

На правах рукописи



Василевская Светлана Игоревна

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ
МАЛОГО ДИАМЕТРА ПРИ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННО – ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПРОШИВКЕ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «НГТУ»)

Научный руководитель:

Рахимянов Харис Магсуманович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», заведующий кафедрой технологии машиностроения

Официальные оппоненты:

Янюшкин Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», профессор кафедры «Технология машиностроения», г. Чебоксары

Козырь Аркадий Валентинович

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», декан инженерно-физического факультета, г. Благовещенск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», (ФГБОУ ВО «ОмГТУ»), г. Омск

Защита состоится «14» мая 2020 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КНАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201, корпус 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте организации https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/135. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

К.Т.Н.



Проценко Александр

Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В современном производстве актуальным является решение задач по созданию средств технического и технологического оснащения для изготовления деталей малых геометрических размеров. К этому классу объектов следует отнести отверстия малого диаметра, обработка которых становится особенно проблематичной, когда длина отверстия существенно превосходит его диаметр.

Так, формообразование глубоких отверстий малого диаметра в деталях, работающих в условиях высоких температур и являющихся каналами для охлаждения, смазки, подачи и распыления топлива и т.д., представляет определенные сложности. Это связано с тем, что подобные детали зачастую выполняются из высокопрочных материалов, обработка которых традиционным резанием затруднена, а порой и невозможна. Решение задач по формообразованию поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов возможно при использовании электрофизических методов и, в первую очередь, электроэрозионных и электрохимических. Представляет интерес обработка, основанная на комбинировании воздействий указанных методов, сочетание которых позволяет реализовать не только достоинства каждого из них, но и минимизировать присущие им недостатки. Формообразование глубоких отверстий малого диаметра (менее 1 мм) возможно лишь в условиях высокой локализации процесса (на межэлектродных зазорах (МЭЗ) менее 0,1 мм), что неизбежно приведет к возникновению гидродинамических ограничений при движении потока электролита как в условиях электрохимической размерной обработки (ЭХРО), так и при ее комбинировании с электроэрозионной (ЭЭО). В тоже время высокие требования по точности к формируемому отверстию накладывают дополнительные условия по электроизоляции боковой поверхности катода – инструмента. Наличие изоляционного покрытия определенной толщины создает дополнительные ограничения в гидродинамике потока электролита при движении по боковому зазору. Кроме того, малые размеры катода – инструмента при значительной длине определяют недостаточную его жесткость, что также является проблемой формообразования глубоких отверстий малого диаметра. Реализация технологических возможностей комбинированной обработки требует теоретической и экспериментальной оценки отмеченных ограничений для установления области режимных параметров прошивки отверстий малого диаметра, что и определяет актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время в различных отраслях машиностроительного производства, а также в авто, – авиастроении, космической, атомной, медицинской отраслях эффективно используются электрофизические методы формообразования поверхностей, в частности, ЭХРО, ЭЭО и комбинированная обработка. Значительный вклад в развитие ЭХРО внесли ученые Ф.В. Седыкин, В.В. Любимов, В.М. Волгин, А.Д. Давыдов, И.И. Мороз, Ю.П. Черепанов, К.Р. Rajurkar и др. Успехи в области ЭЭО достигнуты благодаря трудам Б.Р. Лазаренко, А.Ф. Бойко, С.В. Николенко, М.Ю. Сарилова, С.Н. Химухина, Т. Masuzawa, M.D. Nguyen и др. В создании, развитии и совершенствовании комбинированных технологий значимы достижения В.П. Смоленцева, Е.В. Смоленцева, Б.П. Саушкина и др.

Эффективность использования электрофизикохимических методов для формообразования отверстий подтверждается наличием широкого спектра специализированных прошивочных станков. Дальнейшее их развитие связано с реализацией технологий на объектах малых размеров.

Цель работы

Целью настоящей работы является установление области рациональных режимных параметров электроэрозионно – электрохимического формообразования глубоких отверстий малого диаметра с учетом гидродинамических процессов в межэлектродном зазоре.

Задачи исследования

1. Обоснование выбора комбинируемых процессов для формообразования глубоких отверстий малого диаметра в токопроводящих материалах.
2. Установление закономерностей формообразования отверстий и выявление ограничений в обработке на основе системного анализа комбинированного процесса.
3. Выявление ограничений в скорости обработки и поиск путей их устранения.
4. Теоретическое исследование гидродинамических процессов в МЭЗ при прошивке глубоких отверстий малого диаметра для установления границ области режимных параметров.
5. Разработка методики назначения режимных параметров электроэрозионно – электрохимической прошивки отверстий.
6. Экспериментальное подтверждение результатов теоретического исследования и промышленное апробирование.

Научная новизна

1. Установлено, что при прошивке отверстий диаметром менее 1 мм область режимных параметров ограничена линией допустимых подач относительного перемещения электродов, при которых обеспечивается полное удаление продуктов обработки из МЭЗ за счет гидродинамики потока электролита, но при этом исключается развитие его кавитации. Ограничение величины МЭЗ значением 0,1 мм при формообразовании отверстий малого диаметра исключает возможность использования электролитов с максимальной электропроводностью и выходом обрабатываемого материала по току при максимальном значении технологического напряжения (п. 2 паспорта специальности 05.02.07).

2. Выявлено, что наличие электроизоляционного покрытия на боковой поверхности электрода – инструмента приводит к дополнительному ограничению области режимных параметров за счет смещения минимального значения торцевого МЭЗ. Развитие гидродинамических ограничений при формообразовании глубоких отверстий, связанных с потерей давления электролита в МЭЗ, и определяет положение линий предельно достижимых глубин прошивки в области режимных параметров. Установлено, что увеличение толщины электроизоляционного покрытия приводит к снижению глубины прошивки отверстия (п. 2 паспорта специальности 05.02.07).

3. Предложена методика назначения режимных параметров комбинированной прошивки отверстия, заключающаяся в установлении границ области режимных параметров, определении положения линий предельно достижимых глубин прошивки с учетом гидродинамических ограничений и расчете режимных параметров элек-

трохимической и электроэрозионной составляющих (п. 3 паспорта специальности 05.02.07).

4. На примере прошивки глубоких отверстий малого диаметра в меди М1 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность использования электроэрозионно – электрохимического формообразования, обеспечивающего точность диаметрального размера в пределах 0,02 мм и шероховатость поверхности $Ra = 0,51$ мкм при максимально возможной производительности обработки, исключающей возникновение гидродинамических ограничений (п. 3 паспорта специальности 05.02.07).

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы вносят вклад в развитие представлений о закономерностях электрохимического и электроэрозионно – электрохимического формообразования глубоких отверстий малого диаметра в токопроводящих материалах и представлены аналитическим описанием электрохимических, электроэрозионных и гидродинамических процессов в межэлектродном зазоре, что позволяет определить область рациональных режимных параметров обработки на этапе проектирования операции.

По результатам диссертационной работы на предприятии ООО «Физико-технический Центр» проведено апробирование технологии электроэрозионно – электрохимической прошивки отверстия диаметром 0,52 мм глубиной 12,4 мм в детали – фильера, выполненной из нержавеющей стали. Отмечена высокая точность формообразования отверстия (отклонение по диаметру не превышает 0,02 мм) при значении шероховатости $Ra = 0,42 - 0,61$ мкм.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.03.05 в дисциплине «Основы электрофизических методов обработки» и магистров по направлению 15.04.05 в дисциплине «Специальные главы ТМС» в ФГБОУ ВО «НГТУ».

Объект исследования – формообразование глубоких отверстий малого диаметра при комбинированной электроэрозионно – электрохимической обработке.

Предмет исследования – процессы, протекающие при комбинированной обработке.

Методология и методы исследования

Теоретические исследования проводились на основе фундаментальных и прикладных положений теорий электрохимической и электроэрозионной обработок, гидродинамики, технологии машиностроения. При проведении экспериментальных исследований использовалась специальная измерительная и регистрирующая аппаратура.

Положения, выносимые на защиту:

1. Возможность использования комбинированной обработки для прошивки глубоких отверстий малого диаметра при организации гидродинамики потока электролита, снимающей диффузионные и частично пассивационные ограничения в обработке, и введении электроэрозионных разрядов как инструмента, исключающего механизмы пленочной пассивации обрабатываемой поверхности (п. 2 паспорта специальности 05.02.07).

2. Результаты поляризационных исследований, подтверждающие возникновение диффузионных и пассивационных ограничений в электрохимической обработке (п. 2 паспорта специальности 05.02.07).

3. Результаты теоретического анализа гидродинамических ограничений в МЭЗ для определения области режимных параметров, установления ее границ и положения линий предельно достижимых глубин прошивки на примере формообразования отверстия в модельных материалах – меди М1 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т (п. 2 паспорта специальности 05.02.07).

4. Результаты экспериментальных исследований по электрохимическому и электроэрозионно – электрохимическому формообразованию отверстий в модельных материалах как неизолированным электродом – инструментом, так и при наличии электроизоляционного покрытия на боковой поверхности (п. 2 паспорта специальности 05.02.07).

5. Методика расчета режимных параметров комбинированной обработки (п. 3 паспорта специальности 05.02.07).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы подтверждается корректностью методов решения задачи гидродинамики; использованием классических методов экспериментального исследования; применением измерительных приборов требуемой точности.

Основные результаты диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на научных конференциях: 6^{ой} международной научно – технической конференции «Инновации в машиностроении – основа технического развития России» (г. Барнаул, 2014); XIV Всероссийской с международным участием научно – технической конференции «Механики XXI века» (Братск, 2015); 7^{ой} международной научно – практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Кемерово, 2015); «Высокие, критические электро – и нанотехнологии» (г. Тула, 2017); 8^{ой} международной научно – практической конференции «Инновации в машиностроении» (г. Новосибирск, 2017); 4^{ой} Всероссийской конференции молодых ученых «Наука и инновации XXI века» (г. Сургут, 2017); 9^{ой} международной научно – практической конференции, посвященной 75 – летию технологического образования на Алтае «Инновации в машиностроении» (г. Барнаул, 2018); 14^{ой} международной научно – технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП – 2018)» (г. Новосибирск, 2018); International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2018) «MATEC Web of Conferences» (г. Севастополь, 2018); International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2019) «MATEC Web of Conferences» (г. Севастополь, 2019); Innovations in Mechanical Engineering (ISPCIME-2019) «MATEC Web of Conferences» (г. Кемерово, 2019); на научном семинаре кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», АлтГТУ, г. Барнаул, 2019; на научном семинаре кафедры «Технология машиностроения» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», СевГУ, г. Севастополь, 2019; на научном семинаре кафедры «Технологической информатики и информационных систем» ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», ТОГУ, г. Хабаровск, 2019.

Публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертации изложено в 28 публикациях, в автореферате представлено 20, из них 4 статьи опубликовано в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 8 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Связь работы с Государственными программами

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию № 2014/138, проект № 257 (2014 – 2016 г.г.).

Личный вклад автора состоит в непосредственном выполнении теоретических и экспериментальных исследований, участии в постановке задач, интерпретации полученных результатов совместно с соавторами публикаций, формулировке научных положений и выводов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 150 наименований и приложения. Диссертация изложена на 195 страницах машинного текста, содержит 9 таблиц, 90 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, установлена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, отмечены степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлен аналитический обзор методов формообразования малоразмерных отверстий. Показано, что классические технологии механического формообразования давлением и резанием имеют значительные ограничения в обработке малоразмерных глубоких отверстий, особенно в деталях из высокопрочных металлов и сплавов. Анализ современных методов комбинированной обработки, в частности, электроэрозионно – электрохимической, показал на ее перспективность для получения глубоких прецизионных отверстий, как реализующей не только преимущества каждого из комбинируемых в обработке процессов, но и создающей условия в получении синергетического эффекта от их совмещения в едином пространстве и времени. Однако получение глубоких отверстий малого диаметра на малых межэлектродных зазорах предопределяет появление гидродинамических ограничений в движении потока электролита по межэлектродному зазору. Практическое решение задачи формообразования таких отверстий требует установления области режимных параметров и разработки методики их назначения.

Во второй главе изложен подход в изучении механизма формообразования отверстий при комбинированной электроэрозионно – электрохимической прошивке. На основе анализа процессов, протекающих при электрохимическом и электроэрозионном воздействиях на обрабатываемый материал, и изучения возникающих взаимосвязей при их сочетании разработана структурная схема комбинированной прошивки отверстий (рисунок 1). Наличие структурной схемы, представленной совокупностью отдельных подсистем, определяющих функционирование процессов в обработке с отображением входных и возмущающих факторов, способствует пони-

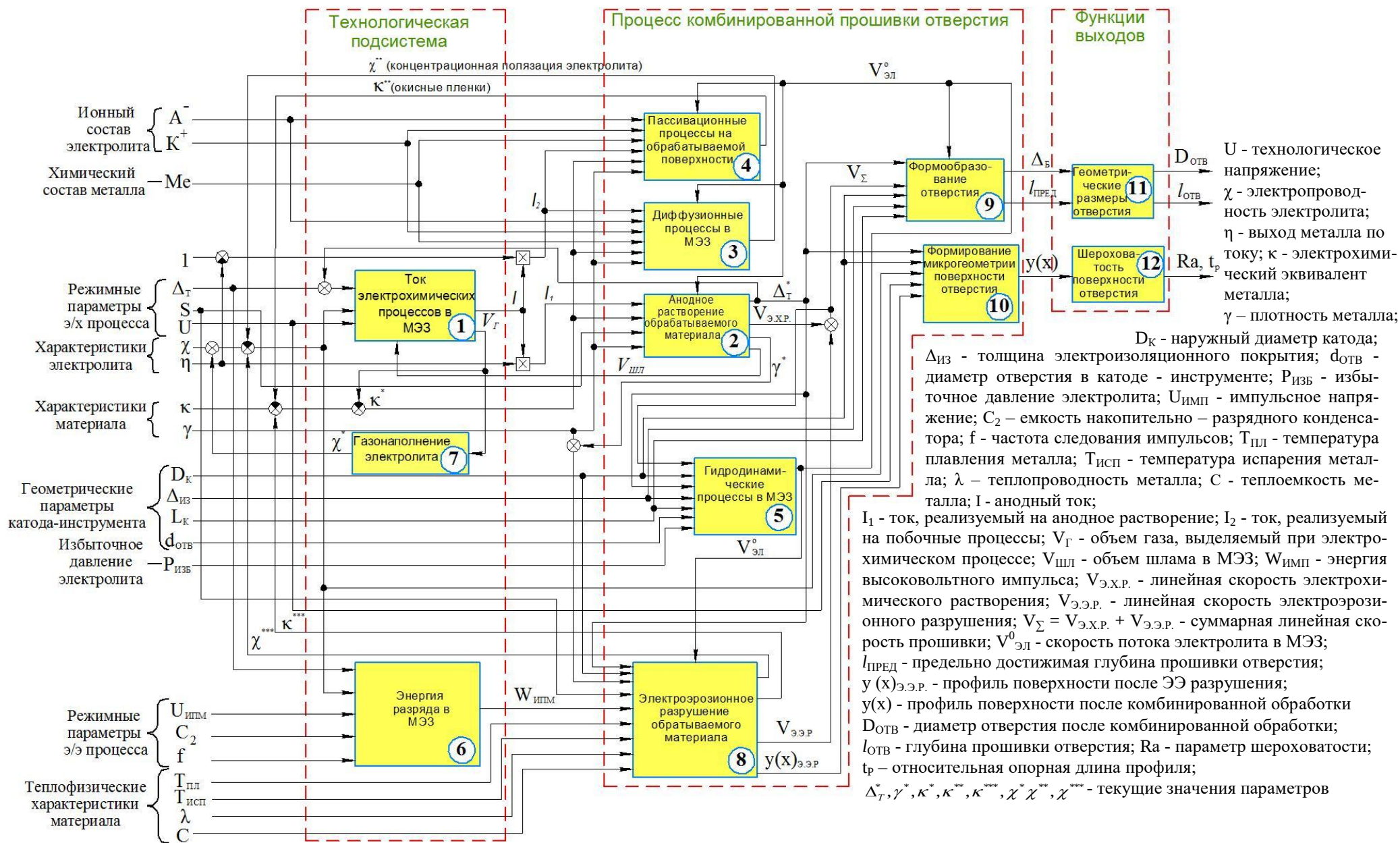


Рисунок 1 – Структурная схема комбинированной прошивки отверстий

манию механизмов формообразования отверстий и на основе их математического описания представляется возможным целенаправленное управление процессом обработки. Изучение процессов, реализуемых в подсистемах структурной схемы комбинированной обработки, позволило сгруппировать их следующим образом. Так, процессы «Технологической подсистемы», а также процессы анодного растворения, электроэрозионного разрушения обрабатываемого материала, формообразования отверстия и формирования микрогеометрии поверхности в подсистеме «Процесс комбинированной прошивки отверстия» направлены на решение основной технологической задачи – прошивки отверстия. Одновременно в МЭЗ возникают ограничения диффузионного и пассивационного характера, препятствующие эффективному развитию формообразующих процессов. При этом наличие технологической среды, представленной потоком электролита, определяет развитие гидродинамических процессов в МЭЗ. Анализ физических моделей действующих процессов свидетельствует о том, что полное устранение диффузионных ограничений и частично пассивационных возможно при определенном уровне гидродинамики потока электролита. Полная депассивация обрабатываемой поверхности обеспечивается при постоянном обновлении за счет электроэрозионной составляющей в комбинировании. Поэтому теоретическое изучение комбинированной обработки может быть представлено математическим описанием только формообразующих процессов и процессов организации гидродинамики потока электролита.

В разделе также представлены методики и оборудование экспериментальных исследований. Дано обоснование выбора модельных материалов для теоретического и экспериментального изучения – меди М1 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В качестве технологической среды в комбинированной обработке использовались водные нейтральные растворы солей NaCl , KCl , NaNO_3 , NH_4NO_3 , Na_2SO_4 . Представлена схема разработанной установки для проведения экспериментальных исследований как электрохимической, так и электроэрозионно – электрохимической прошивки отверстий малого диаметра в условиях относительного перемещения электродов.

Третья глава посвящена изучению диффузионных и пассивационных ограничений при электрохимическом растворении обрабатываемого материала с использованием поляризационных исследований. На рисунке 2 представлены потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения меди М1 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т в неподвижных электролитах NaNO_3 (рисунок 2,а) и NaCl (рисунок 2,б) различной концентрации, которые представляют собой зависимости плотности тока в условиях непрерывной развертки потенциала на аноде.

Общим для всех поляризационных кривых является наличие областей активного, пассивного растворения в определенных диапазонах потенциала анода. Область активного растворения характеризуется увеличением плотности тока с ростом потенциала и, наоборот, снижением в области пассивного растворения материала. Последнее связано с тем, что в МЭЗ на определенной стадии процесса возникают диффузионные и пассивационные ограничения. Первое определяется изменением состава электролита в приэлектродном слое, а второе является следствием адсорбции кислорода на аноде, образования на его поверхности окисной пленки и отложений на ней продуктов анодного растворения (шлама).

Подтверждением факта пассивации поверхности анода пленочными образова-

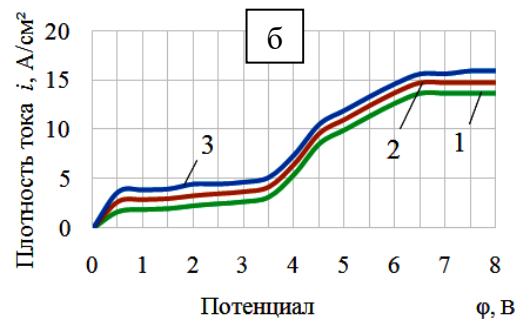
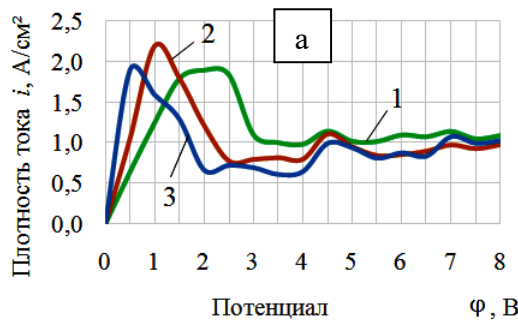


Рисунок 2 – Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения меди М1 в NaNO_3 (а) и нержавеющей стали 12Х18Н10Т в NaCl (б) при концентрациях: 1 – 5 %; 2 – 10 %; 3 – 15 %

ниями являются результаты, полученные при потенциостатических исследованиях (рисунок 3), когда перед каждым опытом оксидная пленка удалялась с поверхности анода. В первоначальный момент времени включения потенциала при его любых значениях наблюдается максимальное значение плотности тока, которое по истечении

определенного времени (10 – 15 с) снижается, что свидетельствует о пассивации поверхности анода.

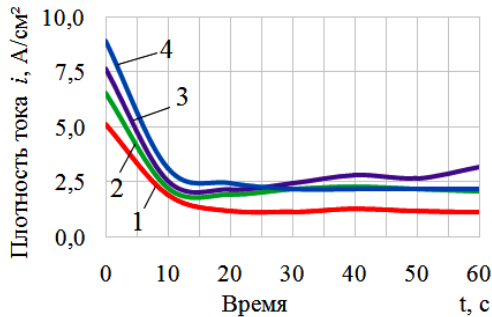


Рисунок 3 – Потенциостатические поляризационные кривые анодного растворения меди М1 в 5 % растворе NaNO_3 при потенциалах: 1 – 2В; 2 – 4В; 3 – 6В; 4 – 8В

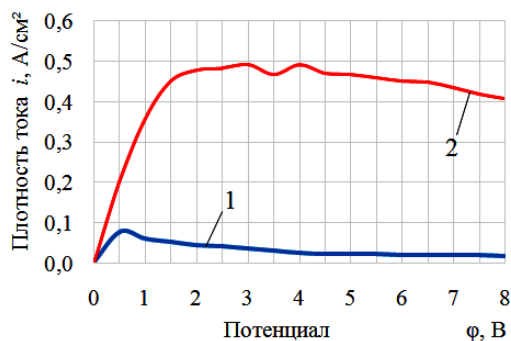


Рисунок 4 – Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения меди М1 в 5 % NaCl в условиях: 1 – неподвижного электролита; 2 – с прокачкой электролита

пассивационных ограничений процесс формообразования глубоких отверстий малого диаметра будет определяться только гидродинамикой потока электролита в МЭЗ.

Четвертая глава посвящена выявлению гидродинамических ограничений при прошивке глубоких отверстий малого диаметра. Самоустанавливающийся характер анодного растворения, как составляющей в комбинированной обработке, в условиях

Устранение ограничений, связанных с образованием в МЭЗ продуктов анодного растворения, концентрационной поляризацией электролита в приэлектродной области, адсорбцией кислорода на обрабатываемой поверхности и частичное снятие пассивационных ограничений пленочного характера, возможно за счет гидродинамической активации процесса, реализуемой при прокачке электролита через зону обработки (рисунок 4). Несмотря на то, что на обеих кривых (1, 2) присутствуют области как активного, так и пассивного растворения, наблюдается значительное (до 5 раз) увеличение плотности тока при гидродинамической активации процесса. Наличие области пассивации на кривой 2 свидетельствует о том, что введение гидродинамики не снимает полностью ограничения в скорости анодного растворения, связанные с действием пленочных механизмов торможения. В комбинированной обработке полная депассивация анодной поверхности обеспечивается действием электрических разрядов. При снятии диффузионных и

относительного перемещения электродов описывается зависимостью (1), устанавливающей взаимосвязь линейной скорости электрохимического растворения (подачи катода – инструмента S) с параметрами процесса:

$$V_{\text{э.х.р.}}(S) = \frac{k \cdot \chi \cdot U \cdot \eta}{60 \cdot \Delta_T \cdot \gamma}, \quad (1)$$

где k – электрохимический эквивалент обрабатываемого металла; χ – удельная электропроводность электролита; U – технологическое напряжение; η – выход обрабатываемого металла по току; Δ_T – торцевой межэлектродный зазор; γ – удельный вес обрабатываемого металла.

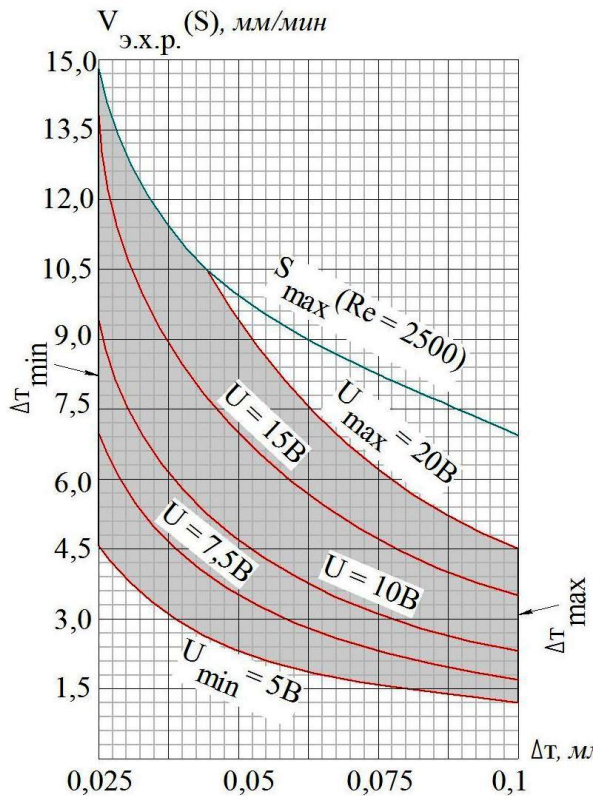


Рисунок 5 – Соотношение линейной скорости анодного растворения (подачи электрода – инструмента) меди М1 в 30 % NaNO_3 и торцевого МЭЗ

На рисунке 5 представлено графическое отображение зависимости (1) при электрохимическом растворении меди М1 в установленных диапазонах значений технологического напряжения и торцевого межэлектродного зазора. Выделенная на графике область режимных параметров ограничена $\min$ и $\max$ значениями технологического напряжения, торцевого МЭЗ, а также линией предельно допустимой подачи. Известно, что стабильность электрохимического формообразования обеспечивается при отсутствии кавитационных явлений в потоке электролита, что соответствует его гидродинамике с числом Рейнольдса $Re \leq 2500 \dots 4000$. Для исследуемого диапазона значений торцевого МЭЗ от 0,1 до 0,025 мм скорость потока электролита (30 % NaNO_3) при числе Рейнольдса $Re = 2500$ будет находиться в интервале от 33 до 132 м/с. Эмпирическая зависимость скорости потока электролита (м/с), необходимой для полного удаления продуктов электрохимических реакций со скоростью анодного растворения (подачей) (мм/мин) в виде:

$$V_{\text{эл}}^0 \geq 4 + 0,6S^2, \quad (2)$$

предопределяет диапазон предельных значений подачи $S_{\max}$ от 6,9 до 14,6 мм/мин в интервале значений торцевого МЭЗ, исключающих развитие кавитации.

На рисунке 6 показана расчетная схема гидравлического тракта при формообразовании отверстия полым катодом – инструментом с электрической изоляцией боковой поверхности. Для обеспечения оптимальной скорости потока в рабочей зоне (под торцом катода – инструмента) необходимо наличие на входе в гидравлический тракт определенного избыточного давления ($P_{\text{изб}}$). Величина последнего определяет гидродинамический режим в МЭЗ, зависящий от гидравлических потерь на местных сопротивлениях в межэлектродном зазоре, которые в общем случае описываются зависимостью:

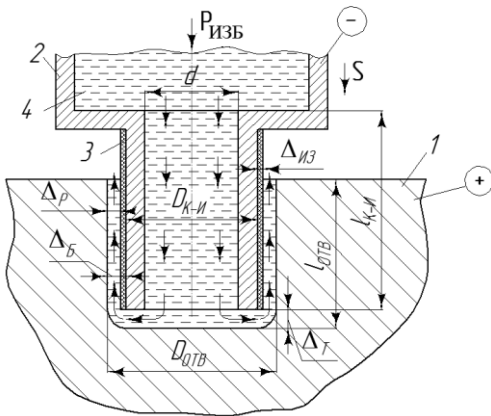


Рисунок 6 – Схема гидравлического тракта при формообразовании отверстия катодом – инструментом:
1 – обрабатываемый материал;
2 – полый катод – инструмент;
3 – электроизоляционное покрытие;
4 – электролит

соотношением внутреннего и наружного диаметров 0,18/0,28 мм при толщинах изоляционного покрытия $\Delta_{из} = 0,02$ мм и $\Delta_{из} = 0,05$ мм, расположенных в области режимных параметров.

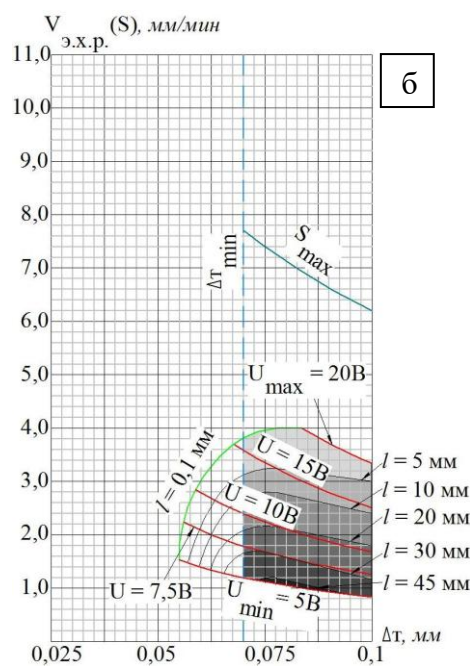
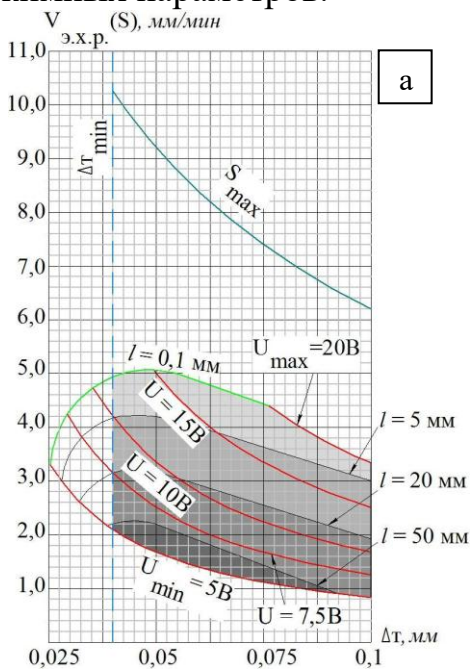


Рисунок 7 – Линии предельно достижимых глубин в области режимных параметров электрохимической прошивки отверстия в меди М1 катодом – инструментом с соотношением диаметров 0,18/0,28 мм в 20 % NaNO_3 при давлении $P_{изб} = 1,0$ МПа и толщине изоляционного покрытия: а – $\Delta_{из} = 0,02$ мм; б – $\Delta_{из} = 0,05$ мм

обработке отверстий большего типоразмера гидродинамические ограничения ослабевают, что отражается как на размерах области режимных параметров, так и на значениях достижимых глубин обработки.

Еще одним ограничением при формообразовании глубоких отверстий малого диаметра является недостаточная жесткость полого катода – инструмента. Под

$$\Delta P_i = \xi_i \cdot \frac{\rho \cdot V_i^2}{2}, \quad (3)$$

где ΔP_i – местные потери; ξ_i – коэффициент местного гидравлического сопротивления; ρ – плотность электролита; V_i – скорость потока электролита (после местного сопротивления).

Расчет гидравлических потерь в межэлектродном зазоре направлен на установление ограничений режимных параметров электрохимической составляющей комбинированной обработки в достижении требуемой глубины прошивки отверстия.

На рисунке 7 представлены результаты расчета в виде линий предельно достижимых глубин прошивки катодом – инструментом с

Аналогичные результаты по оценке гидродинамических потерь получены при прошивке отверстия в нержавеющей стали 12Х18Н10Т (рисунок 8). Результаты расчетов свидетельствуют как о значительном сужении области режимных параметров, так и уменьшении предельно достижимых глубин прошивки с увеличением толщины электроизоляционного покрытия на катоде – инструменте. При

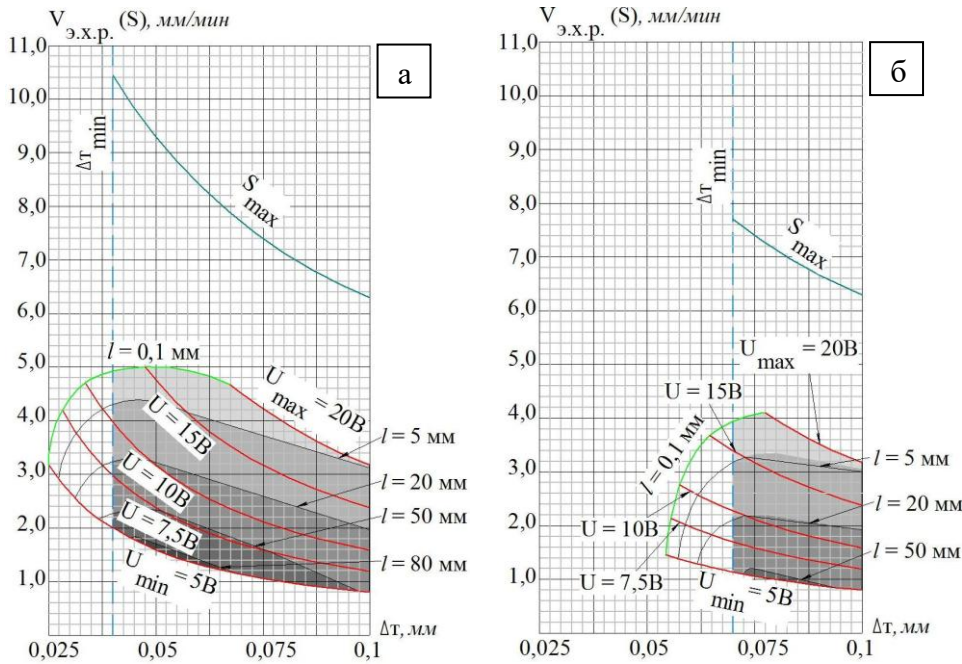


Рисунок 8 – Линии предельно достижимых глубин в области режимных параметров электрохимической прошивки отверстия в стали 12X18H10T катодом – инструментом с соотношением диаметров 0,18/0,28 мм в 10 % NaCl при избыточном давлении $P_{изб} = 1,0$ МПа и толщине изоляционного покрытия:

а – $\Delta_{ЛЗ} = 0,02$ мм; б – $\Delta_{ЛЗ} = 0,05$ мм

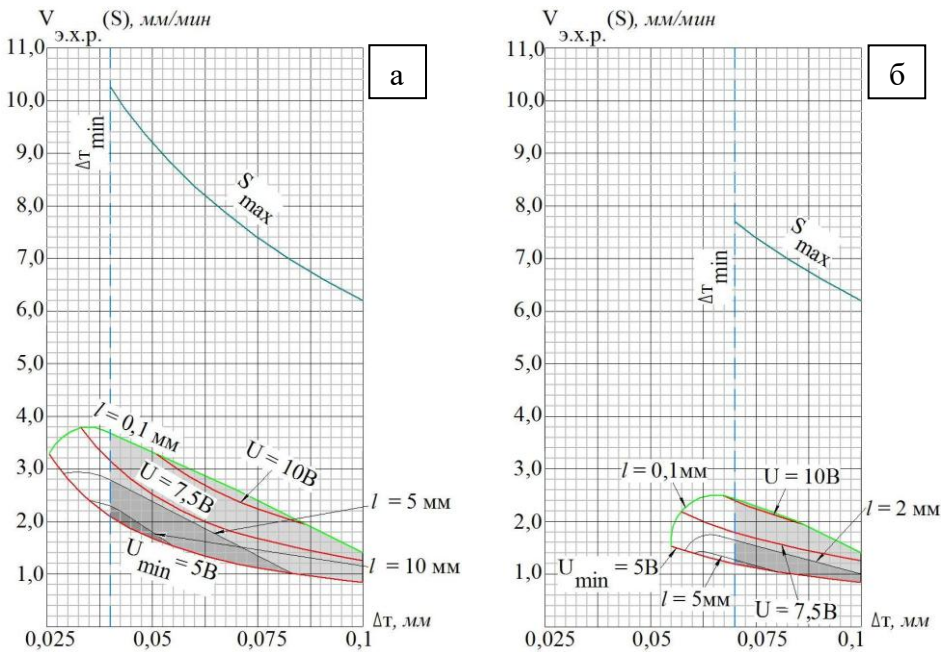


Рисунок 9 – Линии предельно достижимых глубин в области режимных параметров электрохимической прошивки отверстия в меди М1 катодом – инструментом с соотношением диаметров 0,1125/0,28 мм в 20 % NaNO₃ при избыточном давлении $P_{изб} = 1,0$ МПа и толщине изоляционного покрытия:

а – $\Delta_{ЛЗ} = 0,02$ мм; б – $\Delta_{ЛЗ} = 0,05$ мм

рисунке 10. Соблюдение гидродинамического режима потока электролита в рабочей зоне МЭЗ обеспечило прошивку отверстия в меди с точностью формообразования 0,02 мм и шероховатостью поверхности $Ra = 0,20$ мкм.

действием гидродинамики потока электролита возникают автоколебания инструмента, что в условиях малых МЭЗ приводит к короткому замыканию электродов, и как следствие, к разрушению инструмента и обрабатываемой поверхности.

Попытка повышения жесткости инструмента за счет увеличения момента инерции его поперечного сечения (что возможно только при уменьшении диаметра отверстия) привела к значительному сокращению расчетной области режимных параметров и снижению предельно достижимых глубин прошивки отверстия (рисунок 9).

Подтверждение справедливости теоретического подхода в установлении области режимных параметров с учетом гидродинамических ограничений получено при экспериментальной проверке, один из результатов которой показан на

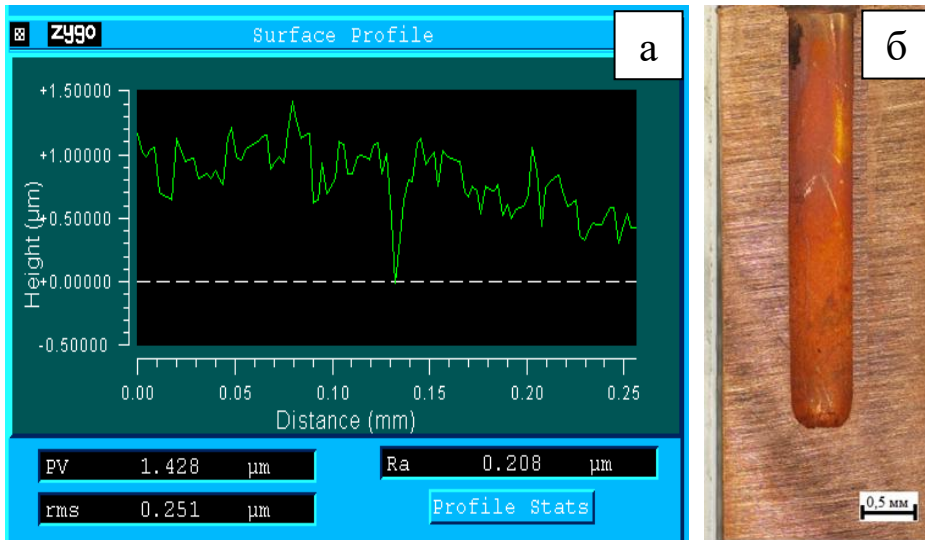


Рисунок 10 – Профилограмма поверхности (а) и фотография продольного сечения отверстия (б) в меди М1, сформированного электрохимической прошивкой катодом – инструментом с соотношением диаметров 0,26/0,46 мм, $\Delta_{ИЗ} = 0,05$ мм в 5 % NaNO_3 при $S = 0,5$ мм/мин, $U = 14,7$ В, $P_{ИЗБ} = 1,0$ МПа

В пятой главе представлены результаты теоретического анализа и их экспериментальное подтверждение в части количественной оценки вклада электроэрозионной составляющей в комбинированной обработке. Согласно структурной схемы (рисунок 1) линейная скорость электроэрозионного разрушения ($V_{Э.Э.Р.}$) может быть представлена эмпирической зависимостью как функция режим-

ных параметров высоковольтного импульса, теплофизических характеристик обрабатываемого материала и диаметра отверстия в виде:

$$V_{Э.Э.Р.} = \frac{240 \cdot K_{Э} \cdot W_{ИМП}^* \cdot f}{\pi \cdot D_{ОТВ}}, \text{ мм/мин}, \quad (4)$$

где $K_{Э} = k_{\Phi} \cdot k_h \cdot k_D^2 \cdot 10^{-9}$ – удельная эрозия, [мм³/мкДж], пропорциональная коэффициентам формы (k_{Φ}), глубины (k_h) и квадрату коэффициента диаметра (k_d) лунки, формируемой единичным разрядом;

$W_{ИМП}^* = k \frac{C_2 \cdot U_{ИМП}^2}{2}$ – энергия импульса, [мкДж], затрачиваемая на разрушение

обрабатываемого материала с учетом потерь (k) в канале разряда; C_2 – емкость накопительно – разрядного конденсатора; $U_{ИМП}$ – напряжение импульса;

f – частота следования импульсов, [Гц];

$D_{ОТВ}$ – диаметр формируемого отверстия, [мм].

Линейная скорость съема обрабатываемого материала (подача катода – инструмента) в комбинированной обработке представляется суммой составляющих процесса:

$$V_{\Sigma}(S) = V_{Э.Х.Р.} + V_{Э.Э.Р.}, \text{ мм/мин}. \quad (5)$$

На основе теоретического анализа процессов предложена методика назначения режимных параметров комбинированной прошивки отверстия, графическое представление которой для формообразования отверстия диаметром 0,6 мм, глубиной 10 мм в нержавеющей стали 12Х18Н10Т дано на рисунке 11. Методика назначения режимных параметров предполагает следующую последовательность:

1. По заданному значению диаметра формируемого отверстия (0,6 мм) и диаметру (0,46 мм) выбранного для прошивки катода – инструмента определяется расчетное значение торцевого МЭЗ, равное $\Delta_{Трасч.} = \Delta_B = (0,6 - 0,46)/2 = 0,07$ мм.

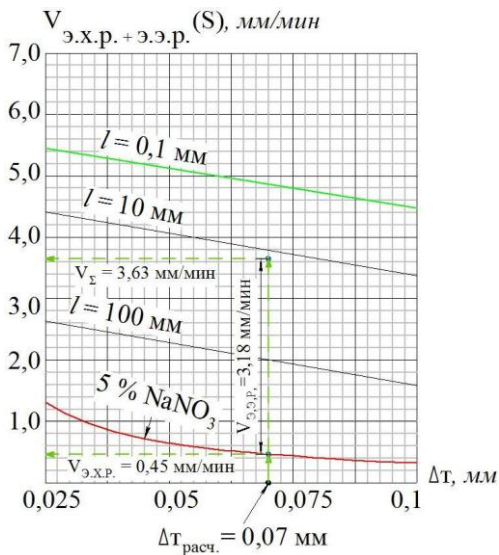


Рисунок 11 – Соотношение подачи и торцевого межэлектродного зазора при комбинированной электроэрозионно – электрохимической прошивке отверстия в нержавеющей стали 12Х18Н10Т изолированным полым катодом – инструментом при $\Delta_{из} \rightarrow 0$ мм с соотношением диаметров 0,26/0,46 мм в 5 % NaNO_3 при $U = 10$ В; $P = 0,8$ МПа; $U_{имп} = 250$ В; $C_2 = 25$ нФ; $f = 25$ кГц

ние суммарной линейной скорости съема материала $V_{\Sigma} = 3,63$ мм/мин, что и определяет величину подачи катода – инструмента (S) в обработке.

4. Доля электроэрозионного разрушения материала в комбинированной обработке будет равна $V_{э.э.р.} = V_{\Sigma} - V_{э.х.р.} = 3,63 - 0,45 = 3,18$ мм/мин. В соответствии с зависимостью (4) данной скорости соответствует набор параметров электроэрозионной составляющей: $U_{имп} = 250$ В; $C_2 = 25$ нФ; $f = 25$ кГц.

5. Имеет место определенная условность в определении долей составляющих в обработке, так как существует возможность проявления синергетического эффекта, обусловленного взаимным влиянием комбинируемых процессов друг на друга.

6. Увеличение или снижение доли электрохимической составляющей потребует соответствующей корректировки режимов электроэрозионного процесса с обеспечением постоянства в скорости прошивки. При этом увеличение доли электрохимического растворения снизит проявление негативных процессов, связанных с эрозионным износом катода – инструмента и ухудшением шероховатости обработанной поверхности, но потребует либо повышения технологического напряжения, что увеличит вероятность возникновения коротких замыканий на малых МЭЗ, либо повышения концентрации электролита, что приведет к возрастанию агрессивности технологической среды.

Результаты экспериментальных исследований (рисунок 12) подтверждают эффективность комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов для формообразования отверстий малого диаметра. Установлено, что скорость формообразования отверстия в нержавеющей стали 12Х18Н10Т и меди М1 неизоли-

2. В области режимных параметров, соответствующей комбинированной обработке стали 12Х18Н10Т в выбранном электролите (5 % NaNO_3) и условиям формообразования (изолированный катод – инструмент с соотношением диаметров 0,26/0,46 мм, $\Delta_{из} \rightarrow 0$ мм; при $P_{изб} = 0,8$ МПа), по расчетному значению торцевого МЭЗ назначается определенная величина технологического напряжения ($U = 10$ В), что обеспечит линейную скорость электрохимического растворения материала ($V_{э.х.р.}$), равную 0,45 мм/мин.

3. Суммарная линейная скорость съема материала при комбинированной обработке $V_{\Sigma}(S) = V_{э.х.р.} + V_{э.э.р.}$ ограничена положением линии предельно достижимой глубины прошивки ($l = 10$ мм) в области режимных параметров. В данном примере точка пересечения координат $\Delta_{Трасч.}$ и V_{Σ} должна лежать ниже указанной линии. Так, расчетному значению $\Delta_{Трасч.} = 0,07$ мм соответствует значение

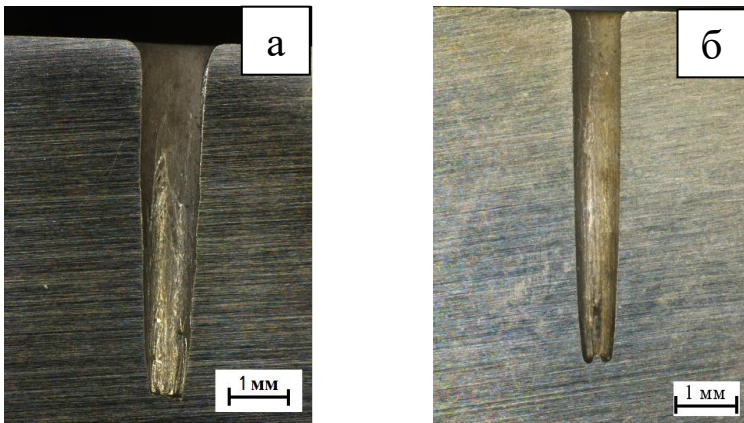


Рисунок 12 – Фотографии продольных сечений отверстий, сформированных в нержавеющей стали 12X18H10T неизолрированным катодом – инструментом 0,26/0,46 мм в 5 % NaNO_3 при $U = 10$ В, $P = 0,8$ МПа: а – электрохимической прошивкой на подаче $S = 0,6$ мм/мин; б – электроэрозионно-электрохимической прошивкой на подаче $S = 2,18$ мм/мин, $U_{\text{имп}} = 300$ В, $C_2 = 47$ нФ; $f = 36,6$ кГц

рованными катодами – инструментами даже при минимальных значениях концентрации электролита и технологического напряжения при введении высоковольтных импульсов возросла в 3,63 – 4,15 раза, соответственно. При этом наблюдается снижение конусности в отверстиях с $5,08^\circ$ при электрохимической прошивке (рисунок 12,а) до $2,5^\circ$ при комбинированной (рисунок 12,б). Формирование конусности в обоих случаях объясняется использованием инструмента с электрически неизолрированной боковой поверхностью.

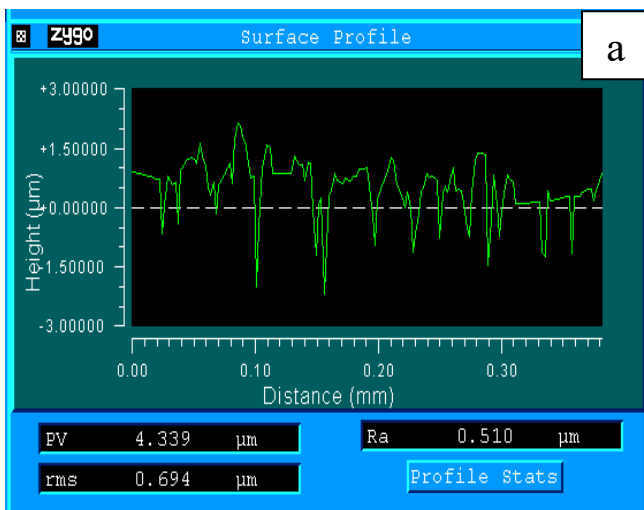


Рисунок 13 – Профилограмма поверхности (а) и фотография продольного сечения отверстия (б), сформированного электроэрозионно – электрохимической прошивкой в нержавеющей стали 12X18H10T катодом – инструментом 0,39/0,64 мм с изолированной боковой поверхностью в 5 % NaNO_3 на подаче $S = 2,05$ мм/мин при $U = 10$ В; $P = 0,8$ МПа; $U_{\text{имп}} = 250$ В, $C_2 = 47$ нФ; $f = 25$ кГц

На рисунке 13 представлены профилограмма поверхности и фотография продольного сечения отверстия, сформированного электроэрозионно – электрохимической прошивкой инструментом с электрической изоляцией боковой поверхности. Использование катода с изолированной боковой поверхностью позволило сформировать отверстие глубиной 8,34 мм при $S =$

2,05 мм/мин с разбросом значений диаметра в диапазоне от 0,79 до 0,81 мм и шероховатостью поверхности $Ra = 0,51$ мкм.

В целом же комбинирование электрохимических и электроэрозионных процессов в одной обработке помимо обеспечения высокой производительности процесса, позволяет по сравнению с электрохимической обработкой, вести процесс при минимальных концентрациях электролита, что в значительной мере снижает агрессивное действие электролита как на технологическое оборудование, так и на обслуживающий персонал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании аналитического обзора существующих методов формообразования отверстий малого диаметра в различных токопроводящих материалах, в том числе и в труднообрабатываемых, наиболее перспективной представляется комбинированная обработка, основанная на сочетании электрохимических и электроэрозионных процессов и реализуемая по схеме прошивки полым катодом – инструментом с электрически изолированной боковой поверхностью при прокачке электролита через центральное отверстие и в условиях относительного движения электродов.

2. Изучение электрохимической составляющей комбинированной обработки позволило выявить наличие диффузионных и пассивационных ограничений, снижающих производительность процесса. Установлена возможность устранения диффузионных и части пассивационных ограничений за счет гидродинамики электролита в межэлектродном зазоре. Введение электрических разрядов в межэлектродный зазор обеспечивает полное снятие пассивационных ограничений, способствуя повышению производительности обработки.

3. Установлено, что при прошивке малых отверстий на МЭЗ менее 0,1 мм в меди в растворе хлористого натрия возникают дополнительные ограничения из-за образования на обрабатываемой поверхности труднорастворимой в электролите соли CuCl_2 , что исключает возможность обработки в условиях относительного движения электродов.

4. Прошивка глубоких отверстий малого диаметра на определенной стадии процесса сопровождается возникновением гидродинамических ограничений, связанных с потерей давления и снижением скорости потока электролита в рабочей зоне ниже критической, необходимой для полного удаления продуктов обработки, что и определяет предельное значение глубины прошивки. На основании теоретических расчетов определены границы режимных параметров электрохимической составляющей при обработке отверстия в меди М1 в 20 % NaNO_3 , в нержавеющей стали 12Х18Н10Т в 10 % NaCl полым катодом – инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметров 0,18/0,28 и 0,1125/0,28, а также при формообразовании отверстия в меди М1 в 30 % NaNO_3 , полым катодом – инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметров 0,70/0,90 и 0,25/0,90 при толщинах электроизоляционного покрытия $\Delta_{\text{из}} \rightarrow 0$ мм, $\Delta_{\text{из}} = 0,02$ мм, $\Delta_{\text{из}} = 0,05$ мм на всех катодах – инструментах. В области режимных параметров рассчитано положение границ предельно достижимых глубин прошивки отверстий для определенных условий обработки. Установлено, что увеличение достижимой глубины происходит с уменьшением значений подачи и технологического напряжения. Показано, что технологические ограничения в обработке, связанные с потерей давления электролита на местных сопротивлениях гидравлического тракта, существенно сужают область режимных параметров. Установлено, что данные ограничения в основном связаны с толщиной электроизоляционного покрытия на боковой поверхности катода – инструмента.

5. Установлено, что повышение жесткости катода – инструмента в установленном ряду размеров (до 1 мм) за счет увеличения момента инерции его поперечного сечения сопровождается возникновением значительных гидродинамических потерь в отверстии катода – инструмента, что приводит к существенному сужению области

режимных параметров обработки и снижению уровня предельно достижимых глубин.

6. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена перспективность комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов для формообразования глубоких отверстий малого диаметра. Комбинированная прошивка отверстий в нержавеющей стали 12Х18Н10Т и меди М1 в условиях относительного движения электродов с использованием инструмента с неизолированной боковой поверхностью обладает в 3,63 и 4,15 раза, соответственно, большей скоростью прошивки по сравнению с электрохимической размерной обработкой. При этом отмечается снижение конусности отверстия с $5,08^0$ до $2,5^0$.

7. Экспериментально подтверждено, что нанесение электроизоляционного покрытия на боковую поверхность катода – инструмента способствует достижению высокой степени копирования диаметрального размера инструмента по глубине отверстия. Так, эрозионно – электрохимическая обработка нержавеющей стали 12Х18Н10Т полым катодом – инструментом с соотношением диаметров 0,39/0,64 мм с электрически изолированной боковой поверхностью позволила сформировать отверстие глубиной 8,34 мм в течении 4 мин. При этом разброс диаметральных размеров по глубине отверстия находился в диапазоне от 0,79 мм до 0,81 мм при шероховатости поверхности $Ra = 0,51$ мкм. Введение электроэрозионной составляющей в комбинированную обработку реализует процесс при меньших концентрациях электролита, что обеспечивает защиту как технологического оборудования, так и обслуживающего персонала.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Рахимянов, Х.М. Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра / Х.М. Рахимянов, С.И. Василевская, И.А. Леонтьев // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №10(64). – С. 7 – 13.

2. Рахимянов, Х.М. Выбор электролитов для электрохимической обработки отверстий малого диаметра в меди / Х.М. Рахимянов, С.И. Василевская // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – №4(70). – С. 17 – 24.

3. Рахимянов, Х.М. Роль анионного состава электролита при электрохимической прошивке отверстий малого диаметра / Х.М. Рахимянов, С.И. Василевская, К.Х. Рахимянов, С.В. Джавадова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 2. – С. 107 – 112.

4. Рахимянов, Х.М. Технологические ограничения в электрохимической прошивке отверстий малого диаметра / Х.М. Рахимянов, С.И. Василевская, К.Х. Рахимянов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 5 – 15.

В изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

5. Рахимянов, Х.М. Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди / Х.М. Рахимянов, Б.А. Красильников, С.И. Василевская // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 3(68). – С. 58 – 65.

6. Рахимьянов, Х.М. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом - инструментом / Х.М. Рахимьянов, С.И. Василевская // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2(71). – С. 12 – 20.

7. Рахимьянов, Х.М. Особенности формообразования малых отверстий в меди при электрохимической обработке в водных хлоридных растворах / Х.М. Рахимьянов, С.И. Василевская // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – 2(75). – С. 6 – 16.

8. Rakhimyanov, Kh. M. Providing the forming accuracy during the electrochemical deep hole drilling of a small diameter by the cathode – tool with a complete electro – isolating coating / Kh. M. Rakhimyanov, S. I. Vasilevskaya, K. Kh. Rakhimyanov // XIV International scientific-technical conference «Actual problems of electronic instrument engineering» (APEIE – 2018). 2018, Vol.1, no. 3, pp. 151 – 154.

9. Rakhimyanov, Kh. M. Prospects of combining electro-erosive and electrochemical processes in forming the holes of a small diameter in difficult – to – process materials / Kh. M. Rakhimyanov, S. I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2018. – Vol. 224: International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2018). – Art. 01013 (7p.).

10. Rakhimyanov, K. Kh. Anodic behavior of amorphous and nanocrystal alloys during the electrochemical processing / K. Kh. Rakhimyanov, M.V. Ivanova, S.I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2018. – Vol. 224: International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2018). – Art. 01012 (6p.).

11. Vasilevskaya, S. I. Consideration of hydraulic limitations in setting the mode parameters of combined piercing the holes / S.I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2019. – Vol. 298: International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2019). – Art. 00141 (6 p.).

12. Rakhimyanov, Kh. M. Activation of Electrochemical Piercing of Small Diameter Holes by Implementing High-Voltage Pulses in the Inter-Electrode Gap / Kh. M. Rakhimyanov, S.I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2019. – Vol. 297: X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME 2019). – Art. 01008 (7 p.).

В прочих изданиях:

13. Рахимьянов, Х.М. Исследование электролитов, обеспечивающих точность электрохимической обработки меди М1 / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, С.И. Василевская // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы 6 междунар. науч.-техн. конф., Барнаул, 23–26 сент. 2014 г. – Барнаул, 2014. - Ч. 2. – С. 100 – 104.

14. Krasilnikov, B.A. Anode dissolution localization of copper in water electrolytes / B.A. Krasilnikov, S.I. Vasilevskaya // Applied Mechanics and Materials, 2015. - Vol. 788: Actual Problems and Decisions in Machine Building. - pp. 11 – 16.

15. Рахимьянов, Х.М. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, А.С. Захаров, С.И. Василевская // Механики XXI века, 2015. - № 14. - С. 112 – 115.

16. Василевская, С.И. Влияние локализации процесса струйной электрохимической обработки на точность формирования геометрии отверстий / С.И. Василевская, В.Ф. Макаров, Н.С. Литвинова, К.С. Слывакова // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015 : материалы 16 Всерос. науч.-техн. конф., Пермь, 17–18 нояб. 2015 г. – Пермь, 2015. – С. 262 – 266.

17. Рахимьянов, Х.М. Исследование анодного поведения меди в условиях электрохимической обработки при гидроструйной активации поверхности / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, С.И. Василевская // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015). Innovations in mechanical engineering (Ispcime-2015) : сб. тр. 7 междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 23–25 сент. 2015 г. – Кемерово, 2015. – С. 126 – 130.

18. Рахимьянов, Х.М. Оценка гидродинамических процессов при электрохимической прошивке отверстий малого диаметра / Х.М. Рахимьянов, С.И. Василевская // Высокие, критические электро- и нанотехнологии : сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф., Тула, 19 дек. 2017 г. – Тула, 2017. – С. 62 – 74.

19. Рахимьянов, Х.М. Подбор анионного состава электролита для прошивки малых отверстий в меди / Х.М. Рахимьянов, С.И. Василевская, А.В. Журавлева // Инновации в машиностроении (ИнМаш–2017). Innovations in mechanical engineering (ISPCIME–2017): сб. тр. 8 междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 28–30 сент. 2017 г. – Новосибирск, 2017. – С. 126 – 131.

20. Василевская, С.И. Установка для электрохимической прошивки отверстий с подвижным анодом / С.И. Василевская, С.В. Джавадова // Наука и инновации XXI века: материалы 4 Всерос. конф. молодых ученых, Сургут, 30 нояб. 2017 г.: в 3 т. – Сургут, 2017. – Т. 1. – С. 48 – 50.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс: (383)346-08-57
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 478 подписано в печать 13.03.2020 г.