещества, удерживаются в определенных пространственных положениях внутримолекулярными силами и не отделимы от вещества. Вызванное электрическим полем упорядоченное изменение относительного пространственного расположения связанных зарядов, определяет поляризацию вещества, зависящую от его напряженности и сил внутримолекулярного сцепления зарядов в среде [1]. Она характеризуется вектором поляризации, который пропорционален напряженности приложенного поля и диэлектрической восприимчивости вещества.

Говорить о поляризации в случае проводящих сред обычно не приходится. Однако учет сил трения движению зарядов в проводящих средах приводит к появлению динамической их поляризации, определяемой различием масс разноименно заряженных носителей заряда и коэффициентами поляризационного и физического трения. Кроме явления динамической поляризации в проводящей среде возникает силовое воздействие, определенное различием импульсов движения разноименно заряженных носителей тока. Особый интерес представляют эти вопросы в отношении гетерогенных сред, какими являются биологические структуры [2]. Силовое воздействие тока, отмеченное здесь, приводит к стиранию границ неоднородностей в биологических средах, что предопределяет разрушительный процесс плазмолиза сырья. Эффективность электроплазмолиза при обработке биологических сред животного и растительного происхождения зависит от параметров режима обработки, теоретическое обоснование которого состоит в определении причин возникновения силового воздействия.

В статье на основании простой модели проводящей среды, доступной для изучения основных характеристик силового воздействия и выявления причин его возникновения, проводится анализ различий для разных проводящих сред – разряженных ионизированных газов, полупроводников и в особенности проводников второго рода.

2. Время поляризационной релаксации при стабилизации тока в разряженных ионизированных газах

В разряженных газовых смесях свободному движению заряженных частиц препятствует поляризационное трение, возникающее в результате кулоновского взаимодействия заряженных частиц [3]. Так как разноименно заряженные частицы движутся в противоположных направлениях в электрическом поле, то силы поляризационного трения среды пропорциональны относительной скорости их движения. Предполагая, что основные, разноименно заряженные носители заряда имеют одно и то же абсолютное значение заряда, уравнения движения частиц имеют вид

$$\begin{cases} m_+ \frac{dv_+}{dt} = qE - \mu_+(v_+ + v_-), \\ m_- \frac{dv_-}{dt} = qE - \mu_-(v_+ + v_-), \end{cases} \quad (1)$$

где μ_+ и μ_- – коэффициенты поляризационного трения для разноименных носителей заряда (анионов и катионов); q – абсолютное значение заряда носителей; m_+ и m_- – массы заряженных частиц. При решении системы (1) для проведения анализа выполним линейное преобразование системы, переходом к новым переменным:

$$\begin{aligned} v &= v_+ + v_-, \\ P &= m_- v_- - m_+ v_+, \end{aligned} \quad (2)$$

характеризующим относительную скорость движения частиц и их разность импульсов движения. Уравнения (1) в результате преобразования (2) принимают вид:

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = qE - \bar{\mu}v, \\ \frac{dP}{dt} = v(\mu_+ - \mu_-), \end{cases} \quad (3)$$

где введены обозначения:

$$m = \frac{m_+ m_-}{m_+ + m_-}, \quad \bar{\mu} = \frac{m_- \mu_+ + m_+ \mu_-}{m_+ + m_-}. \quad (4)$$

Эти величины имеют вполне осязаемый физический смысл: m – приведенная масса разноименно заряженных частиц, $\bar{\mu}$ – усредненный коэффициент трения, определяемый как среднее взвешенное значение по массам противоположных частиц.

В результате интегрирования системы дифференциальных уравнений (3) получаем

$$\begin{aligned} v &= \frac{qE}{\bar{\mu}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \\ P &= \frac{qE}{\bar{\mu}} (\mu_+ - \mu_-) \left[t - \tau \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

В качестве начальных условий при $t = 0$ выбрано $v_+ = v_- = 0$, где

$$v_+ = \frac{1}{M} (m_- v - P), \quad v_- = \frac{1}{M} (m_+ v + P), \quad M = m_+ + m_-. \quad (6)$$

В формулах (5) появился новый параметр τ , имеющий размерность времени и равный

$$\tau = \frac{m}{\bar{\mu}} = \frac{m_+ m_-}{m_- \mu_+ + m_+ \mu_-}. \quad (7)$$

Эта характеристика системы носителей заряда имеет смысл времени поляризационной релаксации при стабилизации тока в разряженных ионизированных газах. Учитывая, что коэффициенты трения обычно пропорциональны отношению масс движущихся частиц к времени релаксации,

($\mu_+ = \frac{m_+}{\tau_+}$ и $\mu_- = \frac{m_-}{\tau_-}$), получим

$$\tau = \frac{\tau_+ \tau_-}{\tau_+ + \tau_-}. \quad (8)$$

Таким образом, характеристикой поляризационной релаксации системы носителей одинакового заряда по абсолютной величине q для разряженных газов является приведенное время времен релаксации разноименных заряженных частиц. При значительном различии времен релаксации разноименных зарядов характеристика релаксации системы заряженных частиц принимает значение минимального времени релаксации частиц, в частности, вне зависимости от их масс.

3. Удельная электропроводность и поляризационное взаимодействие при стабилизации тока в разряженных ионизированных газах

Электропроводность σ является основной характеристикой динамического процесса переноса носителей заряда в электрическом поле. При напряженности E каждый носитель заряда приобретает

ускорение $a = \frac{qE}{m}$.

Удельная электропроводность разряженного ионизированного газа, с учетом условия электрической нейтральности системы зарядов, имеет вид:

$$\sigma = nq(u_+ + u_-), \quad (9)$$

где n – число ионизированных пар разноименно заряженных частиц в единице объема, q – элементарный заряд заряженной частицы. Согласно формулам (6) для удельной электропроводности получим выражение

$$\sigma = nq \frac{v}{E}. \quad (10)$$

Таким образом, значение коэффициента удельной электропроводности системы одинаково заряженных частиц в разряженных ионизированных газах определяется относительной скоростью движения разноименно заряженных частиц. Однако основной характеристикой относительной скорости является время поляризационной релаксации. Согласно первому уравнению (5) при $t < \tau$ для удельной электропроводности имеем выражение

$$\sigma \approx \frac{nq^2 t}{m}, \quad (11)$$

которое за время τ стабилизируется и становится равным

$$\sigma = \frac{nq^2 \tau}{m}. \quad (12)$$

Таким образом, удельная электропроводность в разряженных ионизированных газах зависит от характеристик системы элементарных носителей тока, приведенного времени поляризационной релаксации и приведенной массы частиц. Любопытно то обстоятельство, что пока происходит стабилизация удельной электропроводности среды, значение разности импульсов частиц приближенно равно нулю. Однако после стабилизации удельной электропроводности разность импульсов частиц становится отличной от нуля:

$$P \approx \frac{qE}{m} \tau (\mu_+ - \mu_-) (t - \tau), \quad (13)$$

что создает в разряженных газах силовое напряжение, равное

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{qE}{m} \tau (\mu_+ - \mu_-). \quad (14)$$

Заметим, что силовое напряжение F возникает благодаря отличию коэффициентов поляризационного трения (кулоновского взаимодействия движущихся заряженных частиц) и фактически это силовое напряжение в среде разряженного ионизированного газа тем больше, чем значительнее разность $(\mu_+ - \mu_-)$.

Силовое напряжение, влияющее на разность импульсов разноименно заряженных частиц, отражается на скорости их движения. В результате возникает новое характерное время, при котором положительно заряженные частицы меняют направление скорости движения. Это критическое значение времени движения положительно заряженных частиц при $(v_+ = 0)$ равно:

$$t_c = \tau + \frac{1}{\mu_+ - \mu_-}, \quad \text{при } \mu_+ \neq \mu_-. \quad (15)$$

В случае $\mu_+ = \mu_-$ критическое значение для времени изменения направления движения частиц не возникает. Ввиду того, что частицы отрицательного заряда встречают меньшее поляризационное сопротивление движению в непосредственной близости к катоду, образовывается пространственная область, обедненная отрицательным зарядом. В результате движущиеся в сторону катода положительные заряды, приближаясь к этой области с избытком положительного заряда, за счет кулоновского отталкивания тормозят свое движение вплоть до изменения его направления. Поэтому, если расстояние между электродами L удовлетворяет неравенству

$$L > \int_0^{t_c} v_+ dt, \quad (16)$$

то вблизи катода возникает критическая область, обедненная отрицательным зарядом. Естественно, при $\mu_- > \mu_+$ аналогичное явление будет иметь место в отношении движения отрицательных зарядов, а вблизи анода возникает область, обедненная положительным зарядом.

4. Стабилизация тока в проводящих системах при наличии диффузионного сопротивления среды

Дифференциальные уравнения движения заряженных частиц при наличии диффузионного сопротивления их движению отличаются от системы (1) наличием дополнительных членов, учитывающих трение в неподвижной среде:

$$\begin{cases} m_+ \frac{dv_+}{dt} = qE - \mu_+(v_+ + v_-) - \frac{m_+}{\tau_c} v_+, \\ m_- \frac{dv_-}{dt} = qE - \mu_-(v_+ + v_-) - \frac{m_-}{\tau_c} v_-, \end{cases} \quad (17)$$

где τ_c – время диффузионной релаксации системы зарядов. В целях упрощения расчетов принято, что время диффузионной релаксации для разноименно заряженных частиц одинаково и равно τ_c .

Фактически это дополнение к уравнениям (1) позволяет изучить поведение тока и явление возникновения силового воздействия при его прохождении в средах типа полупроводников, электролитов и других проводников второго рода. Особенно интересно поведение этих основных характеристик в гетерогенных системах, какими являются биологические среды в связи с процессом плазмолиза и его применением в пищевой перерабатывающей промышленности.

Полностью сохраняя систему аналитических расчетов для разряженных ионизированных газов, проведем аналогичное исследование основных характеристик и решение системы дифференциальных уравнений (17). Для наглядности анализа приведем преобразованную систему уравнений (3) в новых переменных v и P , соответствующих системе (17):

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = qE - \bar{\mu}v - \frac{m}{\tau_c} v, \\ \frac{dP}{dt} = (\mu_+ - \mu_-)v - \frac{P}{\tau_c}. \end{cases} \quad (18)$$

Здесь сохранены все предшествующие обозначения. Анализ уравнений показывает, что диффузионная релаксация характерна как для относительной скорости движения разноименно заряженных частиц, так и для их разности импульсов.

Уравнения (18) путем преобразования разности импульсов P к новой переменной u принимают вид:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{qE}{m} - \frac{v}{\bar{\tau}}, \\ \frac{du}{dt} = (\mu_+ - \mu_-)ve^{\frac{t}{\tau_c}}, \end{cases} \quad (19)$$

где введено обозначение приведенного времени релаксации $\bar{\tau}$:

$$\frac{1}{\bar{\tau}} = \frac{1}{\tau_+} + \frac{1}{\tau_-} + \frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_c}. \quad (20)$$

Новая переменная u связана с разностью импульсов P соотношением:

$$P = ue^{-\frac{t}{\tau_c}}. \quad (21)$$

В результате интегрирования (19) получаем

$$v = \frac{qE}{m} \bar{\tau} \left(1 - e^{-\frac{t}{\bar{\tau}}} \right),$$

$$P = (\mu_+ - \mu_-) \frac{qE}{m} \bar{\tau} \left[\tau_c \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}} \right) - \tau e^{-\frac{t}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]. \quad (22)$$

Для перехода к случаю разряженного ионизированного газа необходимо устремить τ_c к бесконечности. Следовательно, силовому влиянию поляризационного сопротивления среды движению заряженных частиц соответствуют малые значения времени диффузионной релаксации системы заряженных частиц, притом относительная скорость движения пар заряженных частиц стабилизируется.

$$v \approx \frac{qE}{m} \tau. \quad (23)$$

где роль времени релаксации играет поляризационное время τ .

В этом пределе изменение разности импульсов разноименно заряженных частиц во времени определяется в основном первым членом в выражении для P из (22), а значение P определяется соотношением (17).

5. Внутреннее трение, обуславливающее электроплазмолиз биологических сред [4]

В проводниках второго рода коэффициенты трения μ_+ и μ_- разноименно заряженных носителей всегда различны по величине из-за различий их размеров и масс. В таком случае, согласно (13), можно отметить наличие установившейся разности импульсов зарядов.

Следовательно, установившееся силовое воздействие, пропорциональное разности коэффициентов $(\mu_+ - \mu_-)$, будет создавать импульсный скачок на границе перехода в среду с другими значениями этой разности. Естественно, для разряженных ионизированных газов такого рода скачок не является характерным ввиду полной однородности среды.

Явления, присущие внутреннему трению в электролитах, хорошо изучены и определяют особенности распределения зарядов в приэлектродных областях. Особый интерес представляют эти явления в гетерогенных средах, какими являются биологические клеточные структуры. Клеточное строение биологических тканей, содержащее многочисленные мембраны, разделяющие различные среды с точки зрения электрических характеристик, является основной особенностью этих структур. Гидродинамический удар, возникающий на границах раздела гетерогенных структур биологического происхождения, приводит к разрушению и частичному стиранию неоднородностей. Степень разрушения клеточного строения биологических сред определяет уровень плазмолиза среды. Способность электрического тока к разрушению клеточного строения путем стирания границ неоднородностей определяет и характеризует электроплазмолиз среды. Заметим, что вне зависимости от способности ионов обоих знаков переносить заряд, возникновение силового напряжения в среде, определяемое формулой (14) в условиях стабилизации тока, является обязательным.

Таким образом, электрогидродинамический удар на границах раздела гетерогенных сред является обязательным последствием прохождения тока, приводящим к электроплазмолизу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М., 1972.
2. Лайтфут Э. Явление переноса в живых системах. М., 1977.
3. Болога М.К., Гроссу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977.
4. Ботошан Н.И., Берзой С.Е., Папченко А.Я. Явление диэлектрической токоустойчивости биологической среды при электроплазмолизе // Электронная обработка материалов. 1994. № 6. С. 47–51.

Поступила 09.10.2001

Summary

The problem of electrohydrodynamic shock occurrence on the boundaries of inheterogeneities in heterogenous media and the possibility of plasmolysis of biological raw material by means of deleting of the inheterogeneities at the cell structure level due to electrical processing is investigated. It is shown that the force action reveals by dynamic friction of charge carriers and dynamic polarization of conducting media.

РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СУЛЬФИДНЫХ РУД НА ДНЕ ОКЕАНА. ЧАСТЬ II (ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНО-ХИМИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение

Как показано в первой части публикации, для применения электрического взрыва в качестве “инструмента” воздействия на объекты добычи на дне океана нет альтернативы привнесению в канал разряда каких-нибудь химических составов, вступающих в химическую реакцию под воздействием плазмы разряда и выделяющих взрывообразно дополнительно определенную долю тепловой энергии. Особенно важно это для такой проблемы, как увеличение энерговооруженности погружной добычной системы, ограниченной предельными возможностями кабель-тросов для передачи электропитания с поверхности на дно океана. Там же изложен ряд требований к таким экзотермическим композициям (ЭКо), которые обеспечить весьма не просто.

В настоящей работе при создании ЭКо были использованы общие принципы технологии изготовления современных взрывчатых веществ и составов без применения индивидуальных взрывчатых веществ (ВВ).

ЭКо – это состав из нескольких веществ, способных к значительному выделению энергии после введения в канал мощных подводных электрических разрядов. Реологические, физические и химические свойства ЭКо должны допускать простую регулировку в зависимости от тех или иных технологических требований и мощности электровзрывной установки.

От ЭКо прежде всего требуется давать увеличение эффективности общего взрыва по сравнению с чисто электрическим взрывом (ЭВ) как минимум в два раза, для того чтобы компенсировать усложнение технологии совмещения ЭВ и взрывообразного сгорания ЭКо. И еще важнейшее требование – безопасность применения ЭКо в любом технологическом процессе, при их производстве, хранении и перевозке. Они должны быть устойчивыми к тепловым, механическим и даже электрическим воздействиям от обычной производственной или бытовой техники. В то же время они должны надежно и безотказно инициироваться мощным импульсным электрическим разрядом, чувствительность ЭКо должна быть согласована как с параметрами, так и с условиями проведения электрического разряда (открытая или закрытая разрядная камера, водная или безводная среда, уровень внешнего давления и т.п.). ЭКо должны быть настолько простыми в изготовлении, чтобы их можно было приготовить перед употреблением прямо на рабочем месте и в нужном количестве, не прибегая к каким-либо сложным или трудоемким операциям. ЭКо должны быть устойчивыми к воздействию солнечных лучей, кислорода воздуха, тепла и холода, влаги, природных толчков. Они не должны расслаиваться и изменять свои свойства от момента завершения изготовления до использования в своем технологическом процессе.

При составлении композиции необходимо учитывать особенности среды, с которой она может соприкасаться. Например, попадание атомов солей поливалентных металлов (Al, Fe, Cr и т.д.) в некоторые желатинизированные полиакриламидом ЭКо приводит к “сшивке” желатинизатора и ЭКо превращается из жидкой, свободно льющейся массы в почти твердую и резинообразную. В ряде случаев посторонние примеси могут служить катализаторами и резко увеличивать реакционную способность ЭКо или, наоборот, снижать ее химическую активность, что одинаково делает ЭКо непригодной для употребления в конкретном технологическом процессе.

Но не только исходные ЭКо должны быть безопасны и безвредны в обращении, конечные продукты их реакций должны обладать теми же ее свойствами. Продукты реакции, например, не должны давать отравляющих веществ.

Кроме того, ЭКо должны обладать необходимой для данного технологического процесса реологией, а их исходные компоненты не должны ни пылить, ни слеживаться. Они должны быть водоустойчивыми во всем интервале гидростатических давлений – от нормального до максимального рабочего. Наконец, ЭКо должны быть как можно более дешевыми, а материалы из которых составляются композиции не должны быть дефицитными, в противном случае их использование может оказаться экономически невыгодным.

Создать ЭКо, которые удовлетворяли бы всем вышеперечисленным требованиям, практически невозможно. Поэтому нам необходимо искать некое компромиссное решение, которое будет определяться особенностями соответствующего технологического процесса и строгого обеспечения (в отличие от боевых и прочих промышленных ВВ) полной безопасности в изготовлении, обращении и эксплуатации.

В настоящее время промышленные ВВ практически только смесевые, а индивидуальные ВВ входят только составной частью в них и то не во все.

Очевидно, для наших целей индивидуальные ВВ вообще не должны применяться – практически их должен заменить ЭВ.

Большинство промышленных смесевых ВВ имеют в качестве главного компонента аммиачную селитру, которая функционально служит окислителем. Поэтому и в наших разработках составов ЭКо именно эта селитра является базовой.

Но водные растворы аммиачной селитры имеют не очень сильные окислительные свойства, поскольку содержат незначительное количество избыточного кислорода (один атом на молекулу). Поэтому нами изучалась возможность использования других окислителей, хорошо растворимых в воде, недорогих и производимых в достаточном количестве. Анализ составов современных текучих и пластичных водонаполненных ВВ показал, что такими окислителями среди наиболее распространенных нитратов и перхлоратов, кроме аммиачной селитры, могут служить нитрат кальция и перхлорат натрия. Растворимость нитрата кальция в воде при комнатной температуре порядка 150 г на 100 г воды, перхлората натрия – 200 г. Другие неорганические нитраты (калия и натрия) и перхлораты (аммония и калия) обычно используют только в качестве добавок.

Применение указанных окислителей самих по себе не позволило нам создать однофазные жидкие ЭКо с хорошей работоспособностью. В лабораторных условиях эксперименты проводились с большим набором различных нитратов и перхлоратов. Это, конечно, позволило все же лучше уяснить характер электроразрядно-химического взрыва (ЭРХВ), но в производственных условиях испытания проводились с окислителями на основе водных растворов аммиачной селитры.

В качестве топлива использовалась водорастворимая органика: спирты, этиленгликоль, глицерин и др. При необходимости изучения двухфазных составов ЭКо, в качестве горючего использовались алюминиевый порошок или пудра. Алюминий покрыт твердой и устойчивой в агрессивных средах окисной пленкой Al_2O_3 и его трудно поджечь. Однако, когда это удается, развитие реакции окисления сопровождается выделением большого количества тепла, которое в состоянии поддерживать высокую скорость самостоятельной реакции. Алюминий является горючим даже по отношению к воде и дает возможность компоновать ЭКо на основе только алюминия и воды [1]. Кроме того, при создании ЭКо были использованы в качестве горючих добавок металлические порошки, содержащие кремний, ферросилиций, силикокальций, магний, железо, угольный порошок. Все перечисленные металлы по теплотворной способности уступают алюминию, однако часть их более доступна и дешева.

Однофазные, жидкие композиции на основе аммиачной селитры

Аммиачная селитра представляет собой белое кристаллическое вещество. Выпускается в виде гранул, чешуек или кристаллов. При взрыве разлагается:



где $Q_p = 1600$ кДж/кг – тепловой коэффициент реакции.

В зависимости от формы и размеров частиц насыпная плотность аммиачной селитры составляет 0,8–0,9 г/см³. Она хорошо растворима в воде, причем ее растворимость находится в сильной зависимости от температуры, как и плотность растворов. Растворение селитры в воде сопровождается активным поглощением тепла и понижением температуры замерзания раствора (раствор, содержащий 50 г селитры на 100 г воды, замерзает при температуре $T_3 = -13^\circ C$).

Термическое разложение селитры в присутствии продуктов разложения начинается при 180°C и в отсутствие теплообмена имеет самоускоряющийся характер.

Действие различных примесей на разложение селитры неоднозначно: хлориды, хроматы и соединения кобальта действуют каталитически, карбамид и сульфаты проявляют ингибирующее действие; нитраты металлов, окись алюминия, двуокись кремния влияния не оказывают.

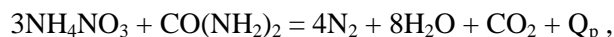
Пожаро- и взрывоопасные свойства селитры возрастают при наличии в ней примесей органического происхождения. Загорание селитры возможно от открытого огня, искр, в результате взаимодействия с некоторыми окисляемыми и агрессивными материалами. При сгорании селитра плавится, опасность взрыва расплавленной селитры выше, чем кристаллической. Тепловой взрыв может перейти в детонацию, которая способна распространяться по трубопроводам, заполненным расплавом или раствором селитры высокой концентрации. Все эти свойства селитры учитывались при разработке ЭКо.

Чувствительность селитры к детонационному импульсу определяется минимальным инициирующим импульсом и критическим диаметром, заметно зависит от влажности, размера гранул и насыпной плотности. Детонация сухой тонко измельченной селитры при плотности $0,8 \text{ г/см}^3$ сравнительно устойчиво распространяется в открытых зарядах диаметром около 100 мм, а в не разрушающейся оболочке зарегистрирована устойчивая детонация аммиачной селитры в зарядах диаметром всего 5 мм.

Система аммиачная селитра-карбамид

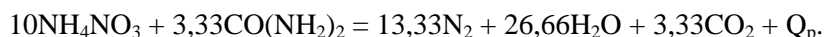
Карбамид $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – молекулярный вес 60,06. В обычном состоянии находится в виде кристаллов белого цвета без запаха. Аэрозоль с концентрацией 500 г/м^3 в воздухе не взрывается. Он хорошо растворяется в воде и в водных растворах, при нагревании образуются NH_4NCO и NH_3CO_2 . Нитрат карбамида $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{HNO}_3$ при нагревании разлагается со взрывом. К действию окислителей H_2O_2 и KMnO_4 карбамид устойчив. Это вещество широко применяется в промышленности и сельском хозяйстве.

Рассмотрим систему аммиачная селитра-карбамид в стехиометрическом соотношении



где Q_p – тепловой эффект реакции.

В пересчете на 1 кг исходной массы реакция запишется:



В дальнейшем все термодинамические величины будут относиться либо к массе вещества записанной реакции и тогда они будут даваться без указания массы (например, Q_p исследуемой реакции 893 кДж), либо относиться к единице веса. Индекс “р” обозначает тепловой эффект реакции при постоянном давлении и температуре $T = 298 \text{ К}$. Этот тепловой эффект равен разности энтальпии конечных и исходных продуктов реакции $Q_p = \Sigma \Delta H_k - \Sigma \Delta H_u$, причем при расчете теплового эффекта принималось конечное состояние воды газообразное. Температуру продуктов сгорания при постоянном давлении вычисляли из предположения равенства теплового эффекта реакции и разности энтальпий продуктов реакции при 298 К и температуре реакции $T_p = 298 + Q_p / (\Sigma X_i C_{pi})$.

Температура продуктов реакции при постоянном объеме $T_v = 2382 \text{ К}$, а тепловой эффект реакции при постоянном объеме $Q_v = Q_p + RT_0 = Q_p + 2,47n = 3106 \text{ кДж/кг}$ (здесь n – число молей газообразных продуктов реакции, $n = 43,2$ моль/кг).

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях были начаты именно с этих наиболее безопасных, не дорогих и не дефицитных ЭКо. Температура их взрыва – $T_v = 1200 \text{ К}$, а теплота взрыва $Q_v = 1480 \text{ кДж/кг}$. Такие растворы неспособны поддерживать самостоятельное горение, что следует из эксперимента и сравнения теплоты взрывного превращения Q_v и энергии, необходимой для возбуждения взрывной реакции – Q_a . Если $Q_v = Q_0/Q_a \leq 1$, то раствор не в состоянии поддерживать взрывное превращение за счет собственного тепла. Величина $Q_v - Q_a$ не что иное, как активная часть теплового эффекта, то есть $Q_v - Q_a = C_v(T_v - T_a)$. Температура начала взрыва, то есть взрывного выделения энергии T_a , как и Q_a определялись в манометрической бомбе.

Исследуемая ЭКо не поджигается до давления 50 МПа, не вспыхивает при нагревании до 633 К, тогда $Q_v = Q_a \approx 1000 \text{ кДж/кг}$. Экспериментальное определение Q_a дало значение порядка 2000 кДж/кг и таким образом введенный критерий безопасности $(Q_v - Q_a)/Q_a \leq 1$.

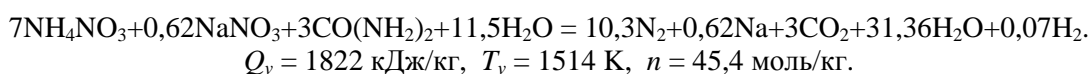
Использование такой ЭКо вместо воды в разрядной камере продемонстрировало следующее. Электрические разряды с запасаемой энергией 600–1200 Дж, инициируемые тонкой вольфрамовой проволокой, дали такое увеличение энергетических характеристик: пиковое давление и энергия

пульсации пузыря увеличились незначительно – всего на 15–20%. Это объясняется малым объемом прогреваемого вещества, когда реакция инициируется в основном излучением, составляющим только около 10 % от всей энергии, выделившейся в канале.

Максимального увеличения перехода электрохимической энергии в механическую можно добиться за счет точного соотношения между электрической энергией и массой активно реагирующей ЭЖо. Вся электрическая энергия должна расходоваться на нагрев исходной массы ЭЖо до температуры взрыва при возможно большем давлении, то есть при $V = \text{const}$. В этом случае становится существенной дополнительная положительная энергия отталкивания частиц. Для ЭЖо эта энергия сравнима с теплотой взрыва. Давление в полости ЭРХВ в десятки раз превышает давление, развиваемое в канале электрическим разрядом.

Для увеличения энергетических характеристик процесса преобразования энергии в раствор в качестве сенсibilизатора был введен хромпик ($\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) в количестве 5 %. Тогда при разряде в сенсibilизированном растворе энергия пульсирующей полости увеличилась приблизительно в 2,2 раза.

Несколько большей активности раствора можно добиться введением дополнительного окислителя NaNO_3 . Нитрат натрия уменьшает содержание воды в реакционной смеси. Химическую реакцию в этом случае можно записать



Представленный раствор удовлетворяет критерию безопасности и может быть использован в разрядных камерах и открытых объемах вместо воды. Он позволяет увеличить энергию пульсирующей послеразрядной полости в 2,5–3 раза.

Добавка хрома практически не изменяет энергетику раствора. Увеличение активности ЭЖо обусловлено изменением ее структуры, механизмом реакции и характером протекания процесса разряда. Хром образует комплексы в 0-, 1-, 2-, 3-, 4-, 5- и 6-валентных состояниях. Полихроматионы, где Cr(VI) характеризуется координационным числом 4. Они представляют собой цепочку тетраэдров, соединенных друг с другом общими вершинами. Комплексообразование приводит к росту скорости реакции.

Тем не менее, с точки зрения разработки глубоководных сульфидных руд (ГСР), рассмотренные ЭЖо имеют относительно низкое теплосодержание и высокую энергию активации химического процесса и их состав может служить только в качестве базового.

Одним из путей увеличения теплосодержания состава является использование в качестве горючего активных металлов, например алюминия.

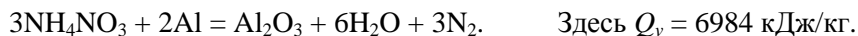
ЭЖо с алюминием

В работах [2–5] много внимания уделено изучению роли и влияния алюминия в составе ЭЖо для резкого увеличения их эффективности.

Наиболее высокими энергетическими характеристиками обладают смеси аммиачной селитры с алюминием. Стехиометрическая смесь с 40,3 % алюминия реагирует по схеме:



При содержании 18,36 % алюминия реакцию можно записать

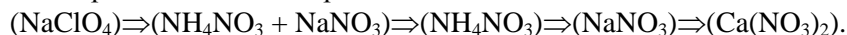


Бинарные смеси алюминия и аммиачной селитры, применяемые при карьерной разработке полезных ископаемых, имеют низкую детонационную способность и для ее увеличения в состав вводят индивидуальные ВВ (тротил, гексоген). При использовании подобной бинарной смеси, вводимой в мощный электрический разряд, индивидуальных ВВ не требуется. И едва ли не самое важное – использование здесь водных растворов аммиачной селитры позволяет усилить характеристики ЭВ, повысив одновременно их пожаро- и взрывобезопасность. Натурные испытания таких ЭЖо проводились при проведении работ по разрушению бетона и показали высокую эффективность их в ЭРХВ. В качестве загустителя в нашей работе использовался полиакриламид, а для образования прочных структур с поперечными связями вводились сшивающие агенты в виде солей металлов с переменной валентностью (хрома, сурьмы, висмута, бора, железа и др.).

При использовании алюминия обеспечивалась его химическая стабильность, поскольку алюминий может окисляться водой. Особенно активно реакция идет в присутствии щелочи. Одним из

способов достижения химической стабильности составов является введение буферной смеси – NaOH:K₂PO₄ (1:29). Используется гранулированный алюминий, сферический порошок с нанесенным покрытием или без него, пигментная алюминиевая пудра.

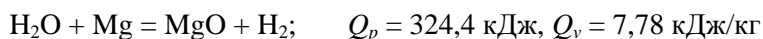
Кроме основного вида окислителя – водного раствора аммиачной селитры с твердой фазой и без нее была исследована возможность применения других окислителей: натриевой селитры (NaNO₃), совместный раствор аммиачной и натриевой селитры, перхлорат натрия (NaClO₄), нитрат кальция (Ca(NO₃)₂) и др. Эффективность действия ЭКо на основе этих окислителей при одном и том же содержании алюминия возрастает в таком порядке:



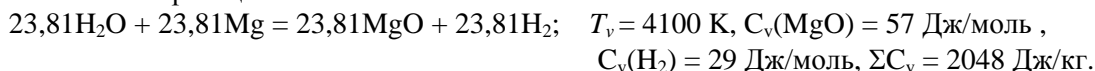
Появление в растворе твердой фазы окислителя значительно активизирует такие ЭКо. Но использование их требует более строгого поведения при работе с ними (как в процессе приготовления, так и при эксплуатации).

Магний, железо, кремний и их сплавы в составе ЭКо

Магний в насыщенном растворе аммиачной селитры оказался нестойким, реакция начиналась сразу же после контакта металла с раствором и по мере выкипания воды принимала взрывной характер. В чистой и морской воде магний в виде порошка размером порядка 100 мкм не окислялся в течение примерно 10 минут. Тогда можно осуществлять взрывной характер окисления магния водой с помощью мощного электрического разряда:



В пересчете на 1 кг реакция запишется



Более устойчиво в растворе аммиачной селитры ведут себя сплавы алюминия с магнием.

Железо, как и магний также вступает в реакцию с кислородом в водном растворе аммиачной селитры, но реакция не приобретает взрывного характера.

Значительно больший интерес представляют металлические порошки из кремния, ферросилиция и силикокальция. Они дают стойкие ЭКо с высокой калорийной способностью и самое главное в конечных продуктах содержат экологически безвредный кремнезем SiO₂.

ЭКо с повышенным газовыделением.

Наиболее приемлемым способом доставки добытых ГСР на поверхность, вероятно, может стать эрлифтный [6, 7], требующий больших расходов газа под высоким давлением. Альтернативное средство [8] – всплывающий грузовой понтон для продувки цистерн при всплытии с грузом должен быть снабжен источником газа высокого давления.

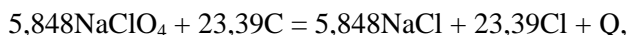
Заманчивая идея – использовать для этих целей газ, генерируемый при ЭРХВ и освобождающийся после выполнения работы разрушения при отколе блоков сульфидных руд от массива и при их дроблении на куски, подъемные эрлифтом.

Эта идея подвергнута нашему анализу на осуществимость в принципе (есть ли такие ЭКо, которые, соответствуя всем другим требованиям, еще могут ощутимо генерировать не конденсирующийся газ), достаточность (сколько можно иметь газа в долях от необходимого количества для выполнения, по существу вспомогательной, подъемной операции) и экологичность (ядовитый газ неприемлем).

Рассмотрим экологически безвредную реакцию, конечным продуктом которой является поваренная соль NaCl и окись углерода CO. Образование паров воды, которые немедленно после ЭРХВ конденсируются, как в случае применения других составов ЭКо, здесь полностью исключается:



где Q=462 кДж или в пересчете на 1 кг



где Q=2700 кДж.

Объем газообразных продуктов при нормальных условиях составит:

$V = nRT/p = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$, а с изменением гидростатического давления – повышением его: при $p = 4,3 \text{ МПа} - 0,01 \text{ м}^3/\text{кг}$; при $p = 14,9 \text{ МПа} - 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; при $p = 50 \text{ МПа} - 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

По данным [5–7] характерный расход газа 72600 м³/час при подаче в коллектор эрлифта или 20 м³/с, что соответствует количеству взрывообразно сгорающего ЭКо приблизительно 40 кг/с и выделившейся энергии 108 МДж. На отделение от массива и дробление расход ЭКо должен соста-

вить приблизительно 1 кг/м^3 , то есть при выделении такого количества газа будет разрушено и поддроблено 40 м^3 ГСР.

На взрыв 40 кг ЭКо с энергией 108 МДж потребуется порядка 10 МДж электрической энергии. Если запасенная энергия порядка 100 кДж , то необходимо производить 100 импульсов в секунду.

Отсюда ясно, что полностью обеспечить газом работу эрлифта за счет газовыделения ЭРХВ не реально. Тем не менее частично – целесообразно. То есть система доставки добытого материала на поверхность должна снабжаться устройством сбора выделившегося газа.

Тем более это целесообразно для продувки балластных цистерн всплывающих понтонов, для которой расход газа более чем на два порядка величины меньше.

Анализ возможности создания и применения для добычи ГСР жидких однофазных ЭКо на основе солей хлорной кислоты

В условиях автономной работы экспедиции по добыче руд в открытом океане в течение более полугода, возможно, более выгодными могут стать ЭКо на основе солей хлорной кислоты.

Оценка окислителей, используемых для изготовления промышленных ВВ, показала перспективность применения для изготовления ЭКо солей хлорной кислоты, таких как NaClO_4 ; LiClO_4 и других. Этому есть несколько причин.

Одна из них – высокая растворимость большинства солей в воде и органических горючих, что дает возможность формирования однофазных ЭКо с хорошо регулируемыми теплофизическими свойствами. Особый интерес представляет перхлорат натрия (NaClO_4), поскольку он имеет наиболее высокую растворимость в воде (210 г на 100 г воды при 25°C). Растворимость его мало зависит от температуры и это дает возможность изготовления ЭКо со свойствами, практически не изменяющимися в рабочем диапазоне температур от 5 до 35°C . Кроме того перхлорат натрия хорошо растворим в таких дешевых и экологически чистых органических горючих, как этиленгликоль (75 г на 100 г $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$); ацетон (52 г на 100 г $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$); этаноламин (90 г на 100 г $\text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{OH}$) и др. Водорастворимая органика хорошо желатинизируется и позволяет изготавливать ЭКо высокой водостойчивости. Это свойство в проблеме ЭРХВ имеет особое значение, поскольку предполагаемое использование составов связано с проведением ЭРХВ в водной среде на большой глубине.

Важным обстоятельством является и то, что водоорганические растворы перхлората натрия не детонируют, их детонация может быть искусственно обеспечена появлением большого количества пузырьковых газовых включений. Последнее же может обеспечить такой режим ЭВ, в предпробойной стадии которого множество стримеров пронизывает разрядный промежуток, генерируя на своем пути плотную систему пузырьков.

Отсутствие детонации раствора в таких условиях можно считать критерием безопасности при работе с ним. Тщательное исследование детонации позволило установить, что избыток растворителя к стехиометрическому соотношению больше, чем $3:7$, гарантирует отсутствие детонации. Была установлена корреляция между детонационной способностью растворов, температурой и теплотой взрыва. Показано, что детонируют растворы, температура взрыва которых выше 2400 К , при этом химическая природа органического горючего не оказывает заметного влияния на детонационную способность растворов. Температура $T_v < 2400 \text{ К}$ соответствует теплотам взрыва при постоянном объеме $Q_v < 3,5 \text{ кДж/г}$; когда $T_v > 2400 \text{ К} - Q_v > 3,5 \text{ кДж/г}$.

Интенсивная химическая реакция разложения перхлората натрия и собственно реакция окисления горючего начинается при $500\text{--}600^\circ\text{C}$. То есть давление, развиваемое в полости взрыва, не может привести к ударному разогреву этой ЭКо до температуры взрывного самопревращения, поэтому они не относятся к детонирующим. Однако следует отметить их способность к выделению энергии в режиме горения, поскольку $Q_a/Q_s > 1$ (здесь Q_a – активная составляющая тепловой энергии, $Q_a = a(T_v - T_a) \approx 2192 \text{ кДж/кг}$ при $T_a = 900 \text{ К}$). Поэтому такая ЭКо предопределяет необходимость обращения как с пожароопасным веществом.

Следует отметить, что энерговыделение ЭКо на основе перхлората лития в несколько раз больше, чем на основе перхлората натрия.

Очень важно добиваться согласования параметров разрядного контура с некоторыми характеристиками ЭКо, такими, как их электропроводность, влияющая в первую очередь на выбор рабочего напряжения электрических взрывов, которое в свою очередь сильно влияет на величину запасаемой емкостным накопителем энергии, а также на форму разряда.

Заключение

Обоснован новый метод разработки полезных ископаемых на дне Мирового океана с помощью мелкомасштабных электроразрядно-химических взрывов. Выявлены проблемы на пути создания соответствующей разрядно-импульсной технологии добычи глубоководных сульфидных руд.

Для решения части проблем создан класс аммиачно-селитренных энерговыделяющих композиций, вводимых в разряд и способных в несколько раз увеличить эффективность работы электро-взрывных установок. В них в качестве горючих компонентов используются металлы и карбамид. Созданные специально для использования совместно с электрическим взрывом на больших глубинах, отобранные энерговыделяющие композиции при нормальных условиях являются взрывобезопасными, водоустойчивыми смесями с теплосодержанием от 1 до 8 кДж.

Установлена также физическая эффективность применения, кроме аммиачно-селитренных композиций таких, где в качестве активных окислителей используются водные растворы перхлората натрия и некоторых других неорганических нитратов и перхлоратов.

Преимущество предлагаемого метода разработки сульфидных руд с использованием электро-разрядно-химических взрывов по сравнению с аналогичной добычей, но при использовании чисто химических взрывчатых веществ состоит в следующем:

1. Исследованные и предлагаемые энерговыделяющие композиции просты в изготовлении, дешевле и удобнее по сравнению с соответствующим ВВ; их реакция запускается только мощным электрическим взрывом;

2. Предлагаемые композиции обеспечивают более высокую степень пожаро- и взрывобезопасности при их изготовлении, транспортировке, хранении и эксплуатации;

3. Созданные энерговыделяющие композиции имеют предпосылки высокой экологичности, поскольку они не содержат индивидуальных взрывчатых веществ и не требуют специальных средств инициирования взрыва, как известные: тол, гексоген, гремучая ртуть, азид свинца и подобные им индивидуальные взрывчатые вещества.

Наконец самое важное – применение созданных экзотермических композиций, вводимых в плазму электрических взрывов, поможет решить проблему энерговооруженности электровзрывного инструмента для отделения блоков сульфидной руды от массива и дополнительного их дробления до размеров соответствующих возможностям гидротранспортирования на поверхность, существенно ограниченного предельной электрической мощностью реально существующих кабель-тросов для больших глубин. Частично, с помощью выделяемого некоторыми из них при электроразрядно-химическом взрыве неконденсируемого газа, можно решать проблему обеспечения газом высокого давления эрлифтных и пантонных систем доставки добытой руды на поверхность.

Наконец, предлагаемый метод добычи сульфидных руд на дне океана хорошо управляется, как процесс в своей основе электрический, и при работе должен легко фиксироваться системами акустического контроля и управления по сопутствующему звуковому сигналу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А., Малюшевский П.П., Кривицкий Е.В. и др. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. М., 1977.
2. Кондриков Б.Н., Вовченко А.И., Анников В.Э., Иванов В.В. Взрывные превращения электрической и химической энергии. Киев, 1987.
3. Исследовать возможности инициирования электрическим взрывом различных режимов экзотермических реакций в химически активных гомогенных средах. Отчет/ПКБЭ АН УССР, рук. А.И. Вовченко, инв. № 0290 0050500. Николаев, 1990.
4. Покровский Г.И. Взрыв. М., 1967.
5. Исследовать физические и технические особенности электровзрывного разрушения минеральных сред под высоким (до 50 МПа) давлением в морской воде. Отчет/ПКБЭ АН УССР, рук. П.П. Малюшевский, госр. № 0189 0080933. Николаев, 1990.
6. Смолдырев А.Е. Транспортировка рудоносных отложений с морского дна // Известия вузов. Горный журнал. 1985. № 9. С. 61–64.
7. А. С. 384996. СССР. Эрлиф. П.П. Малюшевский, Г.Г. Горовенко, Ю.А. Благоверов.
8. Матвеев А.А., Широков И.А., Тестов В.Н. Исследование прогресса транспортирования глубоководных твердых полезных ископаемых устройствами типа УППК // Ускорение НТП в горном деле и геологии на основе применения новых технологий. Свердловск, 1987. С. 8–9.

Поступила 11.04.2001

Summary

The electroexplosion compositions of chemical substances for using as adds to canal of electric pulses are grounded and offered. Fast burning of such compositions by the influence of pulse plasma lets to receive additional energy in necessary for breaking sulfa-ores on the bottom of the Ocean quantity. Opportunity of gas that throws out during the electropulse-chemical explosion of work of airlift and chamber lift, which lift ore to the surface of Ocean was estimated.

THE INVESTIGATION OF CHEMICAL ACTION OF GLIDING AND GLOW DISCHARGES BETWEEN METALLIC ELECTRODE AND AQUEOUS SOLUTION

*Institute of Chemistry of Solutions RAS,
Akademicheskaya, 1, Ivanovo, 152045, Russia*

1. Introduction

Interaction between the gas discharge plasma and solution stimulates the oxidative chemical reactions in the liquid phase, and those can be used to solve applied problems. The choice of discharge type for purposes of practice demands to take into account its chemical efficiency and engineering applicability. Engineering fitness of the gliding discharge was proved by experiment [1]. At the same time the chemical action of this type of discharge on solution was not investigated nearly. Some investigations were carried out only for the case of the gliding discharge between two metal electrodes located near solution surface. However the chemical activity of the discharge can change if the solution is used as one of electrodes. In this case the active species are produced not only in the plasma volume but also directly into the solution. Therefore the goal of this work was to investigate the chemical action of gliding and glow discharges between metal electrode and solution with the comparison of their actions.

2. Experiment

The arrangement of the experiment is shown in fig. 1. An oxidative destruction of dye and oxidation of Mn^{2+} to MnO_2 in aqueous solution under the plasma action were investigated. Rectangular reaction cell of polymethylmetacrilate contained up to 400 ml of solution. The air flow to sustain gliding discharge was above of 3 l/min. The same air flow was passed through the reactor in the case of glow discharge also. The kinetic of dye destruction was controlled by optical transmittance in the absorption maximum region of dye initial solution (about of 600 nm). The experimental set included the halide-cycle incandescent lamp as radiation source, mirror grating monochromator, photocell, the amplifier and XY-recorder. Absorption spectra of initial and treated solutions were controlled by spectrophotometer. MnO_2 output was determined gravimetrically. Besides that temperature of the solution and air (at the entrance and at the exit) was measured in our experiments. Calorimetric measurements allowed to analyse of the discharge energy balance. The comparison of gliding and glow discharge was carried out at same currents. However the gliding discharge voltage was 2–2,5 times higher than that of glow discharge.

3. Results

Change of solution optical transmittance ($\lambda = 600$ nm) under glow and gliding discharges actions is shown in fig.2. Such data allowed to calculate the dye molecules concentration change. The calculations were carried out on the base of Buger-Lambert-Beer law assuming that the destruction products do not absorb in the region near 600 nm. The results of calculations are demonstrated in fig. 3. These results testify more high chemical activity of the gliding discharge at the same discharge currents. In our opinion it may be due to greater average length of the gliding discharge. In fact the measurements of the dye destruction under the stationary discharge action prove the increase of the reaction rate at higher discharge gaps. However the change of the dye absorption spectra under the plasma action show some other results. Data presented in Fig.4 show no essential difference between the gliding and glow discharge action. Records of the absorption spectra were carried out 30-40 minutes later the plasma treatment. At the same time our measurements demonstrated the existence of post-effect. Perhaps, it is the H_2O_2 accumulation in solution that causes it. We investigated post-effect influence at various doses of plasma treatment. Results of these investigations show post-effects of two discharges action to be approximately the same. Some observed differences may be due different compositions of active particles produced at these discharges action. Besides that one has to take into consideration the difference of the discharge power at constant discharge current.

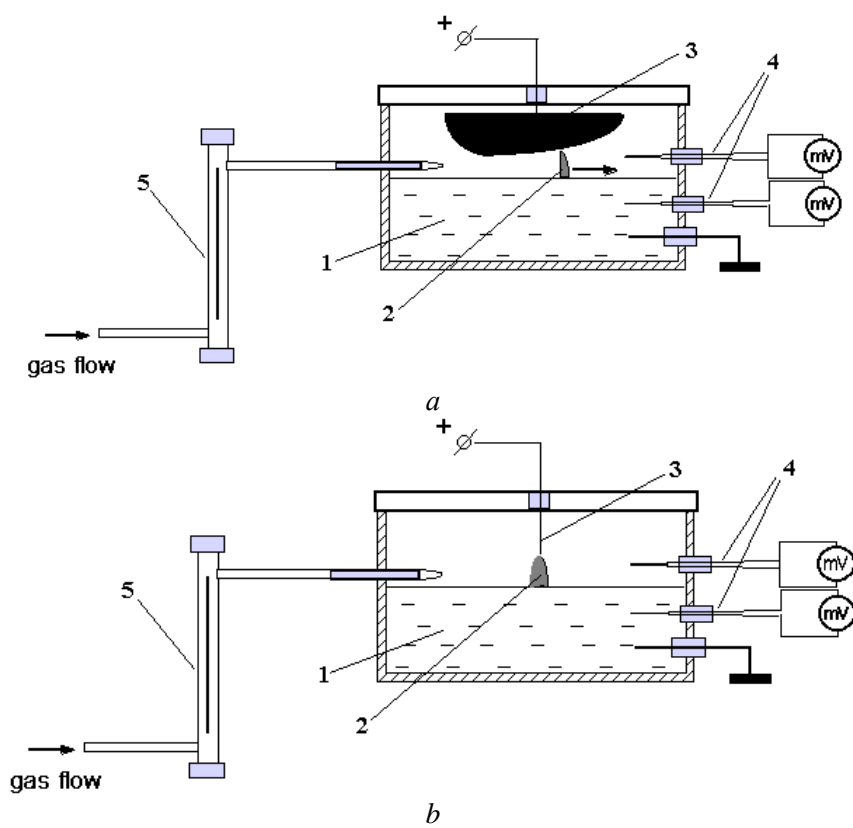


Fig. 1. Experimental sets for investigation of gliding discharge (a) and glow discharge (b): 1 – electrolyte, 2 – plasma zone, 3 – electrode, 4 – thermocouples in thin-walled glass capillaries, 5 – rotameter.

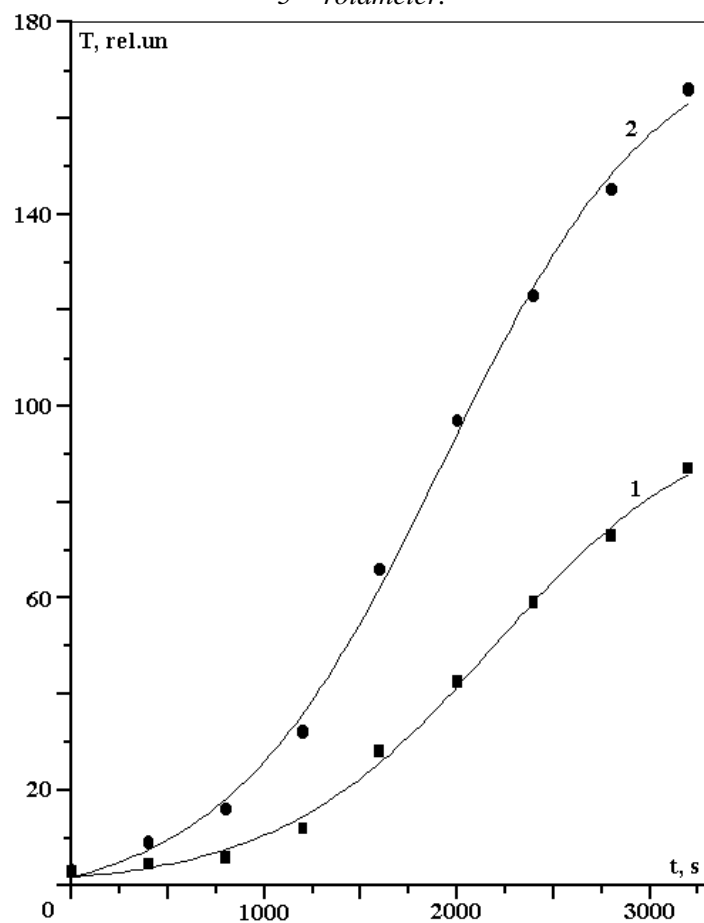


Fig. 2. Change of the dye solution optical transmittance under plasma action: 1 – glow discharge, 2 – gliding one. Discharge current – 6 mA.

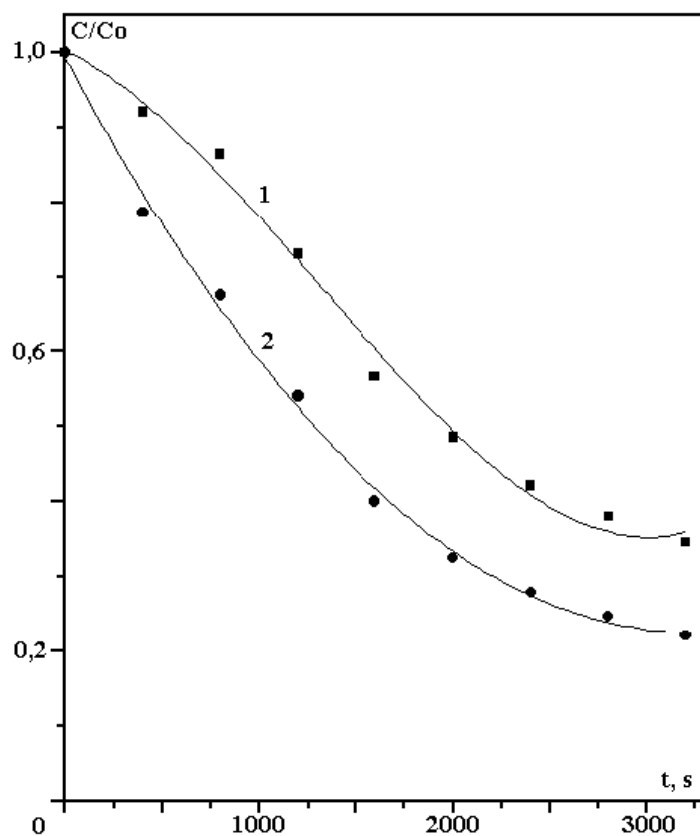


Fig.3. Dependence of dye relative contense in solution from the time of plasma treatment: 1 – glow discharge, 2 – gliding one. Discharge current – 6 mA.

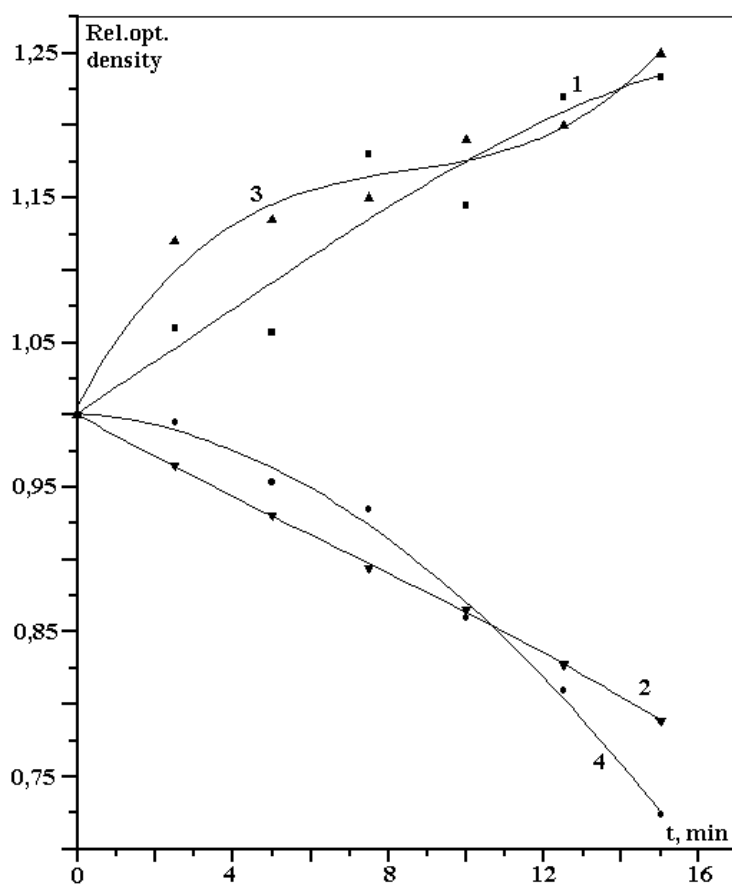


Fig. 4. Change of relative optical density of dye solution under plasma action at $\lambda=440$ nm (1, 3) and $\lambda=600$ nm (2, 4): 1, 2 – glow discharge, 3, 4 – gliding one.

The investigation of MnO_2 synthesis by the plasma treatment of $MnCl_2 \cdot 2H_2O$ solution showed the another pattern. MnO_2 outputs under the stationary and gliding arc action are presented in table 1.

Table 1. MnO_2 synthesis under gliding arc and stationary arc action

Type of discharge	I , mA	U , kV	W , W	Current efficiency	Output Molecules/100eV
Glow	20	0,9	18	1,25	0,014
Gliding	20	2,6	52	0,66	0,0074

Table 2. Dye destruction under the plasma action

Type of discharge	I , mA	U , kV	W , W	Current efficiency	Output molecules/V
Glow	6	3,6	21,6	0,042	$4,7 \cdot 10^{-4}$
Gliding	6	6,8	40,8	0,079	$4,6 \cdot 10^{-4}$

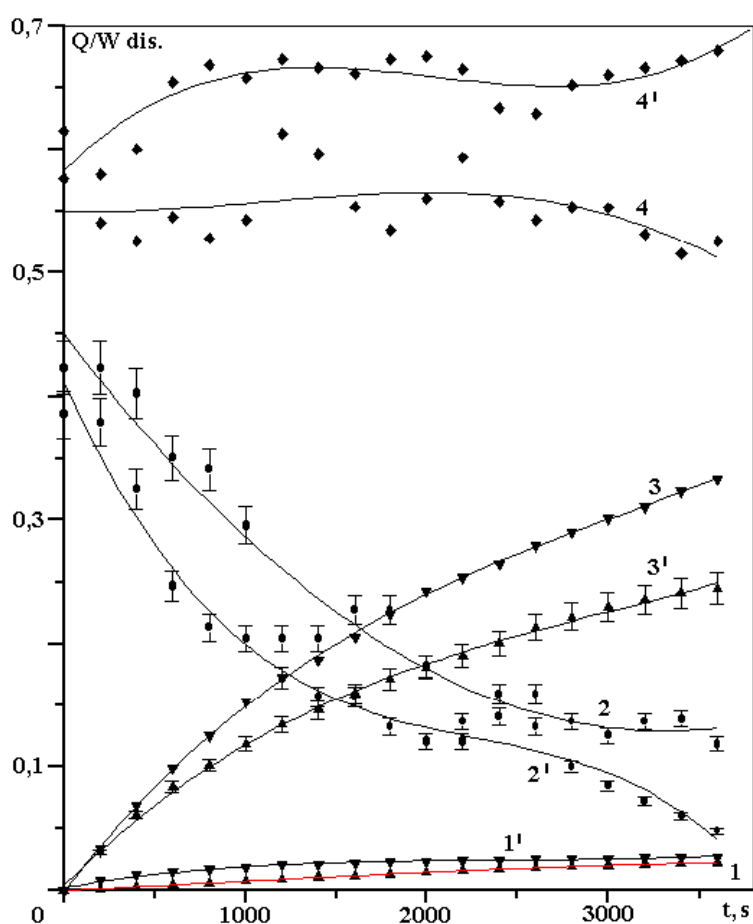


Fig. 5. Energy balance of discharge:

1 – air flow heating, 2 – solution heating, 3 – “equilibrium” heat losses, 4 – vapour jet formation.

Data with ¹-index are for the case of gliding discharge, without it-for the case of glow discharge.

The comparison of these data with that of dye destruction (table 2) shows that chemical action of any type of discharge depends considerably on the nature of processes initiated, so the choice of discharge type has to be specific only. Experimental data gave evidence there are difference not only in chemical actions of gliding and glow discharges but in their energy balances. According to our measurements the cathode potential fall under glow discharge conditions is up to 800 V near the solution surface [2]. High surface density of energy results in the formation of vapour jet in the region of the cathode spot. Energy expenditure on this process has to influence on the discharge properties. Calorimetric measurements allowed us to estimate the

relation between principal channels of energy dissipation during actions of glow discharge and gliding one. Results in fig.5 shows the part of energy for vapour jet formation to be higher in the case of gliding arc.

REFERENCES

1. Janowski T., Stryczewska H.D., Ranaivosoloarimanana A., Czernichowski A. Industrial trials of the glidarc plasma reactor // 12th Int. Symp. on Plasma Chemistry, Proceedings. Vol.2, Minneapolis, 1995. P. 825–830.
2. Кутенов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Проблемы и перспективы исследований активируемых плазмой технологических процессов в растворах // Доклады Российской академии наук. 1997. Том 357. № 6. С. 782–786.

Поступила 08.10.2001

Summary

Chemical effects induced by gliding and glow discharges in solutions were studied. Processes of oxidative destruction of dye (monoclortriazine blue) and oxidation of Mn^{2+} to MnO_2 were taken as an example for our investigations. The gliding discharge was more effective in the case of dye destruction, but as for Mn^{2+} oxidation , the current efficiency for glow discharge was higher.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Letitsia Oprean, Victor Nederitsa

RESEARCHES ON THE ACTION OF THE ULTRAVIOLET RADIATION ON BACTERIA

*Lucian Blaga University of Sibiu, Faculty of Textiles and Food Processing,
7–9 Dr. Ratiu St., 2400, Sibiu, Romania*

The microbial cell, having a light weight, is strongly influenced by the environmental conditions and reacts very quickly at different factors, either by adapting or, on the contrary, by disappearance. Thus, the microbial growth depends on numerous physical, chemical and biological factors, these leading to specific adaptations during their evolution, by interactions between microorganisms and environment. One of the exogene factors of the natural/industrial environment that influences the microorganism is the radiant energy [1, 3].

The living world is bombarded with electromagnetic radiation with the wavelength between 10^4 and 10^6 . Within this range, the microorganisms are influenced by radiation in a specific way. Although certain wavelengths of the visible light are beneficial for some bacteria, as the photosynthesizing forms, usually solar light is detrimental to the most bacteria. This effect is due mainly to the ultraviolet (UV) range of the spectrum, especially to this radiation with the wavelength from 260 and 254 nm, that have a lethal or mutagenic effect on the living cell [3, 4].

The ultraviolet radiation, depending on the dose and the microorganism status, has a maximal lethal effect at $\lambda = 254$ nm and cause the tryptophan degradation with forming of toxic compounds that led to the physiological dead of the exposed cell. If the dose is sublethal, the radiation induces modifications in the DNA structure, favoring the thiamin molecules coupling; the genetic information is transmitted with errors and mutants can be obtained. The irradiated bacterial cell thus cannot reproduce and dies.

The bactericidal effect of the culture exposure to the light with UV radiation can be reduced by immediate exposure to visible light, with the λ between 365 and 450 nm, when the microorganisms can rebuild their initial structure. This action, opposite to the killing one, is called photoreactivation. By photoreactivation, the visible light activates the enzymes that separate the thiamin dimmers formed after the UV irradiation or in darkness, when the cell has the capability to eliminate the denatured portion. Thus, the number of the surviving (living) cells of a microbial population that underwent the action of the visible light after UV irradiation is greater than in case of the populations treated only with UV radiation.

In practical terms, the UV radiation can be used for air sterilization and for obtaining valuable mutants, used because of their biosynthesis products.

The papers describes comparative researches on the bactericide (lethal) effect of the exposure of a *Escherichia coli* culture to UV radiation ($\lambda = 254$ nm) and the reduction of this effect by photoreactivation with visible light of a bacterial culture irradiated with UV radiation [5].

Materials and method

As study material it was used a young (24 hours) *Escherichia coli* bacterial culture, and as UV radiation source it has been used laboratory UV microbicidal (sterilised) lamp (UV radiation, with $\lambda = 254$ nm). The working technique has consisted in the following steps:

1. From the 10^{-6} , 10^{-7} and 10^{-8} dilutions, obtained from a pure bacterial culture of *Escherichia coli*,

there have been made inoculations on a lactose agar broth medium in Petri plates, using the Koch method [6]. To obtain the most exact results, from the same dilution there have been made inoculations on two parallel plates. After 72 hours (3 days) of incubation in thermostat, at 30°C, the bacterial colonies formed on these plates were counted and the total number of living bacterial cells in a ml (TGN) was determined (control samples) [6].

2. From the control 10^{-6} dilution are poured 2 ml in 4 sterile Petri plates and on each plate it is noted the irradiation time: 5 sec., 10 sec., 15 sec., 20 sec.

3. The Petri plates are arranged in the increase order of the irradiation time inside the exposure box. Remove all the Petri dish lids and turn on the UV light. Replace the lids and remove the plates at the appropriate 5-second intervals. Wrap with aluminum foil to prevent possible photoreactivation.

4. Right after the UV radiation exposure it is prepared the 10^{-7} dilution of each irradiated sample, by transferring 0.1 ml of liquid from each plate to sterile ones and it is poured lactose agar broth, fluidized and cooled at 45°C; after gentle stirring, the plates are covered with aluminum foil. After 72 hours of incubation in thermostat, at 30°C, it is determined the total number of living bacterial cells/ml (TGN).

5. From each Petri dish irradiated with UV radiation it is transferred 1 ml in a sterile test-tube, on which the UV irradiation time is noted.

6. These test tubes are treated with visible light from a 500 W light bulb, for 30 min., placed into a vessel with ice, in order to prevent heating.

7. Right after the visible light exposure it is prepared the 10^{-7} dilution of each photoreactivated sample, by transferring 0.1 ml of liquid from each photoreactivated test-tube, on sterile plates and it is poured lactose agar broth, fluidized and cooled at 45°C; after gentle stirring, the plates are covered with aluminum foil. After 72 hours of incubation in thermostat, at 30°C, it is determined the total number of living bacterial cells/ml (TGN).

8. In the UV irradiated samples and in the photoreactivated ones it is calculated the survival percentage (irradiated and photoreactivated living cells).

Results and discussions

The results obtained in studying the bactericide (lethal) effect of the exposure of a *Escherichia coli* bacterial culture to UV lethal radiation and the reduction of this effect by photoreactivation with visible light of a bacterial culture irradiated with UV radiation are presented in Table.

Action of the UV radiation and photoreactivation on the Escherichia coli bacterial cells

Irradiation time (seconds)	Irradiated bacterial cells		Photoreactivated Bacterial cells	
	Number of living cells x 10^7	Percentage of living cells	Number of living cells x 10^7	Percentage of living cells
5	131	73.07	156	85.43
10	85	46.71	115	63.18
15	26	14.28	62	34.06
20	8	4.39	41	22.52

The survival curve, expressing the relationship between the number of living bacterial cells after irradiation/photoreactivation vs. the irradiation time is presented in figure 1.

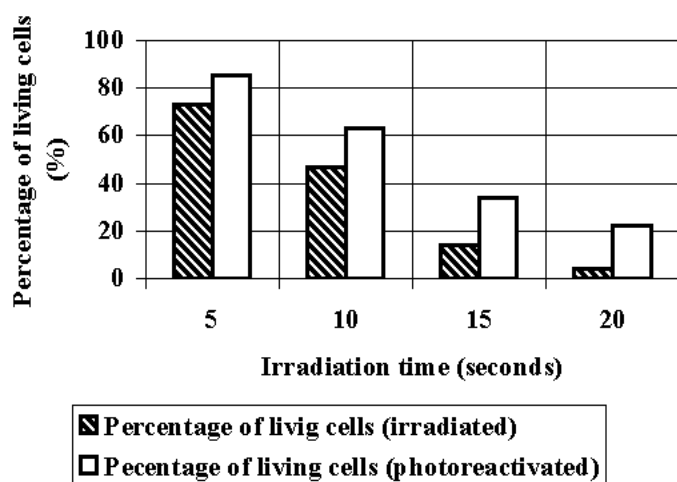
The control bacterial culture of *Escherichia coli* non irradiated contains 182×10^7 cells/ml.

As far as the toxicity of the UV radiation on the *Escherichia coli* bacterial cells, it can be seen in table and fig. that this radiation have a different bactericide effect, depending on the exposure time. The minimal and maximal bactericide effect of the UV radiation on *Escherichia coli* was noted after 5 seconds and 20 seconds of irradiation.

The *Escherichia coli* bacterial culture exposed to UV radiation for 5 sec., it can be seen a decrease of the living irradiated cells, the value being with 26.93% smaller that in controls (not irradiated sample).

In the *Escherichia coli* bacterial cultures, exposed to UV radiation for 10 and 15 sec., it can be seen a decrease of the living irradiated cells, the values being with 53.29% and 85.72 % smaller than in control, respectively. The *Escherichia coli* bacterial culture exposed to UV radiation for 20 sec., it can be seen a decrease of the living irradiated cells, the value being with 95.61% smaller that in control. The number of

living cells of a photoreactivated culture of *Escherichia coli* is, as seen in Table and Fig. greater than in the UV irradiated culture.



The rate of living bacterial cells after irradiation/photoreactivation depending on the irradiation time.

In the *Escherichia coli* bacterial culture UV irradiated for 5 sec. and photoreactivated the number of living cells is also increased, the value being with 12.36% greater than in the UV irradiated sample.

In the *Escherichia coli* bacterial cultures exposed to UV for 10 and 15 sec. and photoreactivated the number of living cells is also increased, the value being with 16.47% and 19.78% greater than in the UV irradiated sample.

In the *Escherichia coli* bacterial culture UV irradiated for 20 sec. and photoreactivated the number of living cells is also increased, the value being with 18.13% greater than in the UV irradiated sample.

Conclusions

1. The ultraviolet radiation has a differentiated bactericide (lethal) effect on the *Escherichia coli* bacterial cells, according to the bacterial cells initial concentration and irradiation time.
2. The number of living cells in the *Escherichia coli* bacterial culture that was exposed to the visible light action after UV irradiation (photoreactivation) is greater than that in the bacterial culture exposed only to UV radiation.

REFERENCES

1. Bâlbăie, V. Bacteriologie medicală. Bucharest.: Ed. med., 1987.
2. Duca, E., Duca, M., Furtunescu, G. Microbiologie medicală. Bucharest.: Ed. Ceres, 1989.
3. Guiraud, J.P. Microbiologie alimentaire. Paris. Dunod., 1998.
4. Leveau, J.Y., Bouix, M., - Microbiologie industrielle. Paris.: Lavoisier, 1993.
5. Oprean, L. Microbiologia produselor alimentare. Sibiu.: Ed. Univ. Lucian Blaga, 1998.
6. Bourgeois, C.M., Leveau, J.V. Techniques d'analyse et controle dans les industries agroalimentaires. // Le controle microbiologique. Paris.: Dunod, 1993.

Received 14.06.2001

Summary

The paper presents the results of the comparative research on the bactericid (lethal) effect of the exposure of a *Escherichia coli* bacterial culture to lethal UV radiation and the reduction of this effect by photoreactivation with visible light of the UV irradiated culture. As UV radiation source it has been used laboratory UV microbicidal (sterilised) lamp (UV radiation, $\lambda = 254$ nm). For the cultivation of control and irradiated bacterial culture of *E. coli* as well as for the numbering of the living cells/ml (TGN), there have been used the standard methods. The ultraviolet radiation has a differentiated bactericide effect on *Escherichia coli* cells, depending on the initial concentration of the bacterial cells and the irradiation time. The number of living cells in the *E. coli* bacterial culture that was exposed to the visible light action after UV irradiation (photoreactivation) is greater than that in the bacterial culture exposed only to UV radiation.

ОБРАЗОВАНИЕ ГЕТЕРОАУКСИНА СТРЕПТОМИЦЕТАМИ *S. CANOSUS* 71 И ЕГО НОВЫМИ ВАРИАНТАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ В РЕЗУЛЬТАТЕ γ - И КОМБИНИРОВАННОГО (γ + УФ) ОБЛУЧЕНИЯ

*Институт микробиологии АН Молдовы,
ул. Академией, 1, Кишинев, MD–2028, Республика Молдова
* Молдавский государственный университет,
ул. А. Матеевич, 60, Кишинев, MD–2009, Республика Молдова*

Введение

Со времени открытия рентгеновских лучей и радиоактивности учеными многих отраслей биологии анализируется клеточный радиобиологический феномен. За этот период накоплен обширный экспериментальный материал о характере морфологических и биохимических изменений в облученной клетке, изучены кинетические закономерности развития лучевого поражения, проведен количественный анализ гибели клеток в облученной популяции [1–3].

Основными физическими факторами, оказывающими влияние на организмы и принятыми в практике биофизических исследований, являются ионизирующие и УФ-излучения. Конечные биологические и генетические эффекты этих излучений оказываются во многом сходными, несмотря на физические различия между ними [4, 5]. Их действие приводит не только к повреждающему или летальному эффектам, но может служить мутагенным и селективным фактором [6].

Под действием мутагенных факторов возникают те же типы изменчивости, что и при спонтанной изменчивости, но с гораздо большей частотой. Особенно это относится к таким морфологическим типам колоний, как аспорогенные, карликовые, секторные. Кроме того, мутагены способны вызвать появление таких вариантов, которые никогда не возникают самопроизвольно [7, 8].

В настоящее время множество публикаций посвящено описанию новых подходов к созданию метаболических путей или новых штаммов, позволяющих повысить биосинтез микроорганизмами антибиотиков, витаминов, аминокислот, липидов, ростовых факторов растений [7, 8]. К ростовым факторам растений относят фитогормоны, витамины и некоторые аминокислоты.

Известно, что актиномицеты — одна из групп почвенных микроорганизмов, активно синтезирующих гетероауксин. Так, было исследовано 100 штаммов разных видов актиномицетов и установлено, что 67% из них синтезируют индолил-3-уксусную кислоту. Некоторые из них (*Act. globisporus*) накапливали до 170 мкг ИУК в 200 мл среды [9].

Функции ауксинов очень разнообразны: они контролируют рост в фазе растяжения, регулируют дифференциальный рост, закладку и дифференцировку корней, опадение листьев, цветение, рост плодов, клубней, луковиц, прорастание семян [10].

Ключевым звеном действия фитогормонов на клетки растений является влияние их на экспрессию генома, т.е. на цепь событий, обеспечивающих синтез белка в клетке. Это влияние осуществляется на уровне транскрипции, например, регуляция фитогормонами функциональной активности хроматина или РНК-полимераз; на посттранскрипционном уровне, например, на изменении и РНК, ее транспорта и запасания, и на уровне трансляции [11].

Есть сообщения о стимуляции ауксинами накопления белков [12], видимая причина этого в резком усилении накопления РНК под влиянием обработки ауксином, что закономерно ведет к усилению синтеза белка. Другая причина в увеличении количества полисом под влиянием ауксина за счет активного синтеза рРНК и иРНК [13]. Наконец, обработка ауксинами в некоторых случаях ведет к появлению новых белков [14].

Учитывая, что биосинтетическую активность любого продуцента можно повысить путем изменения условий культивирования или воздействием на него некоторыми физическими или химическими факторами, целью данной работы являлось изучение способности синтезировать

регуляторы роста стрептомицетом *S. canosus 71* и его новыми вариантами, полученными в результате γ - и комбинированного (γ + УФ) облучения.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись музейный штамм стрептомицетов *Streptomyces canosus 71* и его варианты *S. canosus 71* var. 6 и *S. canosus 71* var. 6–17, полученные в результате γ и комбинированного облучения (γ +УФ). В качестве мутагенных факторов использовали γ - и УФ-лучи. γ -облучение проводили в Институте генетики АН Молдовы на радиационно-химической установке РХМ– γ -20 с активностью 12750 Ки и мощностью 0,67 Гр/с. Облучение ультрафиолетом спор стрептомицетов проводили в лаборатории оптоэлектроники факультета физики Молдавского государственного университета на установке, дающей УФ-лучи с длиной волны 260 нм.

Для выявления в составе культуральной жидкости (КЖ) изучаемых стрептомицетов веществ, стимулирующих корнеобразование, использовали метод Р.Х. Турецкой. Срезанные черенки фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*) десятидневного возраста обрабатывали КЖ изучаемых вариантов в различных разведениях (1:25; 1:50; 1:100) в течение 24 часов. Затем жидкость заменяли водопроводной водой, в которой черенки фасоли оставляли на 7 дней до образования на них корешков. Основными показателями физиологической активности стимуляторов роста служили число корней и длина участка стебля, на котором закладываются корни [15].

Физиологически активные вещества из КЖ стрептомицетов экстрагировали диэтиловым эфиром, после отгонки растворителя под вакуумом сухой остаток переводили в 80% этанол. Дальнейшее определение фитогормонов проводили методом тонкослойной хроматографии на пластинках «Silufol» марки R254(Avalier, ЧССР), в системе изопропанол : бензол : аммиак в соотношении 4:1:1. Для специфического окрашивания гетероауксина использовали смесь 5% хлорной кислоты (HClO₄) и 0,05М хлорного железа (FeCl₃) в соотношении 50:1. В качестве маркера использовали природную индолил-3-уксусную кислоту. Количественное измерение проводили денситометрически, сравнивая интенсивность окраски пятен, полученных при проявлении маркера и опытных образцов [15–17].

Для изучения влияния экзометаболитов (ЭМ) стрептомицетов на прорастаемость семян огурцов (сорта «Родничок») последние замачивали в различных разведениях КЖ (1:100; 1:200; 1:300; 1:400) в течение 24-х часов. Затем семена раскладывали в чашки Петри на фильтровальную бумагу, смоченную водой, и помещали в термостат при температуре 26 °С. Учет результатов проводили через трое суток [15].

Электрофорез водорастворимой фракции белков, экстрагированной из корней и листьев пятидневных проростков огурцов, проводился в полиакриламидном геле в присутствии додецилсульфата натрия [18].

Результаты исследований и обсуждение

Варианты *S. canosus 71* var. 6 и *S. canosus 71* var. 6–17, полученные в результате γ - и комбинированного облучения инициальной культуры, отличались от последней по ряду морфологических свойств (табл. 1).

Эти варианты отличались от инициальной культуры и других новых вариантов некоторыми физиологическими свойствами. Высокая удельная скорость роста этих вариантов обуславливала повышенное накопление ими биомассы по сравнению с исходной культурой. Так, например, *S. canosus 71* var. 6 превосходил инициальную культуру по биомассе в 2,5 раза, а *S. canosus 71* var. 6–17 – в 5,3 раза. По содержанию липидов в биомассе варианты оставались на уровне исходного штамма, но фракция фосфолипидов в составе общих липидов превосходила таковую у *S. canosus 71* на 18,7 – 37,8%. Было замечено, что после четырехлетнего хранения при температуре +5 °С и множественных пассажей, а также регулярных проверок на биохимическую активность варианты сохранили указанные свойства, т.е. являются стабильными. Высокая продуктивность, морфологическая и биосинтетическая стабильность, фиксируемая в течение нескольких лет, позволяли рассматривать полученные варианты в качестве перспективных продуцентов биологически активных веществ.

Согласно литературным данным, актиномицеты способны синтезировать не только липиды, антибиотики, витамины, аминокислоты и другие физиологически-активные вещества, но и фитогормоны, в частности, индолил-3-уксусную кислоту (ИУК). В связи с этим изучаемые варианты были проверены на способность синтезировать гетероауксин. Известно, что при некоторых концентрациях гетероауксин стимулирует процесс корнеобразования у растений, поэтому был проведен тест на органогенез стеблевых черенков фасоли. Этот тест основан на том, что при поступлении в ткани черенка регуляторы роста включаются в обмен веществ, усиливают его отдельные звенья, способ-

ствуя притоку веществ к месту корнеобразования, в результате чего активизируются ростовые процессы [19]. Хотя черенки фасоли хорошо образуют корни и в воде без обработки стимуляторами роста, но число корней и длина участка стебля, на котором закладываются корни, могут служить показателем активности стимуляторов [20].

Таблица 1. Морфология *Streptomyces canosus* 71 и его новых вариантов

Свойства	<i>S. canosus</i> 71	<i>S. canosus</i> 71 вар.6	<i>S. canosus</i> 71 вар. 6–17
Доза облучения	Исходная культура	2000 Гр	γ облучение – 1000 Гр УФ лучи – 5400 Эрг/мм ²
Размер колоний	3,0 – 5,0	10,0 – 12,0	7,0 – 8,0
Форма колоний	круглые, в центре аспорогенный кратер (1,5–2,0 мм)	круглые, в центре аспорогенный кратер (2,0 мм)	круглые в центре, выпуклые
Цвет воздушного мицелия	белый	по центру белый, по краям голубовато-дымчатый	розовато-меловый
Окраска субстратного мицелия	буланный	буланный	темно-фиолетовый
Цвет биомассы	мраморно-розовый	лососево-колерный	серовато-фиолетовый
Цвет КЖ	темно-инкарнатный	хромово-оранжевый	голубовато-зеленый

В наших исследованиях ответные физиологические реакции фасоли на обработку различными разведениями КЖ изучаемых штаммов стрептомицетов оказались очень наглядными: во всех испытываемых разведениях КЖ изучаемых вариантов число образовавшихся корешков оказалось больше, чем в контроле, и четко прослеживалась зависимость количества корней от разведения КЖ. Опыты показали, что оптимальным для исследуемых культур было разведение 1 : 50.

При анализе полученных результатов было выявлено, что наименее активной оказалась КЖ инициальной культуры *S. canosus* 71, хотя число образовавшихся корней на 42,3% превышало контроль, а зона заложения роста была на 16,5% больше, чем в контрольном варианте. Наиболее активно по сравнению с инициальной культурой проявили себя ее новые варианты. При разведении КЖ 1 : 50 число корешков на черенках фасоли превышало контроль на 53,5 и 57,1%, а зона заложения роста — на 22,5 и 24,47% под действием ЭМ *S. canosus* 71 вар. 6 и *S. canosus* 71 вар. 6–17 соответственно.

Для более точной идентификации гетероауксина и его количественного определения была проведена тонкослойная хроматография. Хроматографический анализ эфирного экстракта КЖ стрептомицетов показал наличие зоны, которая специфически окрашивалась как ИУК при обработке силифоловой пластинки реактивом Сальковского и имела *R_f*, близкую по значению к *R_f* маркера, равную $\approx 0,35$.

Учитывая специфичность окрашивания и совпадение *R_f* у маркера и опытных вариантов изучаемое вещество можно отнести к ауксинам.

Сравнение интенсивности окраски пятен маркера и опытных образцов позволило определить концентрацию ауксиноподобного стимулятора роста в КЖ изучаемых стрептомицетов. Математические расчеты показали, что *S. canosus* 71 вар. 6 и *S. canosus* 71 вар. 6–17 содержат гетероауксин в количестве – 0,49 и 0,54 мг/л соответственно. Инициальная культура *S. canosus* 71 содержит 0,38 мг/л. При переводе этих значений в молярную концентрацию получили для вариантов *S. canosus* 71 вар. 6 и *S. canosus* 71 вар. 6–17 по $3,0 \cdot 10^{-6}$ и $3,3 \cdot 10^{-6}$ М соответственно и $2,3 \cdot 10^{-6}$ М для *S. canosus* 71. Эти данные подтверждают достоверность результатов, полученных в опыте с черенками фасоли в связи с тем, что по классической схеме Готре (Gauthreut, 1942) количество ауксинов в интервале концентраций $10^{-7} - 10^{-6}$ М способствует образованию и росту корней [10].

Известно, что метаболиты многих актиномицетов стимулируют развитие различных сельскохозяйственных культур. Установлено также, что стимулирующий эффект при обработке семян КЖ

актиномицетов встречается чаще, чем ингибирование, и проявляется в основном в повышении энергии прорастания и усиленном развитии корней. Это имеет большое биологическое значение, так как становление и укрепление проростков во многом зависит от темпов роста корневой системы [20]. В наших опытах обработка семян огурцов КЖ изучаемых стрептомицетов *S. canosus* 71 и его новых вариантов привела к более активному развитию проростков по сравнению с контролем. Так, например, во всех опытных вариантах общая биомасса проростков была выше, чем в контроле на 5 – 28% (рис. 1).

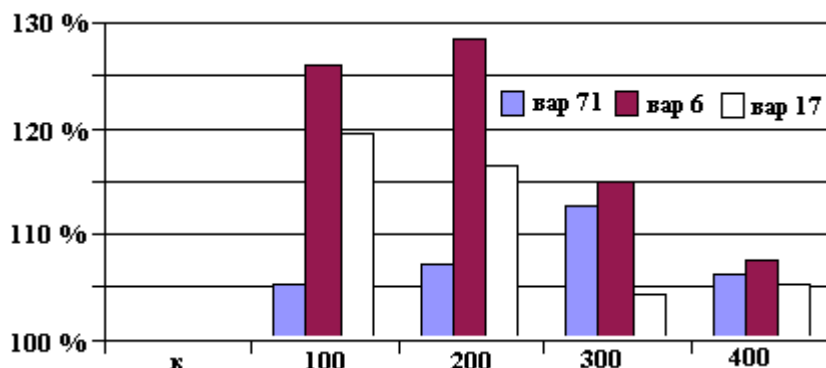


Рис. 1. Влияние ЭМ *S. canosus* 71 и его вариантов на общий вес проростков огурцов. По оси абсцисс – разведения КЖ, по оси ординат – относительный общий вес проростков (по отношению к контролю), %.

Несмотря на то, что стимулирующий эффект наблюдался во всех опытных вариантах, все же наиболее активным, как видно из рис. 1, оказались ЭМ *S. canosus* 71 вар. 6, так как семена, обработанные его КЖ, дали наиболее развитые проростки.

Определение сухого веса корневой системы и надземной части проростков показало, что действие физиологически активных веществ, находящихся в КЖ изучаемых вариантов, в большей степени проявилось на корневой системе.

На рис. 2 и 3 представлены данные о влиянии ЭМ стрептомицетов на развитие надземной части и корней у проростков огурцов. Видно, что количество биомассы надземной части проростков в опыте незначительно превышает контроль, тогда как изменения сухого веса корневой системы более значимы. Для каждого варианта характерно оптимальное разведение КЖ, при котором наблюдаются наиболее высокие результаты. Так, для *S. canosus* 71 оптимальным является разведение 1 : 300, а для его новых вариантов *S. canosus* 71 вар. 6 и *S. canosus* 71 вар. 6–17 — 1 : 200 и 1 : 300 соответственно; при этом масса корневой системы увеличивалась соответственно на 12,4; 20,4 и 16,9%. Судя по полученным данным, варианты *S. canosus* 71 вар. 6 и *S. canosus* 71 вар. 6–17 более активно стимулируют рост проростков по сравнению с исходной культурой.

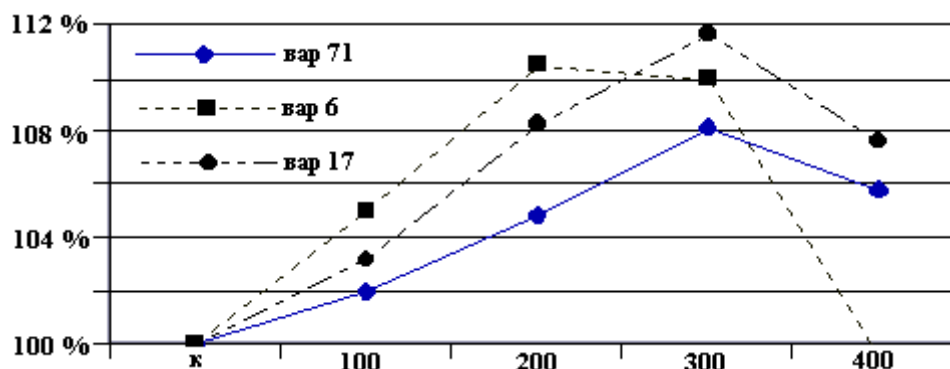


Рис. 2. Влияние ЭМ *S. canosus* 71 и его вариантов на надземную часть проростков огурцов. По оси абсцисс – разведения КЖ, по оси ординат – относительный вес проростков (по отношению к контролю), %.

Подобные результаты были получены при замачивании семян огурцов и в растворе ИУК с концентрацией $1,15 \cdot 10^{-8}$ М, что соответствует содержанию ауксинов в КЖ варианта *S. canosus* 71 вар. 6–17, разведенной в 200 раз. Определение массы надземной части проростков и корней растений

опытной группы показало, что она увеличилась на 12 и 19% соответственно по сравнению с контролем.

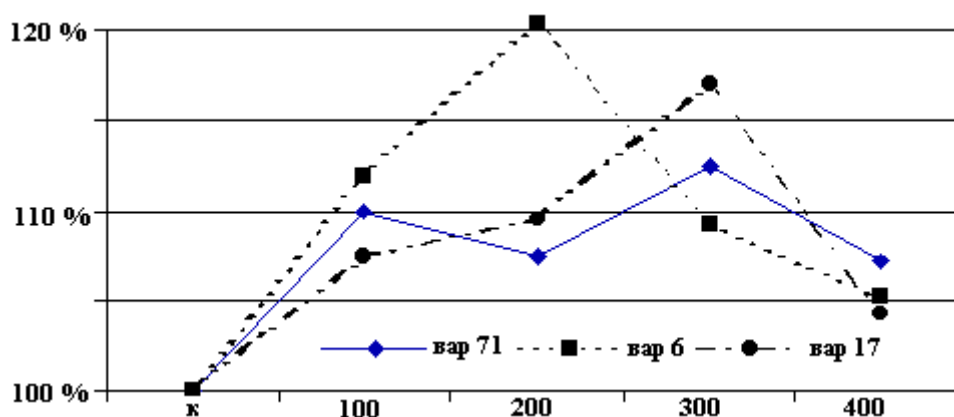


Рис. 3. Влияние ЭМ *S. canosus 71* и его вариантов на развитие корней у проростков огурцов. По оси абсцисс – разведения КЖ, по оси ординат – относительный вес корней (по отношению к контролю), %.

Из пятидневных проростков огурцов, полученных из семян, обработанных КЖ варианта *S. canosus 71* вар. 6–17, была экстрагирована водорастворимая фракция белков, которая наиболее богата биомолекулами, посредством которых реализуется действие генов.

Данные, представленные в табл. 2, указывают на наличие определенной зависимости между содержанием белка в семядолях и корнях проростков огурцов и дозой ауксина в составе ЭМ стрептомицетов. Видно, что при оптимальных разведениях КЖ, а значит, при физиологических концентрациях ауксинов, увеличивается содержание белка относительно контроля: на 25% в корнях и на 35% в семядолях. При пороговых разведениях КЖ наблюдается снижение общего количества белка по сравнению с оптимумом разведения и незначительно по сравнению с контролем. Таким образом обработка пятидневных проростков огурцов ЭМ стрептомицетов вызывает стимуляцию накопления белка. О качественном изменении белка позволяют судить данные электрофореза. Были получены электрофореграммы растворимых белков корней и семядолей пятидневных проростков огурцов, семена которых были инкубированы в КЖ *S. canosus 71* вар. 6–17 соответствующего разведения (рис. 4 и 5).

Таблица 2. Содержание белков водорастворимой фракции в пятидневных огуречных проростках из семян, обработанных КЖ *S. canosus 71* вар. 6–17

Разведение	Содержание белка в семядолях, г	% к контролю	Содержание белка в корнях, г	% к контролю
Контроль	0,0071	100,0	0,0030	100,0
1 : 100	0,00529	74,5	0,00295	98,13
1 : 200	0,0085	119,7	0,00375	125,0
1 : 300	0,0096	135,0	0,0032	106,6
1 : 400	0,0076	107,04	0,0031	103,3

При сравнении белковых треков, соответствующих контролю и опытным пробам, было отмечено утолщение некоторых зон, что свидетельствует о повышении концентрации данного белка после обработки семян огурцов различными разведениями КЖ стрептомицетов.

На электрофореграмме белков корней пятидневных проростков огурцов видно утолщение трех белковых зон в пробе, соответствующей инкубации в оптимуме разведения КЖ, на электрофореграмме белка семядолей увеличена концентрация одного белка, причем белки, концентрация которых увеличивается, являются низкомолекулярными. Этот факт, а также то, что данные белки принадлежат к водорастворимой фракции, которая наиболее богата ферментами, регуляторными белками и другими биомолекулами, посредством которых реализуется действие генов, наводит на мысль, что низкомолекулярные белки, концентрация которых увеличивается под воздействием стимуляторов

роста из КЖ стрептомицетов, в частности, ауксинов, являются, возможно, регуляторами белками, которые участвуют во многих метаболических процессах. Ведь известно, что имеются специфические белки, возникающие под влиянием фитогормонов, которые связываются с РНК-полимеразой, изменяя ее активность. В результате этого она способна узнавать новые промоторы на ДНК, что ведет к увеличенному синтезу новых р-РНК, образованию новых рибосом и активизации синтеза белка.

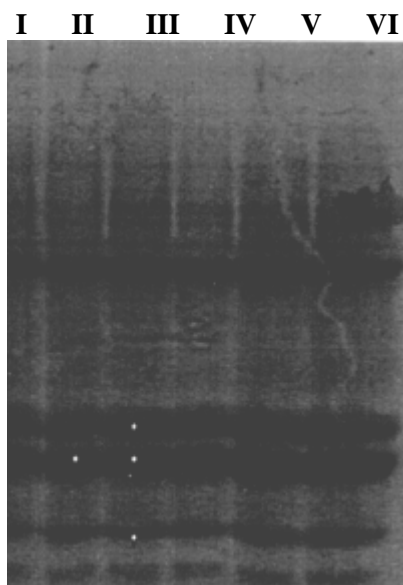


Рис. 4. Электрофореграмма водорастворимых белков корней пятидневных проростков огурцов, семена которых были обработаны КЖ *S. canosus* 71 вар. 6–17: I и VI – контроль, II – разведение КЖ 1 : 100, III – разведение КЖ 1 : 200; IV – разведение КЖ 1 : 300, V – разведение КЖ 1 : 400.

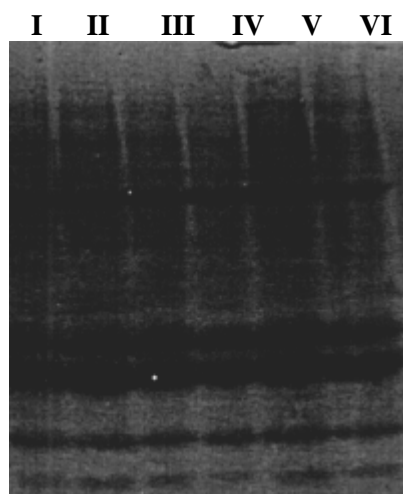


Рис. 5. Электрофореграмма водорастворимых белков семядолей пятидневных проростков огурцов, семена которых были обработаны КЖ *S. canosus* 71 вар. 6–17: I и VI – контроль, II – разведение КЖ 1 : 100, III – разведение КЖ 1 : 200, IV – разведение КЖ 1 : 300, V – разведение КЖ 1 : 400.

Наличие этих низкомолекулярных белков в меньшей концентрации и в контроле может быть объяснено присутствием в проростках огурцов эндогенных ауксинов, которые оказывают такое же влияние на рост и развитие растений, но в меньшей степени, нежели в совокупности с экзогенными ауксинами из КЖ стрептомицетов, в результате чего наблюдается стимуляция синтеза белков, новообразование которых происходило в клетке до представления ей гормона экзогенно.

Таким образом, проведенные исследования показали, что у музейного штамма *S. canosus* 71 после γ - и комбинированного облучения произошли изменения не только морфологические (форма, размер, цвет колоний, окрашивание субстратного мицелия, способность синтезировать окрашивающие среду пигменты и пр.), но и физиолого-биохимические. Так, помимо повышения биопродуктив-

ности (увеличение образования биомассы в 2,5 – 5,3 раза, фракции фосфолипидов на 18,7 – 37,8% и т. д.) отмечено содержание в комплексе ЭМ такого биологически важного регулятора роста растений, как гетероауксин. Установлено, что отселекционированные варианты, полученные после γ -облучения *S. canosus 71* в дозе 2000 Гр (*S. canosus 71* var. б) и комбинированного облучения *S. canosus 71* var. б дозами 1000 Гр + 5400 Эрг/мм² (*S. canosus 71* var. б–17), способны синтезировать такое количество фитогормона, которое оказывает благоприятное действие на рост и корнеобразование сельскохозяйственных растений, а также способствует стимуляции накопления водорастворимых белков в растениях.

Полученные данные показывают возможность использования новых вариантов *S. canosus 71*, отселекционированных после воздействия γ - и комбинированного облучения, для создания высокоактивных биопрепаратов – стимуляторов роста растений и в селекционной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ли Д.Е. Действие радиации на живые клетки. М., 1963. С. 5–13.
2. Дертингер Г., Юнг Х. Молекулярная радиобиология. М., 1973. С. 20–25.
3. Кудряшов Ю.Б., Беренфельд Б.С. Основы радиационной биофизики. М., 1982. С. 118–150.
4. Захаров И.А., Кривиский А.С. Радиационная генетика микроорганизмов. М., 1972. С. 14–19.
5. Ярмоненко С.П. Радиобиология человека и животных. М., 1988. С. 57–114.
6. Милько Е.С., Егоров Н.С. Гетерогенность популяции бактерий и процесс диссоциации (корине- и нокардиоподобные бактерии). М., Изд-во МГУ, 1991. С. 144.
7. Алиханян С.И. Селекция промышленных микроорганизмов. М., 1968. С. 201–205.
8. Алиханян С.И., Акифьев А.П. Общая генетика М., 1985. С. 41–48.
9. Сабельникова В.И. Биологически активные вещества клубеньковых бактерий. Кишинев, 1979. С. 22.
10. Калинин Ф.Л. Биологические вещества в растениеводстве. Киев, 1984. С. 68.
11. Кулаева О.Н. Цитокинины и их физиологическое действие. М., 1971. С. 46–47.
12. Гамбург К.З. Биохимия ауксина и его действие на клетки растений. М., 1976. С. 166–173.
13. Fites et al, 1969. Gwozdz et al, 1974. Цит. Калинин Ф.Л. Биологически активные вещества в растениеводстве. Киев, 1984. С. 84–103.
14. Бутенко Р.Г., Володарский А.Д. Специфика антигенов в цикле клеточных превращений // Физиология растений 1967. Т.14. № 6. С. 965–971.
15. Возняковская Ю.М. Микрофлора растений и урожай. Л., 1969. С. 82–86.
16. Филимонова М.В., Мазин В.В. Физиологически активные вещества культуральной жидкости гриба *Botrytis cinerea*. // Физиология растений. 1986. Т. 33. № 1. С. 88–93.
17. Сердюк О.П., Смолыгина Л.Д., Корсунский О.Ф., Гоготов И.Н. Экзометаболиты с фитогормональной биологической активностью, образуемые симбиотической ассоциацией *Azolla-Anabaena azollae* // ДАН СССР. 1991. Т. 316. № 2. С. 492–494.
18. Laemmli U.K. Cleavage of structural protein during the Assembly of the Head of Bacteriophage. T.4 Nature. 1970. Vol. 227. № 5259. P. 680.
19. Мишке И.В. Микробные фитогормоны в растениеводстве. Рига, 1988. С. 11–29.
20. Верниченко А.А. Взаимоотношения актиномицетов и озимой пшеницы // Методы микробиологического стимулирования роста и развития растений. Рига, 1969. С. 63–64.

Поступила 11.07.2001

Summary

It was presents the results of the comparative analysis on morphological properties of strain *S. canosus 71* and its new variants, obtained after γ - and combined (γ - and UV-rays) irradiation was conducted. The new selected variants ability for heteroauxin synthesis was determined. The streptomycetes culture liquid, contained this phytohormone, exerted positive action on the growth and rizogenesis of agricultural plants and promoted the stimulation of water-soluble proteins accumulation in plants.

С.В. Бордусов

КЛАССИФИКАЦИЯ СВЧ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220027, Республика Беларусь*

Источники плазмы сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда находят все более широкое применение в производстве изделий электронной техники при проведении таких процессов, как вакуум – плазменное осаждение тонких пленок (алмазоподобных, диэлектрических, проводящих и др.), модифицирование поверхностных слоев (азотирование, окисление и др.), селективное удаление (травление) объемных и пленочных материалов и т.д. [1]. Характерной особенностью СВЧ разрядов является возможность обеспечения значительно более высоких концентраций активных плазменных частиц и большей плотности высокоэнергетичных электронов по сравнению с более низкочастотными разрядами. Эта особенность представляет наибольший интерес для реализации плазмохимических процессов, эффективность которых зависит от скоростей плазменных реакций. Кроме того, существенным преимуществом СВЧ разрядов является возможность их устойчивого поддержания в широком диапазоне давлений.

СВЧ разрядные плазменные источники (плазмотроны) в основном разрабатываются под частоту 2,45 ГГц, разрешенную к использованию в промышленных целях. Короткая длина электромагнитной волны этой частоты (12,2 см в открытом пространстве) и малая глубина проникновения в плазму представляют определенные трудности для формирования СВЧ разрядов больших объемов или площадей.

К настоящему времени в технике газового разряда отсутствует сложившаяся системная классификационная характеристика СВЧ плазмотронов [2–4], что затрудняет разработку источников плазмы этого типа и выбор СВЧ плазменных источников для решения определенных производственно-технических задач.

В данной статье предлагается классификация СВЧ плазмотронов, в основу которой положены признаки общности конструктивно-технических решений аппликаторов СВЧ поля, служащих для формирования СВЧ разряда.

В СВЧ плазменной технике аппликаторами называют конструктивные элементы волноводных и коаксиальных трактов передачи энергии, предназначенные для излучения электромагнитной энергии или формирования определенной структуры либо конфигурации СВЧ поля в зоне плазмообразования [5].

По признаку конструктивного исполнения аппликатора СВЧ плазмотроны могут быть условно разделены на электродные и безэлектродные.

Аппликаторы электродного типа в свою очередь подразделяются на многоэлектродные и одноэлектродные (факельные). Особо нужно отметить то, что в предлагаемой классификации к аппликаторам электродного типа относятся излучающие системы, конструктивные элементы которых выполнены в виде стержней или штырей, имеющих гальваническую связь с плазменной средой.

Из одноэлектродных устройств наиболее широкое распространение получили факельные плазмотроны на основе волноводно-коаксиальной системы. В таком устройстве в отрезке прямоугольного волновода с закорачивающим поршнем сделан коаксиально-волноводный переход, по которому энергия электромагнитного поля при правильной установке закорачивающей плоскости передается по коаксиалу в разрядную зону [6].

Многоэлектродные аппликаторы используются, как правило, совместно с магнитными системами разных конструкций и служат для создания разрядных условий так называемого «распределенного

электронно-циклотронного резонанса» [7, 8]. Такие конструктивно-технические решения обеспечивают возможность формирования достаточно однородной плазмы на значительной площади. Электроды-излучатели запитываются либо через делитель от одного источника СВЧ мощности [9], либо от нескольких автономных источников [10].

Безэлектродные аппликаторы могут быть следующих типов: волноводные, резонаторные, антенные, объемные нерезонансные, с замедляющими структурами и использующие эффект «поверхностных волн».

Разрядные устройства на основе аппликаторов волноводного типа конструктивно наиболее просты и представляют собой отрезок волновода, через который проходит диэлектрическая термостойкая трубка из кварца или пирекса, хорошо пропускающая СВЧ энергию. Известны конструкции разрядных устройств с использованием волноводов прямоугольного и круглого сечений. В прямоугольном волноводе разрядная трубка может располагаться вдоль, либо перпендикулярно [11] стенкам волновода. За разрядной трубкой в волноводе устанавливается поглощающая нагрузка или короткозамыкающий поршень. В круглом волноводе разрядная трубка располагается по оси вдоль волновода [12]. Волноводные устройства этого типа, работающие при низких давлениях с использованием эффекта электронного циклотронного резонанса, находят наиболее широкое применение в технологии производства изделий электронной техники.

В качестве аппликаторов резонаторного типа используются прямоугольные [13], цилиндрические [14], сферические [15] и другие типы резонаторов. В зависимости от возбуждаемой моды колебаний объемного резонатора СВЧ энергия вводится в него посредством петли, штыря либо отверстия связи. Наиболее распространены плазмотроны с частичным заполнением плазмой резонирующего объема. Применяется также отделение резонирующего объема от плазменной камеры перегородкой, в которой специальным образом выполнены отверстия связи для излучения СВЧ энергии в зону плазмообразования [16, 17].

СВЧ аппликаторы на основе антенных излучателей в плазмотронах конструктивно могут быть выполнены в виде рупора [18], открытого конца волновода [19], в виде волновода с отверстиями в стенках [20], излучателя в форме плоской [21] или объемной спирали [22], имеющего форму плоской пластины [23], штыря [24] и т.д. Отличительной чертой антенных излучателей является то, что они имеют гальваническую развязку с плазменной средой, хотя конструктивно могут располагаться в зоне плазмообразования. В этом случае электрическая изоляция элементов аппликатора от плазмы осуществляется с помощью радиопрозрачных вакуумплотных перегородок (окон) или чехлов из диэлектрического материала.

Следующим типом разрядных устройств являются плазмотроны с безэлектродным возбуждением нерезонансного разрядного объема, заключенного в металлическом и, как правило, немагнитном корпусе. При этом разряд может возбуждаться либо локально в какой-то части корпуса, отделенной от остального объема кварцевым экраном [25] или специальной перфорированной перегородкой для исключения оптического излучения из плазмы за пределы разрядной камеры [26], либо полностью заполнять объем корпуса и изолироваться от его стенок магнитным полем [27].

Аппликаторы в виде замедляющих структур могут иметь гребенчатую [28], лестничную [29], зигзагообразную или спиральную форму [30]. При этом замедляющая структура может либо охватывать разрядную трубку, либо располагаться в непосредственной близости от разрядного объема. Замедляющие структуры хорошо согласуются с плазменной нагрузкой и за счет рационального выбора длины замедляющей структуры, ее шага и наклона к оси разрядной области можно добиться высокого коэффициента трансформации СВЧ энергии в плазму газового разряда. Однако при использовании этих устройств должны быть предусмотрены защитные экраны, предотвращающие излучение электромагнитной энергии в пространство.

Из числа СВЧ разрядных устройств, использующих эффект возбуждения поверхностных волн, следует особо отметить устройства типа «сурфогайд» и «сурфатрон». Конструктивно сурфогайд [31] состоит из симметрично расположенных сужающихся по узкой стенке отрезков прямоугольного волновода, разрядной трубки, устанавливаемой по оси симметрии перпендикулярно широкой стенке волновода, и короткозамыкающего подвижного поршня, расположенного на противоположном от места ввода СВЧ энергии конце волновода.

Основой конструкции сурфатрона [32] является коаксиально-волноводный аппликатор, функционально состоящий из двух частей: узла связи и возбуждающей структуры. Узел связи штыревого типа служит для введения СВЧ энергии в конструкцию. Возбуждающая структура представляет собой конструкцию коаксиального типа. С одной стороны коаксиал имеет короткозамыкающую плоскость, а с другой стороны между наружным и внутренним проводником коаксиальной линии имеется зазор. При

этом внутренний проводник коаксиальной линии выполнен полым и через него проходит диэлектрическая трубка, в которой возбуждается разряд. В зазоре формируется азимутально симметричная поверхностная волна, распространяющаяся за пределы коаксиальной линии, за счет которой и существует протяженный СВЧ разряд.

В заключение следует отметить, что представленная классификация СВЧ плазмотронов по конструктивно-техническим признакам аппликаторов будет полезна не только при изучении и анализе известных технических решений плазменных источников этого класса, но и при проектировании и выборе типа плазменного источника для решения определенных технологических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев Ю.В., Яфаров В.К. Микроволновое ЭЦР вакуум-плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) // Зарубежн. электрон. техн. 1997. № 1. С. 77–120.
2. Lebedev Y.A. Some properties of the tunable cavity microwave plasma source // Plasma Sources Sci. Technol. 1995. V. 4. P. 474–481.
3. Zakrzewski Z., Moisan M. Plasma sources using long linear microwave field applicators: main features, classification and modeling // Plasma Sources Sci. Technol. 1995. V. 4. P. 379–397.
4. Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н. СВЧ- генераторы плазмы: физика, техника применение. М., 1988.
5. Ganguli A., Akhtar M.K., Tarey R.D. Investigation of microwave plasmas produced in a mirror machine using ordinary-mode polarization // Plasma Sources Sci. Technol. 1999. V. 8. P. 519–529.
6. Мицуда Ё., Йосида Т., Акаси К. Новая СВЧ- плазменная горелка и ее применение для синтеза алмазов // Приборы для научных исследований. 1989. Т.60. С. 108–111.
7. Пишио М., Дюранде А., Пеллетье Г. Мультипольный источник СВЧ- плазмы с возбуждением по методу распределенного электронного циклотронного резонанса: концепция и характеристики // Приборы для научных исследований. 1988. Т.59. С. 56–60.
8. Заявка 2711035 Франция. МКИ⁶ H05H 1/46. Способ и устройство для генерации плазмы, возбужденной микроволновым излучением / Лоуе В., Жин А. Оpubл.14.04.95
9. Patent 05190294 Japan. Int. Cl. C23C 16/50, H01L 21/302. Apparatus for distributing microwave energy to excite plasma purpose / Pelletier J. Publ. 30.07.93.
10. EP 0459177. Int. Cl. H05H 1/46. Solid state microwave generating array material, each element of which is phase controllable, and plasma processing systems / Cuomo J.J., Whitenair S.J. Publ.12.04.91.
11. Patent 5262610 US. Int. Cl. H01J 37/32. Low particulate reliability enhanced remote microwave plasma discharge device / Huand S.S., Davis C.J., Jucha R.B. Publ. 16.11.93.
12. Lieberman M.A., Gottscho R.A. Design of hight density plasma sources for materials processing // Plasma Sources Thin Film Deposit. and Etching. San Diego. 1994. P. 1–119.
13. Бордусов С.В. Малогабаритная СВЧ-плазменная установка с резонатором прямоугольной формы // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 74–76.
14. Patent 4727293 US. Int. Cl. H01J 27/16. Plasma generating apparatus using magnets and method / Asmusen J., Reinard D., Dahimene M. Publ. 23.02.88.
15. Патент 2050610 Франция. МПК H05h 1/00. Высокочастотный плазмотрон. Оpubл. 11.05.71.
16. Patent 10298786 Japan. Int. Cl. C23F 04/00. Surface treating device / Sato H., Nakagawa K., Takugi K., Koide T., Tsukada T. Publ. 11.10.98.
17. EP 0477906. Int. Cl. H01J 37/32. Plasma processing apparatus using plasma produced by microwaves / Ohara K., Otsubo T., Sasaki I. Publ. 01.04.92.
18. EP 0716562. Int. Cl. H05H 1/46. Device for implementing a thin film process for the treatment of large area substrates / Gegendart R.D., Gesche R.D., Kretschmer K.D., Ritter J.D. Publ.12.06.96.
19. Patent 5726412 US. Int. Cl. B23K 10/00. Linear microwave source for plasma surface treatment / Briffod G., Knoi N.T. Publ. 10.03.98.
20. Patent 5955382 US. Int. Cl. H01L 21/00. Microwave excitation plasma processing apparatus and microwave excitation plasma processing method / Yamauchi T., Aoki K., Yamage M. Publ. 21.09.99.
21. Patent 5587038 US. Int. Cl. C23F 1/02. Apparatus for hight density plasma / Joen R., Paulet K. Publ. 24.12.96.
22. Заявка 4337119 ФРГ. МКИ⁶ H05H 1/46. Генератор высокочастотной плазмы / Клаус Ш., Юрген К., Ульф С. Оpubл. 24.05.95.

23. *Yasaka Y., Nazaki D., Koga K., Ando M.* Production of large-diameter plasma using multi-slotted planar antenna // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1999. V.8. P. 530–533.
24. Patent 4566403 US. Int. Cl. H01J 37/32. Apparatus for microwave glow discharge deposition / *Fournier E.* Publ. 28.01.86.
25. Patent 4866346 US. Int. Cl. H01J 7/24. Microwave plasma generator / *Gaudreau M.P., Smith D.K.* Publ. 12.09.89.
26. Patent 5866986 US. Int. Cl. H01J 37/32. Microwave gas phase plasma source / *Pennington M.A.* Publ. 02.02.99.
27. Patent 4778561 US. Int. Cl. H01J 27/18. Electron cyclotron plasma source / *Granbari E.* Publ. 18.10.88.
28. EP 0502269. Int. Cl. H01J 37/32. Method of and system for microwave plasma treatments / *Watanabe S., Nawata M., Fukuyama R., Kakehi Y., Kanai S., Kawasaki Y.* Publ. 09.09.92.
29. *Kieser J., Neusch M.* High rate, large area application of the plasmopolymerization (PP) – process // *Proc. Int. Ion Eng. Congr., Kyoto, 12-16 Sept., 1983.* P. 1447–1450.
30. А.с. 1829879 СССР. МКИ⁶ H05H 1/46, H05B 7/18. Сверхвысокочастотное разрядное устройство / *А.П. Достанко, С.В. Грушецкий, В.А. Ваишкевич.* Оpubл. 27.08.96.
31. Patent 11057460 Japan. Int. Cl. B01J 19/21. Device for exciting gas by surface wave plasma and gas treatment apparatus equipped with device thereof / *Moisan M., Etemadi R., Rostaing J.-C.* Publ. 02.03.99.
32. EP 0043740. Int. Cl. H05H 1/46. Generateur de plasma / *Bloyet E., Leprince P., Marec J.* Publ. 13.01.82.

Поступила 07.08.2001

Summary

Classification of microwave plasmatrons used in the processes of electronic technique devices production is presented. It based on constructive peculiarities and technical features of microwave applicators. The proposed classification of microwave plasmatrons will be useful while projecting and choosing the type of microwave plasma source for certain technical purpose and also for studying and examination well-known constructions of that type plasma generators.

А.Р. Ризун, В.Н. Цуркин

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЕ РАЗРУШЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

В механике разрушения самым сложным является описание процессов нарушения сплошности материала при импульсных нагрузках, установление причин и условий, при которых в материале распространяется система трещин [1]. Электроразрядное дробление (ЭРД – новый термин в механике импульсного разрушения) выгодно отличается от известных способов дробления, в том числе взрыва взрывчатых веществ тем, что является экологически чистым, поддающимся тонкому регулированию мощности и более экономным по затратам энергии. ЭРД характеризуется множеством достаточно сложных явлений, начиная от пробоя жидкости и кончая разрушением материала. Используя электрод как инструмент дробления, имеем дело, с одной стороны, с высокими давлениями и температурой канала разряда, высокими давлениями волн сжатия и разрежения, гидропотоками и другими явлениями, а с другой – объект разрушения с его множеством показателей физико-механических свойств: крепостью, структурой, смачиваемостью, трещиноватостью, прочностью. Такая многогранность характеристик инструмента и объекта разрушения не позволяет разработать общую модель расчета режимов разрушения, поскольку все характеристики взаимосвязаны и по разному влияют и изменяются в процессе импульсного нагружения.

В данной работе экспериментально исследовалось влияние волн сжатия и других явлений на разрушение промышленных образцов с известными прочностными характеристиками. Цель работы – установить электроразрядные режимы, при которых наблюдается максимальное разрушение материалов в определенном диапазоне прочностных характеристик.

В момент разряда при достаточной амплитуде волн давления происходит раздавливание или разрыв материала в зоне, прилегающей к каналу разряда, а также образование и развитие проникающих трещин. Волна давления при достижении открытой поверхности частично отражается, образуя в материале волну растяжения, которая является причиной образования откольных трещин, вспучивания поверхности и ее разрушения. По объему разрушения устанавливается радиус эффективного действия волн давления, являющийся основным показателем в расчете производительности электроразрядных устройств. Вторая часть волны давления проникает в материал, образуя систему проникающих трещин, от количества и глубины которых зависит эффективность разрядного разрушения от последующих разрядов.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены три вида опытных образцов: из цемента, песка и воды. Варьируя соотношение цемента и песка, были изготовлены опытные образцы (300x300x300) различной прочности на сжатие ($\sigma_{сж} = 90$ МПа; $\sigma_{сж} = 60$ МПа; $\sigma_{сж} = 12$ МПа). Подготовлено и использовано электроразрядное устройство с энергией разряда в диапазоне от 1,25 до 10 кДж. Опытные образцы устанавливались в непосредственной близости от канала разряда начиная от 30 мм и далее. Схема их установки показана на рис.1; радиус разрушения материала фиксировался от одного разряда с запасаемыми энергиями: 2,5; 3,75; 5; 7,5 и 10 кДж.

Аналогичные эксперименты проводились ранее для установления эффективных режимов при разрушении формовочных и стержневых смесей [2]. Там же проводился расчет и измерение давлений

в канале разряда и за его пределами для различных энергий разрядного контура. Данные измерений приведены в таблице (публикуются впервые). Экспериментально установлено, что если предел прочности на сжатие больше максимального давления в волне сжатия P , разрушение образца не наблюдается. Таким образом, зная предел прочности, можно легко установить энергию разрядного контура и расстояние, на котором будет происходить разрушение. Устанавливая опытные образцы в соответствующих точках на расстояниях от канала разряда (см. таблицу), где $\sigma_{сжс} < P$, измерялся радиус разрушения от одного разряда. Кроме этого, путем среза поверхности образца со стороны разрушенного объема исследовалась глубина и количество проникающих трещин с помощью подкрашивания рабочей разрядной среды и ее проникновения в материал. Численные значения измеренных величин представлены на рис.2 зависимостью $I(3)$.

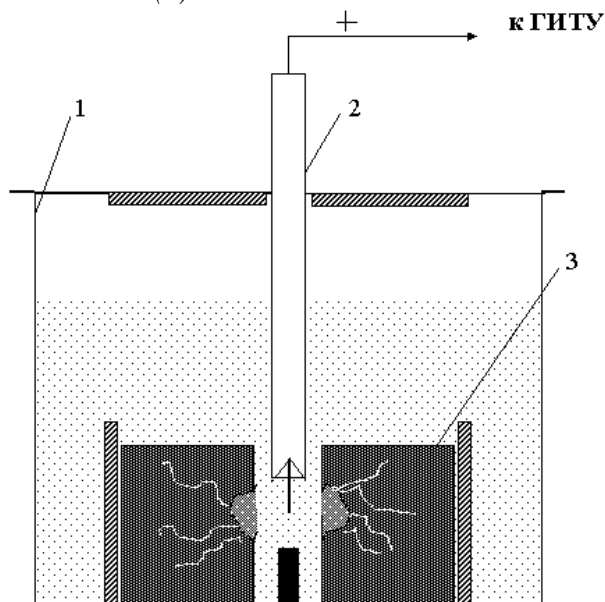


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – рабочая камера с подкрашенной рабочей жидкостью; 2 – электродная система; 3 – опытные образцы.

Зависимость давления в канале разряда ($R = 0$ мм) и за его пределами от запасенной энергии разрядного контура

E , кДж	P , МПа				
	$R = 0$ мм	$R = 30$ мм	$R = 50$ мм	$R = 70$ мм	$R = 120$ мм
1,25	200	50	18	9	2
2,5	280	110	45	9,5	3
3,75	400	200	62	12	5
5,0	480	260	100	24	7
7,5	600	320	130	30	7,4
10,0	850	450	180	40	9

Примечание. R – расстояние от канала разряда.

В результате анализа полученных данных установлена эмпирическая зависимость радиусов зон разрушения (измельчения) r от давлений волн (P), генерируемых разрядом, и пределом прочности материала на сжатие ($\sigma_{сжс}$)

$$r = \sqrt{\frac{P}{\sigma_{сжс}}} \cdot 10^{-2} \text{ м.} \quad (1)$$

По формуле (1) рассчитаны радиусы разрушения опытных образцов для энергий разрядного контура, приведенных в таблице и совместно с экспериментальными данными представленных на рис. 2 кривыми зависимости I и $I(3)$.

Кроме этого путем среза со стороны разрушенной поверхности опытных образцов с использованием подкрашивания рабочей жидкости определялись радиусы зоны проникающих трещин для тех же значений запасенной энергии разрядного контура (на рис. 2 кривые зависимости 2). Из проведен-

ных экспериментов следует, что радиусы проникающих трещин примерно в два раза превышают радиусы разрушений. Зависимость объема разрушений материалов последующими разрядами в зависимости от глубины и количества проникающих трещин будет исследована дополнительно.

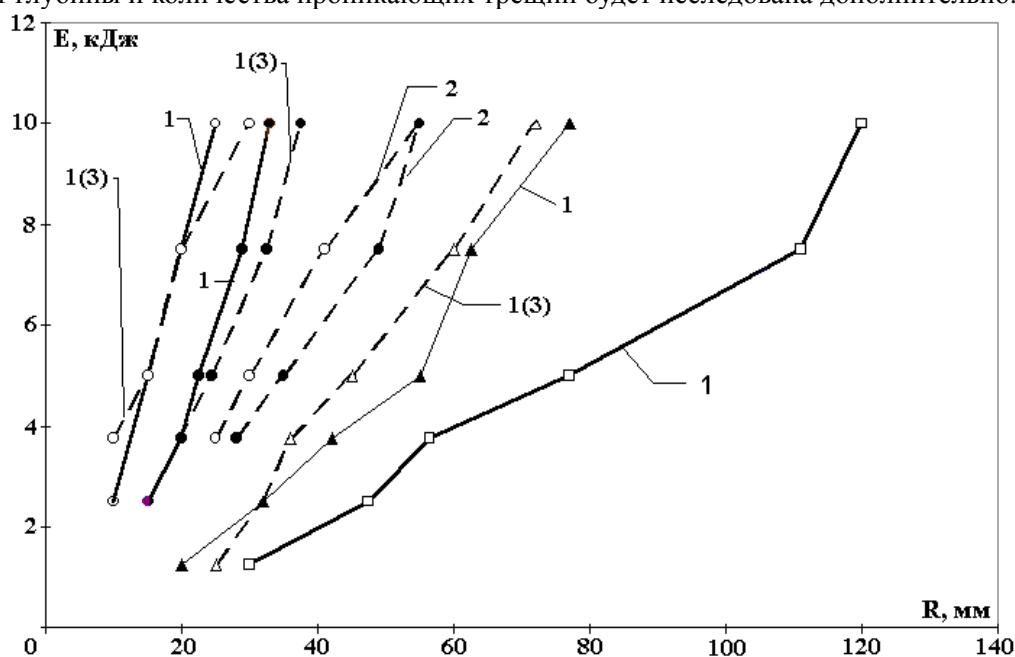


Рис. 2. Зависимость расчетных (—) (1) и экспериментальных (- - -) 1(3) радиусов разрушения и радиусов проникающих трещин (- - - -) (2) от величины запасенной энергии разрядного контура для хрупких материалов с $\sigma_{сж}$, МПа: \square – 90; \bullet – 60; Δ – 12; \square – 5.

Таким образом, в результате выполненных исследований представляется возможность:

- оценить производительность дробления электроразрядным устройством, зная предел прочности на сжатие;
- рекомендовать размеры разрядных камер для одного электрода в диаметре не более 0,3 м в зависимости от $\sigma_{сж}$ материала дробления;
- использовать для дробления материалов со средними и низкими $\sigma_{сж}$ (<10 МПа) энергию разрядов до 5 кДж, так как производительность дробления достигает максимального значения при оптимальных затратах энергии в этих пределах (см. рис.2);
- используя известные соотношения [3] между пределами прочности на сжатие, растяжение, скалывание и снижением прочности материала при смачиваемости можно установить радиусы разрушений для любого прочностного показателя, зная один из них: $\sigma_{скал} = \sqrt{\sigma_{сж} \cdot \sigma_{раст}}$; $\sigma_{раст} = 3-5\% \sigma_{сж}$; $\sigma_{скал} = 6-8\% \sigma_{сж}$; $\sigma_{изг} = 7-5\% \sigma_{сж}$; а зависимости от коэффициента смачиваемости прочность материала снижается до 20% (при полной смачиваемости).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремов Э.И., Мячина Н.И. и др. Влияние свойств горных пород на характер разрушения при взрыве // Методы и средства разрушения горных пород. Киев, 1980. С. 97–103.
2. Ризун А.Р. Исследование и оптимизация технологии электрогидравлической выбивки стержней и очистки отливок: Автореф. дис... канд.техн.наук. Киев, 1984.
3. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. М., 1980.

Поступила 20.08.2001

Summary

Influence of compression waves generated by an electrical discharge on the process of crushing samples with known mechanical characteristics is investigated by the experimental method. The dependency of the radius of crushing tested samples on the compression wave pressure and compression strength is bound out. The results the investigation allow to determine the capacity of electrodischarge plants and the dimensions of discharge chambers.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОРАЗЯДНОГО ВИБРАТОРА

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение

Работа электроразрядного вибратора основана на высоковольтном электрическом разряде в воде, находящейся в замкнутом объеме. Давления, возникающие в воде при разряде, передаются через рабочую пластину вибратора на обрабатываемый объект (рис. 1). По сложившейся практике использования вибраторов обрабатываемыми объектами, как правило, являются кристаллизующиеся металлические слитки, обрабатываемые с целью улучшения их макро- и микроструктуры, а также твердые материалы, обрабатываемые с целью дробления (разрушения) или пластического деформирования [1]. Математическое моделирование процесса передачи воздействия на обрабатываемый объект представляет собой довольно сложную задачу, проводится численными методами и, в конечном счете, требует экспериментальных данных для идентификации модели. Поэтому создание экспериментальных методик исследования этого процесса остается актуальной задачей.

Наиболее простым экспериментальным методом исследования динамических характеристик является метод мерных стержней, подробно описанный в работе [2]; на пластину вибратора устанавливались стержни различной длины, измерялись высоты их подлета после разряда и по ним рассчитывались параметры волны давления, излучаемой вибратором.

В данной работе в качестве динамических характеристик вибратора, которые могут быть определены методом мерного стержня, выбраны два параметра: длительность импульса давления, действующего на нижний торец стержня, и среднее по времени давление в импульсе.

Цель работы – определить зависимость этих характеристик от длины межэлектродного промежутка вибратора и емкости разрядного контура, то есть от тех параметров, которые наиболее точно контролируются и при практическом применении вибраторов варьируются с целью изменения характера воздействия на обрабатываемый объект.

Методика эксперимента и результаты

Схема эксперимента показана на рис. 1. При определении длительности импульса необходимо измерять время, прошедшее от начала разряда до отрыва стержня от пластины вибратора. Использовалась схема визуализации момента разрыва электрической цепи, которая замкнута через мерный стержень на пластину. Запаздывание сигнала разрыва цепи составляло $1,6 \cdot 10^{-6}$ с. Вместо высоты подлета фиксировалось время обратного падения стержня на пластину, что обеспечивает существенно большую точность. Регистрация момента падения мерного стержня на пластину вибратора фиксировалась датчиком ускорения АВС – 017(4), который закреплялся на пластине через диэлектрическую прокладку. В качестве мерного стержня использовался цилиндрический титановый стержень диаметром 10 мм, длиной 80 мм и весом 28,3 г. Пластина вибратора изготовлена из стали и имеет параметры: диаметр $d = 0,160$ м, толщина $\delta = 0,015$ м. Напряжение в разрядном контуре $U = 50$ кВ, индуктивность $L = 6,6$ мкГн. Емкость C и межэлектродный промежуток l варьировались на трех уровнях в пределах: C – от 0,5 до 1,5 мкФ, l – от 5 до 45 мм. Каждое измерение момента отрыва стержня и его обратного падения на пластину повторялось по 7–8 раз, что позволило провести статистическую обработку результатов. Относительная погрешность измерений не превышает 4%, за исключением нижнего уровня варьирования $C = 0,5$ мкФ и $l = 5$ мм. Здесь наблюдается сравнительно большая дисперсия данных и относительная погрешность достигает 10%, что можно объяснить высокой нестабильностью разрядных процессов при таких значениях C и l [3].

Среднее давление в импульсе с использованием измеренных параметров можно рассчитать следующим образом. Скорость стержня V_c в момент отрыва определяется выражением

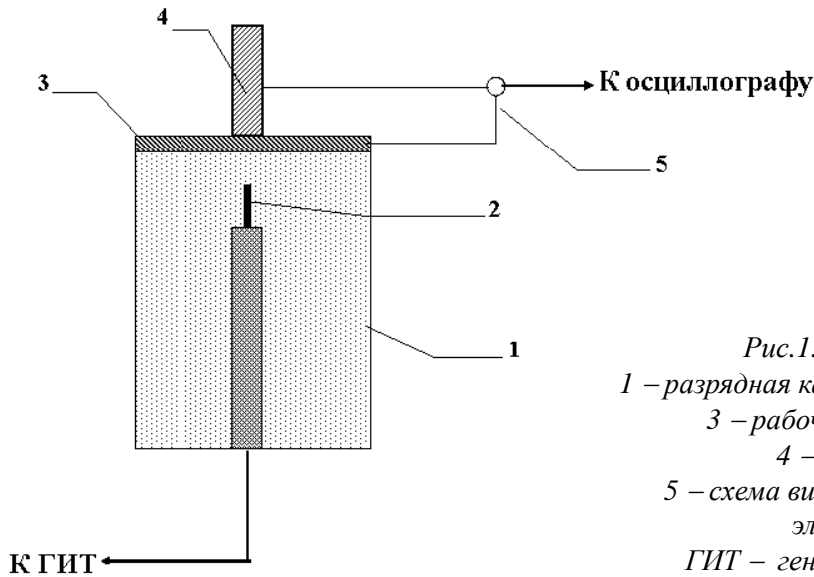


Рис.1. Схема эксперимента.

1 – разрядная камера вибратора; 2 – электрод;

3 – рабочая пластина вибратора;

4 – мерный стержень;

5 – схема визуализации момента разрыва электрической цепи.

ГИТ – генератор импульсных токов.

$$V_c = \frac{g(\tau_{\Pi} - \tau_0)}{2}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, τ_0 – время отрыва стержня, τ_{Π} – время обратного падения.

Поскольку импульс стержня в момент отрыва $MV_c = \int_0^{\tau_0} F(t)dt$, где $F(t)$ – сила, действующая на его

нижний торец, M – масса стержня, то для давления на нижнем торце получаем выражение

$$\rho_c l_c V_c = \int_0^{\tau_0} P(t)dt. \quad (2)$$

Здесь $P(t)$ – давление, l_c – длина стержня, ρ_c – плотность материала стержня. Для среднего давления в интервале $[0, \tau_0]$ получаем

$$P_s = \frac{\rho_c l_c V_c}{\tau_0}. \quad (3)$$

Таким образом, по измеренным значениям τ_0 и τ_{Π} можно с помощью выражений (1), (3) рассчитать среднее давление в импульсе.

Результаты измерений и расчетов приведены в таблице.

l , мм	C , мкФ	τ_0 – время отрыва стержня 10^{-6} с	τ_{Π} – время обратного падения стержня, 10^{-3} с	V_c – скорость подлета стержня, М/с	P_s – среднее давление на нижнем торце стержня, МПа
45	1,5	113	1358	6,6	21,3
25	1,5	171	1288	6,3	13,3
5	1,5	127	650	3,2	9,2
45	1	107	1000	4,9	16,4
25	1	92	977	4,8	18,8
5	1	127	534	2,6	7,3
45	0,5	79	667	3,8	15,0
25	0,5	80	592	3,0	13,0
5	0,5	96	1110	5,4	20,4

На рис. 2, 3 показаны зависимости среднего давления P_s и длительности импульса τ_0 от межэлектродного промежутка и емкости.

Заключение

Использованные в работе параметры разрядного контура и напряжение на межэлектродном промежутке наиболее часто встречаются при технологическом применении вибраторов. Поэтому

полученные экспериментальные зависимости могут быть полезными для разработки конкретных технологий, поскольку позволяют оценить изменение характера воздействия, передаваемого на обрабатываемый объект, при варьировании параметров разрядного контура. Отметим также высокую надежность полученных данных: измерения проводились с низкой относительной погрешностью, а при расчетах не использовалось никаких допущений и модельных представлений.

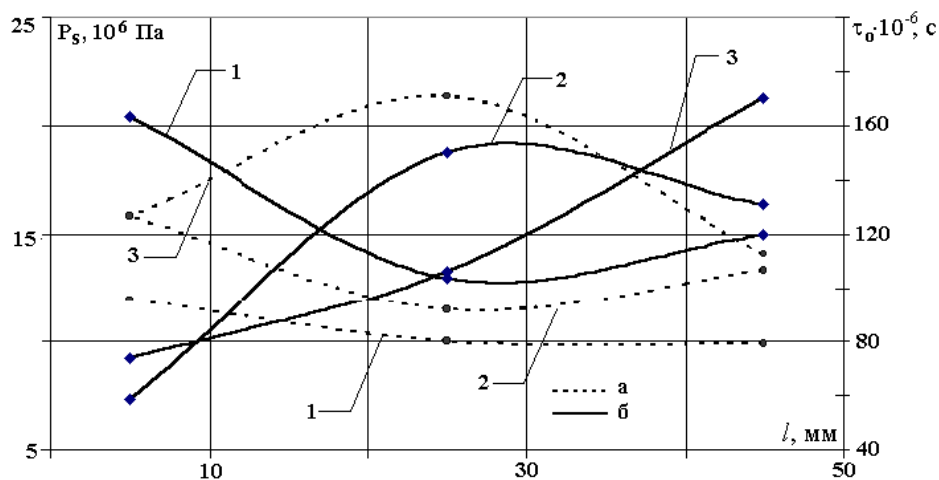


Рис. 2. Зависимость длительности импульса τ_0 (а) и среднего давления P_s (б) на нижнем торце мерного стержня от емкости C (мкФ): 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5 при различных значениях межэлектродного промежутка l (мм): 5, 25, 45.

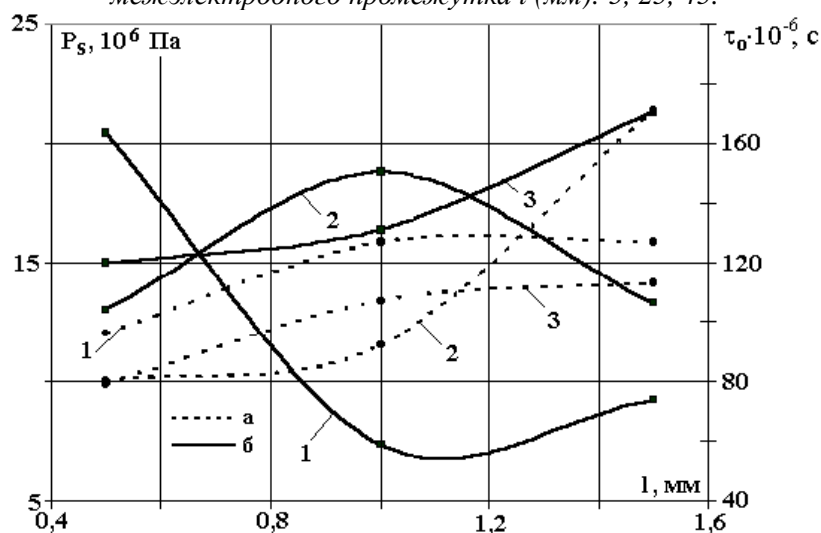


Рис. 3. Зависимость длительности импульса τ_0 (а) и среднего давления P_s (б) на нижнем торце мерного стержня P_s от емкости C (мкФ): 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5 при различных значениях межэлектродного промежутка l (мм): 0,5, 1, 1,5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии. Киев, 1983.
2. Бутаков Б.И. Методы динамического упрочнения металлов и сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. 1988. № 7. С. 7–10.
3. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.

Поступила 02.11.2001

Summary

The dependence of the parameters of pressure pulse acted on the lower point of the rod during a high-voltage discharge in the vibrator on both an interelectrode space and the capacity of the discharge contour is investigated with a measure rod method. The middle pressure in the pulse and its duration are valuated. The suitable dependences, which enable to determine these parameters, in both a certain capacity interval and interelectrode space, are built. The results may be used for control over the dynamic characteristics of vibrators.

III МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

25 – 26 октября 2001 года в Иванове (Россия) на базе Ивановского государственного химико-технологического университета (ИГХТУ) состоялся III международный научно-практический семинар «Современные электрохимические технологии в машиностроении», в котором приняли участие около 100 научных сотрудников, инженеров, аспирантов и студентов старших курсов России, Беларуси и Молдовы.

Конференция была посвящена достаточно широкому спектру проблем электрохимической технологии – анодному растворению металлов при высоких плотностях тока в водных и водно-органических растворах электролитов, электроосаждению, электросинтезу, переработке отходов гальванических производств, гальванопластике и др.

В докладе проф. Е.И. Румянцева (ИГХТУ, Россия) «Электротехнология в машиностроительном производстве России» был представлен обзор методов электротехнологий, применяющихся в машиностроении, таких как электрохимическая размерная обработка (ЭХРО), совмещенные методы, а также методы утилизации продуктов обработки. Отмечены определенные достижения в области оборудования для ЭХРО, производимого в России, в частности, с использованием методов импульсно-циклической обработки. Отмечалось определенное оживление в сфере применения методов современной электротехнологии в машиностроительном производстве Российской Федерации.

Доклад С.А. Лилина (Институт химии растворов РАН, Иваново, Россия) был посвящен количественной фрактальной характеристике морфологии электролитических осадков. В сообщении проф. А.И. Дикусара, О.О. Редкозубовой, С.П. Ющенко и Е.А. Яховой (ИПФ АН РМ и Приднестровский госуниверситет, Молдова) показаны возможности количественного описания влияния макроскопической неоднородности на скорость анодного растворения при диффузионном и смешанном контроле скорости реакции. В докладе проф. В.В. Клокова (Казанский госуниверситет, Россия) были представлены методы аналитического описания распределения локальных скоростей ЭХРО при наличии экранов в межэлектродном зазоре. Показаны возможности управления локализацией обработки при использовании непроводящих экранов. Электрохимической обработке быстрорежущих сталей в неводных электролитах был посвящен доклад Б.А. Красильникова (Новосибирск, Россия). Показаны преимущества использования водно-органических электролитов при достижении высоких технологических показателей обработки. В докладе проф. Ю.П. Хранилова и Д.В. Ветошкина (Вятка, Россия) представлен оригинальный метод переработки хромсодержащих отходов гальванического производства. Важной проблеме утилизации отходов и лома алмазного инструмента с использованием электрохимических методов было посвящено сообщение И.И. Курило, В.Б. Дроздович и проф. И.М. Жарского (Белорусский государственный технологический университет, Беларусь).

Использование импульсных и импульсно-циклических методов в электрохимической технологии по-прежнему остается в центре внимания электрохимиков-технологов. В докладе С.И. Галанина (Костромской государственной технологической академии, Россия) показана взаимосвязь параметров импульсного анодного растворения и технологических показателей обработки микросекундными импульсами тока. Проблемам нового процесса анодной обработки металлов – электрохимикотермической обработке при анодном электролитном нагреве, то есть в условиях существования парогазовой оболочки на поверхности анода при высоких напряжениях, и методам управления и использования его было посвящено сообщение проф. П.Н. Белкина (Костромской госуниверситет, Россия) «Проводимость анодной парогазовой оболочки».

Проблеме замены драгметаллов в объемно-пористых электролитических конденсаторах медью был посвящен доклад Е.П. Гришиной и др. (Институт химии растворов РАН, Иваново) «Анодное окисление меди и ее коррозионное поведение в условиях контакта с палладиевой чернью в серной кислоте». Интересные результаты явлений синергизма при анодном растворении вольфрама были представлены в докладе А.В. Балмасова и сотр. (ИГХТУ).

Наряду с пленарными лекциями активно работала стендовая сессия. Доклады проф. Н.А. Амирхановой с сотр. (Уфимский авиационный технический университет, Башкортостан, Россия), проф. Е.М. Румянцева, Ю.Я. Лукомского, С.А. Лилина, Г.Ф. Юдиной с сотр. (ИГХТУ), И.М. Жарского с сотр. (БГТУ), А.И. Дикусара (ИПФ АН РМ) и др., посвященные различным проблемам электротехнологии и ее применению в производстве, вызвали живой и заинтересованный обмен мнениями. Следует отметить работы группы из ИГХТУ по восстановлению медных печатных валов электрохимическим методом, серию работ, выполненных в Уфимском авиационном техническом университете, по разработке методов управления импульсной ЭХРО импульсами микросекундного диапазона и исследованию катодных отложений при прецизионной импульсной ЭХРО; работы ИГХТУ по химической металлизации пластмасс, новый метод оценки рассеивающей способности электролитов при интенсивном электролизе (ИПФ АН РМ), работы БГТУ по утилизации отходов с выделением алмазов и др.

Участники семинара вместе с коллективом ИГХТУ присутствовали при открытии в университете мемориальной доски, посвященной памяти первого заведующего кафедрой технологии электрохимических производств университета, известного специалиста в области прикладной электрохимии, одного из авторов широко известного учебника по прикладной электрохимии, по которому воспитано не одно поколение ученых и специалистов, профессора Л.Л. Кузьмина.

Нет сомнения в том, что семинар не только способствовал активному получению и распространению новой научной информации в области электрохимической технологии, но и останется в памяти участников как одна из вех в их научной и практической деятельности.

А.И. Дикусар

ВЫШЛА В СВЕТ КНИГА

В.С. Нагорный, Ю.А. Левченко

ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНАЯ АВТОМАТИКА В ПРОИЗВОДСТВЕ ХИМИЧЕСКИХ НИТЕЙ

(Санкт-Петербург, Издательство «Политехника», 2001).

Впервые с единых методологических позиций рассматриваются основы теории и практики применения электрокаплеструйной автоматки. Принцип работы электрокаплеструйных устройств (ЭКСУ) заключается в создании (с использованием микропроцессоров или микроЭВМ) линейной последовательности потока монодисперсных капель рабочей жидкости (таких капель в секунду может быть сформировано до ста тысяч) одинакового диаметра, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга, сообщении (при необходимости) любой выбранной капле рабочей жидкости заданной величины электрического заряда того или иного знака и отклонении в электрическом поле данной капли в заданную точку.

Проблеме замены драгметаллов в объемно-пористых электролитических конденсаторах медью был посвящен доклад Е.П. Гришиной и др. (Институт химии растворов РАН, Иваново) «Анодное окисление меди и ее коррозионное поведение в условиях контакта с палладиевой чернью в серной кислоте». Интересные результаты явлений синергизма при анодном растворении вольфрама были представлены в докладе А.В. Балмасова и сотр. (ИГХТУ).

Наряду с пленарными лекциями активно работала стендовая сессия. Доклады проф. Н.А. Амирхановой с сотр. (Уфимский авиационный технический университет, Башкортостан, Россия), проф. Е.М. Румянцева, Ю.Я. Лукомского, С.А. Лилина, Г.Ф. Юдиной с сотр. (ИГХТУ), И.М. Жарского с сотр. (БГТУ), А.И. Дикусара (ИПФ АН РМ) и др., посвященные различным проблемам электротехнологии и ее применению в производстве, вызвали живой и заинтересованный обмен мнениями. Следует отметить работы группы из ИГХТУ по восстановлению медных печатных валов электрохимическим методом, серию работ, выполненных в Уфимском авиационном техническом университете, по разработке методов управления импульсной ЭХРО импульсами микросекундного диапазона и исследованию катодных отложений при прецизионной импульсной ЭХРО; работы ИГХТУ по химической металлизации пластмасс, новый метод оценки рассеивающей способности электролитов при интенсивном электролизе (ИПФ АН РМ), работы БГТУ по утилизации отходов с выделением алмазов и др.

Участники семинара вместе с коллективом ИГХТУ присутствовали при открытии в университете мемориальной доски, посвященной памяти первого заведующего кафедрой технологии электрохимических производств университета, известного специалиста в области прикладной электрохимии, одного из авторов широко известного учебника по прикладной электрохимии, по которому воспитано не одно поколение ученых и специалистов, профессора Л.Л. Кузьмина.

Нет сомнения в том, что семинар не только способствовал активному получению и распространению новой научной информации в области электрохимической технологии, но и останется в памяти участников как одна из вех в их научной и практической деятельности.

А.И. Дикусар

ВЫШЛА В СВЕТ КНИГА

В.С. Нагорный, Ю.А. Левченко

ЭЛЕКТРОКАПЛЕСТРУЙНАЯ АВТОМАТИКА В ПРОИЗВОДСТВЕ ХИМИЧЕСКИХ НИТЕЙ

(Санкт-Петербург, Издательство «Политехника», 2001).

Впервые с единых методологических позиций рассматриваются основы теории и практики применения электрокаплеструйной автоматки. Принцип работы электрокаплеструйных устройств (ЭКСУ) заключается в создании (с использованием микропроцессоров или микроЭВМ) линейной последовательности потока монодисперсных капель рабочей жидкости (таких капель в секунду может быть сформировано до ста тысяч) одинакового диаметра, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга, сообщении (при необходимости) любой выбранной капле рабочей жидкости заданной величины электрического заряда того или иного знака и отклонении в электрическом поле данной капли в заданную точку.

Характерной особенностью ЭКСУ является их конструктивная простота, отсутствие подвижных механических элементов, микропрограммное управление процессами бесконтактного нанесения рабочих жидкостей на объекты с любой формой поверхностей из различных материалов (химические нити, ткани, пластмассы, стекло, металл, бумага и т. д.).

Разработанные и изложенные авторами в данной монографии новые научные результаты и практические рекомендации по разработке принципиально новых автоматических управляемых от микроЭВМ электрокаплеструйных технологий являются приоритетными в мире и имеют межотраслевое применение в различных отраслях промышленности и областях науки: точное нанесение технологических жидкостей на химические волокна и нити в процессе их производства (замасливание, промывка, крашение и др.); микрокапельное дозирование рабочих жидкостей; дозированное сообщение электрического заряда определенного знака и величины в различных приложениях; маркировка (нанесение бесконтактным образом знаковой, буквенно-цифровой, графической информации) изделий с различными физическими и геометрическими параметрами поверхностей (например, яиц, бутылок, стальных листов и изделий из других металлов и полимеров, других объектов); получение из расплавов металлических и полимерных порошков с заданными параметрами; цветное электрокаплеструйное нанесение рисунков на ткани и иные текстильные изделия; реализация новых (электрокаплеструйных) медикобиохимических технологий, качество которых во многом зависит от точного управляемого (в том числе от ЭВМ) микродозирования рабочих жидкостей.

Во всех этих научных и технических приложениях управляемая капля рабочей жидкости является одновременно и *исполнительным элементом* (!) автоматических систем, что существенно увеличивает их быстродействие и позволяет максимально использовать преимущества микропроцессорного управления.

Изложенная в книге общая теория электрокаплеструйной автоматики (*что представляет самостоятельный интерес для всех перечисленных выше приложений*) применена к разработанным *принципиально новым* электрокаплеструйным управляемым от микроЭВМ технологиям при производстве химических нитей, позволяющим получить на заданных участках движущихся нитей (волокон) требуемое количество технологической жидкости (незаряженной или заряженной тем или иным знаком) в широком диапазоне титров нитей и скоростей их движения: процессы замасливания, промывки, снятия заряда, крашения нитей и волокон; получения комбинированной нити, многофиламентной нити с утолщениями через заданные интервалы; процессы параллелизации волокон в устройствах безверетенного прядения. Таким образом проиллюстрирована эффективность использования электрокаплеструйной автоматики при управляемом от микроЭВМ нанесении жидких веществ на такие сложные с позиций управления объекты как очень тонкие химические нити и волокна, движущиеся с большими скоростями.

Актуальность этих проблем обусловлена тем, что в настоящее время благодаря уникальным и одновременно универсальным свойствам химических нитей и волокон они находят применение практически во всех областях техники, в том числе космической, ракетно-, авиа-, судостроении, машиностроении и других отраслях, а также используются в специальных изделиях (броня, бронежилеты и т.п.). Актуальными задачами при производстве химических нитей является повышение их качества, уровня автоматизации и экологической чистоты технологического процесса. Особое место в этом плане занимает проблема точного и управляемого нанесения специальных технологических жидкостей на химические нити. В монографии показано, что существующие способы нанесения технологических жидкостей на нити в силу самих применяемых для этого принципов не могут решить эти задачи, а их решение возможно с использованием принципиально новых (электрокаплеструйных) технологий.

Рассмотрены теоретические модели электрогидродинамического разбиения струи рабочей жидкости на монодисперсные капли, сообщения управляемого как по величине, так и по знаку электрического заряда капле рабочей жидкости, отклонения капель в электрическом поле и методы расчета статических и динамических характеристик соответствующих ЭКСУ. Приведены результаты внедрения выполненных исследований на российских и зарубежных предприятиях.

Вы можете заказать книгу по электронной почте: nagorny@jet.hop.stu.neva.ru