

В диссертационный совет Д 212.092.01  
ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, 27

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Василевской Светланы Игоревны  
«Формообразование глубоких отверстий малого диаметра при  
электроэрозионно – электрохимической прошивке», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.02.07 – Технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки

### Актуальность темы диссертационной работы

Формообразование внутренних поверхностей, в частности, глубоких отверстий, диаметральных размеры которых составляют десятые доли миллиметра, является сложной технологической задачей. Подобного рода отверстия присутствуют в конструкциях лопаток турбин, форсунок, фильер, сопловых аппаратов, изделий медицинского назначения и др. Зачастую по условиям эксплуатации деталей к отверстиям предъявляются высокие требования, как по точности, так и по микрогеометрии поверхности.

Использование традиционных методов формообразования отверстий малого диаметра, основанных на процессах разрушения обрабатываемого материала режущим клином, что является характерным для лезвийной обработки, затруднено, а иногда и невозможно. Применение электрофизических методов, таких как эрозионный, электрохимический, позволяет решить подобного рода технологические задачи. Весьма эффективным при формообразовании отверстий является комбинированный процесс эрозионно – электрохимической прошивки. Совмещение этих процессов в одной обработке объясняется благоприятным сочетанием условий для их реализации в межэлектродном зазоре (МЭЗ).

Следует отметить, что формообразование глубоких отверстий малого диаметра возможно лишь в условиях высокой локализации процесса, что обеспечивается на межэлектродных зазорах менее 0,1 мм. Однако, необходимость прокачки технологической среды через малые зазоры неизбежно приведет к потере давления при ее движении по гидравлическому тракту. Это, в свою очередь, внесет ограничения в достижении требуемой глубины прошивки отверстия.

Таким образом, диссертация Василевской Светланы Игоревны, направленная на решение практической задачи, а именно, на установление области рациональных режимных параметров электроэрозионно – электрохимического формообразования глубоких отверстий малого диаметра с учетом гидродинамических ограничений в МЭЗ, является актуальной.

### **Структура и основное содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа представлена введением, основным текстом, изложенном в 5 главах, заключением и приложением. Объем работы – 195 страниц печатного текста, включая 90 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 150 наименований.

**Во введении** автором дано обоснование актуальности выполненных исследований, представлена формулировка цели диссертационной работы и определен перечень задач для ее достижения. В общем представлении работы раскрыта научная новизна, показаны теоретическая, практическая значимость полученных результатов и их реализация.

**В первой главе** автором представлен аналитический обзор по теме диссертационной работы. Изучение существующих методов формообразования малоразмерных отверстий позволило автору дать объективную оценку каждому из них и определить перспективность использования электроэрозионно-электрохимической обработки для решения технологических задач формообразования поверхностей деталей машин и инструментов. В тоже время, для использования комбинированной обработки для получения глубоких отверстий малого диаметра необходимо установление области ее режимных параметров, с учетом специфики протекания электрофизикохимических и гидродинамических процессов в малом МЭЗ. Необходимость решения данной технологической проблемы и определило цель и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** диссертационной работы изложен подход в изучении процессов, протекающих при формообразовании отверстий в условиях комбинированной электроэрозионно-электрохимической прошивки. Автор, применяя системный подход в изучении взаимосвязей реализуемых в комбинированной обработке электрохимических и электроэрозионных процессов, воздействующих на обрабатываемый материал, разработал структурную схему комбинированной прошивки отверстий.

Наличие структурной схемы дает понимание механизмов формообразования отверстий, а на основе их математического описания представляется возможным целенаправленное управление комбинированным процессом обработки в целом. При анализе структурной схемы автор предлагает действующие в МЭЗ процессы разделить на три группы. К первой группе относятся процессы анодного растворения и электроэрозионного разрушения обрабатываемого материала, направленные на решение основной задачи – формообразование отверстия. Во вторую группу входят диффузионные и

пассивационные процессы, сопутствующие анодному растворению и препятствующие электрохимическому формообразованию. В третьей группе рассматривается процесс организации гидродинамического потока в МЭЗ, ориентированного на полное устранение диффузионных и частичное – пассивационных ограничений. Диссертантом отмечается, что полная депассивация обрабатываемой поверхности возможна при постоянном ее обновлении за счет электроэрозионной составляющей в комбинированной обработке. Из чего автор делает вывод, что теоретическое изучение комбинированной обработки возможно при математическом описании процессов только первой и третьей группы при условии полного снятия ограничений диффузионного и пассивационного характера.

В данной главе также описаны методики и оборудование экспериментальных исследований. Представлена схема разработанной установки для проведения экспериментальных исследований как электрохимической, так и комбинированной прошивки отверстий малого диаметра в условиях относительного перемещения электродов. Дано обоснование выбора модельных материалов для теоретического и экспериментального изучения, а именно, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и меди М1. В качестве технологической среды в комбинированной обработке использовались водные нейтральные растворы солей нитратов натрия и аммония, сульфата натрия, хлористых натрия и калия.

**Третья глава** посвящена изучению диффузионных и пассивационных ограничений при электрохимическом растворении обрабатываемых материалов с использованием методики поляризационных исследований. Автор показывает, что наличие диффузионных и пассивационных ограничений в МЭЗ снижает скорость анодного растворения, а, следовательно, и производительность процесса обработки. Развитие диффузионных процессов диссертант объясняет возникновением концентрационной поляризации электролита, а пассивационные процессы – адсорбцией кислорода на аноде, образованием на его поверхности окисной пленки и отложением на ней продуктов анодного растворения (шлама).

Экспериментально установлено, что прокачка электролита в МЭЗ приводит к увеличению роста плотности тока, что свидетельствует о снятии части ограничений в процессе анодного растворения. Однако, на определенной стадии процесса наблюдается замедление роста плотности тока и ее последующее снижение, что свидетельствует о не полном снятии за счет гидродинамики электролита пассивационных ограничений, в основном пленочного характера. Необходимость устранения пассивационных ограничений при обработке того или иного материала ориентирует на применение комбинированных методов формообразования, в которых реализуется определенный механизм депассивации обрабатываемой поверхности. Применение электроэрозионно – электрохимической обработки для решения поставленной задачи, по мнению автора, позволяет считать, что инструментом депассивации обрабатываемой поверхности будут являться эрозионные разряды.

Таким образом, автор предполагает возможность устранения диффузионных ограничений при прошивке глубоких отверстий малого диаметра за счет гидродинамики электролита в межэлектродном зазоре, а введение электрических разрядов в межэлектродный зазор обеспечивает полное снятие пассивационных ограничений, способствуя повышению производительности обработки.

Экспериментально установлено, что при прошивке малых отверстий на МЭЗ менее 0,1 мм в меди при использовании раствора хлористого натрия возникают дополнительные ограничения из-за образования на обрабатываемой поверхности труднорастворимой в электролите соли  $\text{CuCl}_2$ , что исключает возможность формообразования отверстий на малых МЭЗ. Для снятия данного ограничения рекомендуется при выборе электролита для обработки конкретного материала обращать внимание на характер образующегося в результате электрохимических реакций продукта.

**В четвертой главе** диссертационной работы рассмотрены вопросы, связанные с выявлением гидродинамических ограничений при прошивке глубоких отверстий малого диаметра.

Представляется оригинальным подход диссертанта в теоретической оценке разных по природе комбинируемых процессов, ориентированный на установление области режимных параметров прошивки глубоких отверстий малого диаметра. Так, изначально предлагается считать электрохимическую составляющую базовой в комбинированной обработке на том основании, что ее технологической средой является электролит, избыточное давление которого, ограниченное 1 МПа, соответствует электрохимической размерной обработке, а диапазон значений межэлектродного зазора от 0,025 до 0,1 мм в большей мере относится к ЭХРО, чем к ЭЭО. На основании этого, автор для установления области режимных параметров формообразования отверстий и расчета предельно достижимых глубин прошивки предлагает воспользоваться классическим уравнением, определяющим соотношение скорости анодного растворения и величины торцевого межэлектродного зазора при одном условии – отсутствие пленочных механизмов торможения электрохимического процесса, неизбежно возникающих при пассивации анодной поверхности. Такой подход вполне обоснован, поскольку, как отмечалось ранее, роль депассиватора диссертант отводит электроэрозионным разрядам. Количественная оценка электроэрозионного разрушения обрабатываемого материала, полученная на основании эмпирических зависимостей, позволяет считать правомерным такое предположение. Введение даже минимальных по энергии высокочастотных электроэрозионных разрядов в процесс электрохимического растворения обеспечивает многократное обновление обрабатываемой поверхности в течение 1 секунды, в то время как процесс ее пассивации во времени на порядок длительнее, что подтверждают данные поляризационных исследований, представленные в 3 главе диссертационной работы.

На основании теоретических расчетов диссертантом определены границы областей режимных параметров электрохимической составляющей

комбинированной прошивки отверстий в исследуемых материалах. В области режимных параметров рассчитано положение границ предельно достижимых глубин прошивки отверстий для определенных условий обработки. Установлено, что ограничения в обработке, связанные с потерей давления электролита на местных сопротивлениях гидравлического тракта, в основном определяются толщиной электроизоляционного покрытия на боковой поверхности катода – инструмента. Отмечено, что данные ограничения существенно смещают область режимных параметров в сторону больших значений МЭЗ.

Установлено, что повышение жесткости катода – инструмента в исследуемом ряду диаметральных размеров отверстий 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.

**Пятая глава** посвящена разработке методики назначения режимных параметров комбинированной обработки и экспериментальному подтверждению результатов теоретического исследования. При выборе соотношения электрохимического и электроэрозионного процессов диссертант отмечает особенности развития событий при преобладании той или иной составляющей в обработке, полагая, что окончательное решение будет приниматься при реализации конкретной технологической задачи.

**В заключении** работы отражены основные выводы по результатам диссертационного исследования.

Таким образом, в диссертации представлен большой теоретический и экспериментальный материал, полученный автором. Изложенные результаты, их интерпретация, сделанные выводы дают основание считать, что в ходе выполнения научной работы и написания диссертации Василевская С.И. приобрела необходимую для исследователя профессиональную квалификацию.

**В приложении** приведены акты использования результатов диссертационной работы в условиях промышленного апробирования и учебном процессе.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в том:

1. 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.

2. 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.

3. Впервые 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 электрохимической и электроэрозионной составляющих.

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, исключая возникновение гидродинамических ограничений.

#### **Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы**

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается использованием современных подходов в теоретическом и экспериментальном исследованиях. Соблюдение контролируемости условий проведения эксперимента обеспечило хорошую воспроизводимость его результатов. Материалы работы апробированы на конференциях различного уровня. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 28 печатных работах, в том числе в 4 научных статьях в журналах из перечня ВАК, в 8 статьях в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Результаты диссертационной работы вносят определенный 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.

#### **Соответствие содержания диссертационной работы указанной специальности**

По названию, объекту исследования, методам проведения исследований и содержанию материалов диссертационная работа соответствует следующим пунктам области исследования паспорта специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки:

- Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий (п.2).

- Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки (п.3).

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертационной работы**

Автореферат в достаточной мере отражает содержание, полученные результаты, положения и выводы диссертационной работы.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. На представленных в диссертационной работе иллюстрациях результатов электрохимической и комбинированной обработок показаны сечения глухих отверстий. Существует ли какая-нибудь особенность при формообразовании сквозных отверстий данными методами?

2. В третьей главе диссертационной работы (раздел 3.3) представлены результаты потенциостатических исследований для выявления характера электрохимического поведения меди М1 в водных нейтральных растворах солей. Чем объясняется отсутствие данных потенциостатических исследований для нержавеющей стали 12Х18Н10Т?

3. Автор отмечает, что комбинированная обработка по сравнению с электрохимической размерной обработкой, позволяет вести процесс формообразования отверстий при минимальных концентрациях электролита, что в значительной мере снижает агрессивное воздействие электролита на технологическое оборудование. Однако, известно, что для снижения воздействия агрессивности технологической среды на оборудование используют ингибиторы коррозии. Повлияет ли добавление ингибитора коррозии в электролит на процесс формообразования отверстий при комбинированной обработке?

4. В диссертационной работе (раздел 3.6) автором подробно рассмотрена причина ограничения, связанная с возникновением труднорастворимого соединения  $\text{CuCl}_2$  при электрохимическом формообразовании малых отверстий в меди М1 в водном растворе хлорида натрия на межэлектродных зазорах менее 0,1 мм. Данный факт нашел отражение и в заключении диссертационной работы, но не представлен в тексте автореферата.

5. В аналитическом обзоре (глава 1) и в разделе 5.3 «Методика назначения режимных параметров...» диссертант отмечает о реализации синергетического эффекта в комбинируемой обработке. Тем не менее, в работе не дается его количественной оценки, лишь отмечается необходимость корректировки режимных параметров, не поясняя каким образом.

### Заключение

Оценивая кандидатскую диссертацию Василевской Светланы Игоревны в целом, следует отметить, что она является самостоятельной, завершенной научно – квалификационной работой, выполненной на достаточно высоком уровне, в которой содержится решение научно – технической проблемы, имеющей существенное значение для современного машино-, авиа-, приборо-, автомобилестроения, а также медицинской отрасли.

Считаю, что по актуальности, научной новизне, практическому значению и объему полученных результатов диссертационная работа «Формообразование глубоких отверстий малого диаметра при электроэрозионно – электрохимической прошивке» удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в отношении кандидатских диссертаций, а ее автор – Василевская Светлана Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры «Технология машиностроения»  
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»,  
доктор технических наук по специальности 05.03.01 – Технологии и  
оборудование механической и физико-технической обработки (после изменения  
номенклатуры специальностей 05.02.07 – Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки),  
профессор

Янюшкин Александр Сергеевич  
10.04.2020 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»  
Адрес: Россия, 428015, г. Чебоксары, пр. Московский, 15  
Тел.: +7 9083035352  
E – mail: [yanyushkinas@mail.ru](mailto:yanyushkinas@mail.ru)