



Исследование и анализ электроэрозионной обработки при изготовлении изделий из жаропрочных сплавов (обзор исследований)

Евгений Шлыков ^a*, Тимур Абляз ^b, Владимир Блохин ^c, Карим Муратов ^d, Илья Осинников ^e

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru;
^c <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>, warkk98@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru;
^e <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>, ilyuhaosinnikov@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:

Поступила: 11 июня 2025

Рецензирование: 04 июля 2025

Принята к печати: 09 сентября 2025

Доступно онлайн: 15 декабря 2025

Ключевые слова:

Электроэрозионная обработка

Жаропрочные сплавы

Экспериментальные исследования

Рабочая жидкость

Шероховатость поверхности

Точность

Микротрешины

Поверхностный слой

АННОТАЦИЯ

Введение. В современном машиностроении наблюдается тенденция к разработке и внедрению новых жаропрочных сплавов с повышенными физико-механическими свойствами. Перспективным способом изготовления изделий из жаропрочных сплавов нового поколения является электроэрозионная обработка. В настоящей статье представлен анализ современных исследований в области электроэрозионной обработки жаропрочных сплавов. Основное внимание уделяется анализу выходных качественных и количественных показателей, которые зависят от входных параметров – режима обработки и условий обработки. Рассмотрены ключевые факторы, влияющие на эффективность электроэрозионной обработки: режимы обработки, состав рабочей жидкости, материал электродов. Материалы анализа современных исследований представляют интерес для специалистов в области обработки жаропрочных сплавов, разработчиков технологий электроэрозионной обработки и исследователей, работающих над совершенствованием методов изготовления изделий для авиадвигателестроения. **Цель работы:** обзор научной литературы, посвященной исследованиям современных методов обеспечения и повышения эффективности и качества электроэрозионной обработки жаропрочных материалов. **Методы исследования:** теоретический анализ современных исследований на тему электроэрозионной обработки жаропрочных сплавов. **Результаты и обсуждение.** Проведен анализ литературы, на основании которого установлено, что сила тока и время включения импульса являются основными технологическими параметрами, определяющими качество обработанной поверхности и скорость съема материала. Установлена эффективность применения модифицированной рабочей жидкости (с добавлением графена и углеродных нанотрубок) при обработке жаропрочных материалов для улучшения качества поверхности. Актуальным представляется проведение экспериментальных исследований влияния компонентов различных материалов, добавляемых в рабочую жидкость, для улучшения показателей качества поверхности после КПЭО, а также исследование влияния легирования данными материалами поверхностного слоя жаропрочных материалов.

Для цитирования: Исследование и анализ электроэрозионной обработки при изготовлении изделий из жаропрочных сплавов (обзор исследований) / Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз, В.Б. Блохин, К.Р. Муратов, И.В. Осинников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 16–47. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-16-47.

Введение

Ключевым вектором развития современной промышленности является активное внедрение и разработка жаропрочных материалов, обладающих определенным набором механических и физико-химических характеристик. Именно

эти характеристики гарантируют сохранение прочностных показателей конструктивных элементов оборудования и машин на протяжении всего установленного срока их службы. Большое количество научных коллективов сконцентрировано на изучении влияния различных вариаций обработок на характеристики жаропрочных сплавов, которые востребованы в важнейших отраслях – авиадвигателестроении, энергетическом машиностроении, ядерной энергетике и автомобильной промышленности. Более высокая стойкость к коррозии и окислению, повышенная пластичность, термостойкость, механическая

*Адрес для переписки

Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
 Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
 Комсомольский пр., 29,

614990, г. Пермь, Россия

Тел.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

прочность, сопротивление усталости и ползучести даже при повышенных температурах – вот свойства, которые делают жаропрочные сплавы превосходящими другие материалы.

Большинство жаропрочных сплавов изготавливаются на основе никеля. Благодаря превосходным механическим и химическим свойствам при высоких температурах, таким как высокая термостойкость, устойчивость к тепловому удару, повышенное сопротивление усталости, высокая прочность на разрушение, фазовая стабильность, повышенная устойчивость к эрозии и коррозии, повышенная пластичность и вязкость, высокая температура плавления, сплавы на основе никеля могут дольше работать в агрессивных эксплуатационных средах. Активное исследование жаропрочных материалов обусловлено их стратегическим значением для развития критических технологий, необходимостью постоянного совершенствования характеристик материалов и расширением областей применения в современной промышленности.

Зарубежными учеными изучается в основном жаропрочный никелевый сплав инконель [1–7] и его различные вариации, отличающиеся содержанием и количеством легирующих элементов. Жаропрочные материалы различаются по количеству легирующих элементов – никеля, отвечающего за пластичность, вязкость и теплоемкость сплава; молибдена и вольфрама, которые способствуют увеличению предела длительной механической прочности в среде высоких температур; ванадия, присутствующего в сплаве в малом количестве для улучшения жаропрочных свойств материала; ниobia, препятствующего межкристаллитной коррозии; титана для улучшения антакоррозионных свойств материала; кобальта, повышающего релаксационную стойкость сплава.

В работах [8–15] сказано, что сплавы на основе никеля широко используются во многих жизненно важных деталях аэрокосмических двигателей и газовых турбин, особенно в деталях, подверженных воздействию высоких температур, таких как лопатки реактивных турбин, лопасти турбокомпрессоров и камеры сгорания. Сплавы на основе никеля составляют около половины массы авиационных двигателей. Помимо аэрокосмической промышленности, сплавы на основе никеля также находят применение

в ядерных реакторах, пищевой промышленности, судостроении, на предприятиях по борьбе с загрязнением окружающей среды и нефтехимии и др. Актуальные направления разработки жаропрочных сплавов – сплавы, содержащие тугоплавкие переходные металлы (молибден, вольфрам, tantal, рений, рутений). Отечественные перспективные жаропрочные сплавы: ВВ751П, ЖС6, ХН70Ю, ХН60ВТ, ХН65ВМТЮ, ХН55ВМТКЮ, ХН78Т, ЭП741НП, ЭИ698 [16–18].

Низкая теплопроводность, высокая температура плавления, эффект упрочнения при обработке, образование заусенцев, создание высоких сил резания, химическое сродство к материалу инструмента и наличие в их микроструктуре частиц абразивного карбида – вот некоторые явления, затрудняющие механическую обработку этих жаропрочных сплавов. В свою очередь, повышенные температуры приводят к значительному увеличению нагрузки на режущую кромку инструмента, что интенсифицирует износ режущей кромки и вызывает необходимость введения корректировки на размер износа в управляющую программу оборудования.

Пластическая деформация данных материалов усложнена из-за аустенитной структуры с гранецентрированной кристаллической решеткой, для которой характерны низкие показатели предела текучести при сохранении высокого временного сопротивления. Жаропрочные материалы характеризуются хорошей истирающей способностью, интенсифицирующейся в присутствии карбидных включений высокой твердости и влияющей на истирание режущей кромки резцов. Кроме того, некоторые жаропрочные материалы могут содержать частицы твердых абразивов и карбидов, которые приводят к сильному износу инструмента, что значительно снижает срок службы инструмента. Таким образом, жаропрочные сплавы относятся к категории материалов, трудно поддающихся обработке резанием. Совокупность этих проблем сильно влияет на обеспечение точности при механической обработке таких сплавов [19–24].

Перспективным методом обработки жаропрочных материалов, на изучение которого направлено внимание научных коллективов и сообществ, является электроэрозионная обработка. В статье представлено исследование научных работ, посвященных изучению процесса

электроэррозионной обработки (ЭЭО) жаропрочных сплавов.

Целью настоящей работы является обзор описанных в научной литературе исследований современных методов обеспечения и повышения эффективности и качества электроэррозионной обработки жаропрочных материалов.

Для достижения поставленной цели в процессе исследования решались следующие **задачи**:

- классификация исследуемых параметров электроэррозионной обработки и современных методов обеспечения;
- определение преимуществ, недостатков, ограничений обеспечения, повышения эффективности и качества электроэррозионной обработки жаропрочных материалов;
- определение тенденций развития выделенных методов.

Методика исследований

Произведен комплексный литературный обзор исследований в области электроэррозионной обработки жаропрочных материалов, посвященный методам обеспечения качества обработки и методам улучшения эффективности электроэррозионной обработки жаропрочных сплавов. Описаны различные методы повышения эффективности и качества электроэррозионной обра-

ботки. Рассмотрены ограничения, преимущества и недостатки методов. Выявлены основные тенденции развития современных методов обеспечения и повышения эффективности электроэррозионной обработки жаропрочных сплавов.

Результаты и их обсуждение

Основные преимущества ЭЭО представлены на рис. 1.

Анализ направлений научных статей, связанных с изучением выходных параметров процессов проволочно-вырезной электроэррозионной обработки (ПВЭЭО) и копировально-прошивной электроэррозионной обработки (КПЭЭО) жаропрочных сплавов, представлен в таблице.

ЭЭО жаропрочных материалов сопровождается возникновением трещин на обрабатываемых поверхностях и переносом частиц с электрода-инструмента (ЭИ) и рабочей жидкости на поверхность, что приводит к изменению характеристик поверхностного слоя. Легирование частицами материала электрода-инструмента и отходами рабочей жидкости приводит к снижению эксплуатационных свойств изделий за счет неоднородного формирования поверхностной структуры (в том числе формирования микротрещин и поверхностных дефектов) и разупрочнения поверхностного слоя.



Рис. 1. Преимущества процесса ЭЭО

Fig. 1. Advantages of the EDM process

Направления научных статей, изучающих процессы ПВЭЭО и КПЭЭО жаропрочных сплавов
Directions of scientific papers studying the WEDM and CPEDM processes of heat-resistant alloys

Номер	Параметры варьирования	Выходные параметры	Номер источника
1	T_{on}, T_{off}, h Рабочая жидкость	Шероховатость поверхности	25–41
2	T_{on}, I, P	Коэффициент износа	32, 42–47
3	T_{on}, T_{off}, h	Ширина реза при ПВЭЭО	48–51
4	T_{on}, T_{off}, I, U Полярность	Величина дефектного (белого) слоя	32, 39–40, 54–60
5	Материал ЭИ, I, T_{on}	Качественные показатели (наличие трещин)	39, 43–45, 57, 69
6	Промывка МЭЗ	Шероховатость поверхности, точность обработки КПЭЭО, производительность	75–77

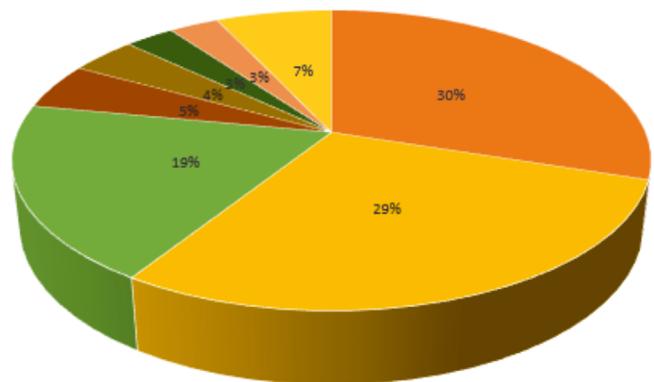
Актуальной задачей является критический обзор современных решений по обеспечению качества поверхности при электроэррозионной обработке жаропрочных сплавов с сохранением эксплуатационных свойств.

Основные тенденции современных исследований научных коллективов процесса ЭЭО жаропрочных сплавов представлены на рис. 2.

Анализ литературы на тему современных исследований процесса ЭЭО показал, что внимание авторов направлено в основном на изучение влияния таких параметров, как сила тока в межэлектродном зазоре I , время действия электрических импульсов T_{on} , напряжение U , полярность, материал электрода-инструмента, геометрия ЭИ, размер обрабатываемой поверхности, а также влияние рабочей жидкости (типа жидкости, чистоты, скорости подачи, системы фильтрации) на показатели качества обработки – шероховатость поверхности и измененный дефектный слой.

Показатель качества поверхности после ЭЭО – шероховатость по Ra

Исследования процесса ПВЭЭО в работах [25–31] проведены при обработке инконеля 625 с использованием ортогонального плана экспериментов, где выбраны различные параметры обработки – сила тока I , время включения импульса T_{on} , время выключения импульса T_{off} . Разработаны модели отклика и авторами установлено, что наибольшее влияние на качество поверхности – шероховатость по Ra – оказывают такие параметры, как время включения импульса



- Шероховатость поверхности
- Точность обработки
- Износ ЭИ
- Измененный дефектный (белый) слой
- Легирование поверхности электродом-инструментом
- Влияние промывки
- Влияние рабочей среды
- Качество поверхности (наличие впадин, трещин)

Рис. 2. Основные тенденции научных исследований процесса ЭЭО жаропрочных сплавов

Fig. 2. Main trends in scientific research of the EDM process of heat-resistant alloys

T_{on} и сила тока I . В работах [25, 29] отмечено, что низкий ток разряда способствует формированию более гладкой поверхности среза, что связано с более точным контролируемым процессом формирования единичных разрядов, а регулировка времени включения импульса при правильно подобранным режиме способствует равномерному плавлению материала на поверхности заготовки, испарению и выводу из зоны обработки, что бла-

гоприятно оказывается на качестве поверхности. Во всех работах наилучшие показатели шероховатости получены при времени включения импульса от 100 до 110 мкс, при этом сила тока составляла 7...9 А.

В работе [32] отмечено, что для обеспечения требуемой шероховатости поверхности с минимальным расходом электрода-инструмента в процессе КПЭЭО требуется применять минимальный пиковый ток и наименьшую длительность воздействия импульса. Авторы установили, что длительность воздействия импульса оказывает незначительное влияние на шероховатость поверхности.

В работах [33–37] авторы исследовали влияние входных параметров КПЭЭО обработки на производительность процесса и качество поверхности по Ra . Были проведены факторные эксперименты и получены функции отклика, которые показали, что на указанные параметры большее влияние оказывает сила импульсного тока. С увеличением силы тока происходит рост производительности процесса, при этом качество поверхности становится хуже, чем при меньшем токе.

В работе [38] описаны эксперименты с использованием анализа методом Тагучи Грей при ПВЭЭО материала инконель 825. Был проведен ряд экспериментов, которые показали, что время включения импульса и напряжение в искровом промежутке оказали наибольшее влияние на формирование шероховатости. Установлено, что оптимальные значения для обработки инконеля следующие: время включения импульса 105 мкс, время выключения импульса 40 мкс и напряжение в искровом промежутке 30 В.

В работе [39] авторы исследовали влияние включений в рабочую жидкость на качество поверхности – шероховатости по Ra . В качестве включений применялись графен и многослойные углеродные нанотрубки. Исследования проводились при одном режиме обработки: время включения импульса 35 мкс, сила тока 12 А, напряжение 40 В. Показано, что с добавлением в диэлектрическую жидкость углеродных частиц была получена более чистая поверхность ($Ra = 4,836$ мкм при добавлении графена; $Ra = 4,96$ мкм при добавлении углеродных нанотрубок) по сравнению с обычной обработкой ($Ra = 6,2$ мкм). Сравнительный анализ резуль-

татов позволяет сделать вывод о необходимости использования модифицированной рабочей жидкости для улучшения качества поверхности.

В работе [40] авторами проведено исследование влияния рабочей жидкости на качество и топографию поверхности (рис. 3).

Авторы отметили, что сила тока оказывает наибольшее влияние на формирование характеристик обрабатываемой поверхности и образование поверхностных дефектов. Авторы установили прямую зависимость: с увеличением тока все показатели качества поверхности ухудшились. Для достижения более гладкой поверхности следует использовать минимальные значения силы тока и времени действия импульса.

В работе [41] исследовали влияние параметров обработки на качество поверхности – шероховатость по Ra . Отмечено, что с увеличением времени импульса, пикового тока и напряжения происходило увеличение шероховатости. Выполнив оптимизацию режимов (время включения импульса 0,5 мкс, время выключения импульса 16 мкс, сила тока 6 А) по проведенным экспериментам, авторы смогли уменьшить шероховатость с 4,2 мкм (рис. 4, а) до 0,396 мкм (рис. 4, д).

Авторы отмечают, что улучшение шероховатости происходит именно из-за большой разницы между временем включения и временем выключения импульса. Отмечено, что по сравнению с другими группами обрабатываемости материалов при обработке жаропрочных материалов требуется более тщательная настройка режимов из-за легирующих элементов и более высокой склонности к образованию интерметаллидных фаз. При обработке жаропрочных материалов применяется более низкая энергия единичных импульсов, чем при обработке других групп обрабатываемости (стали и нержавеющие стали), для формирования низкой шероховатости.

Производительность процесса ЭЭО

В работе [42] были проведены эксперименты по скорости удаления материала при КПЭЭО с использованием трех материалов электрода-инструмента – медного, графитового и алюминиевого. Установлено, что наибольшая скорость удаления материала наблюдалась у графитового электрода, за которым следуют медный и алюминиевый электроды. Наименьшая скорость изно-

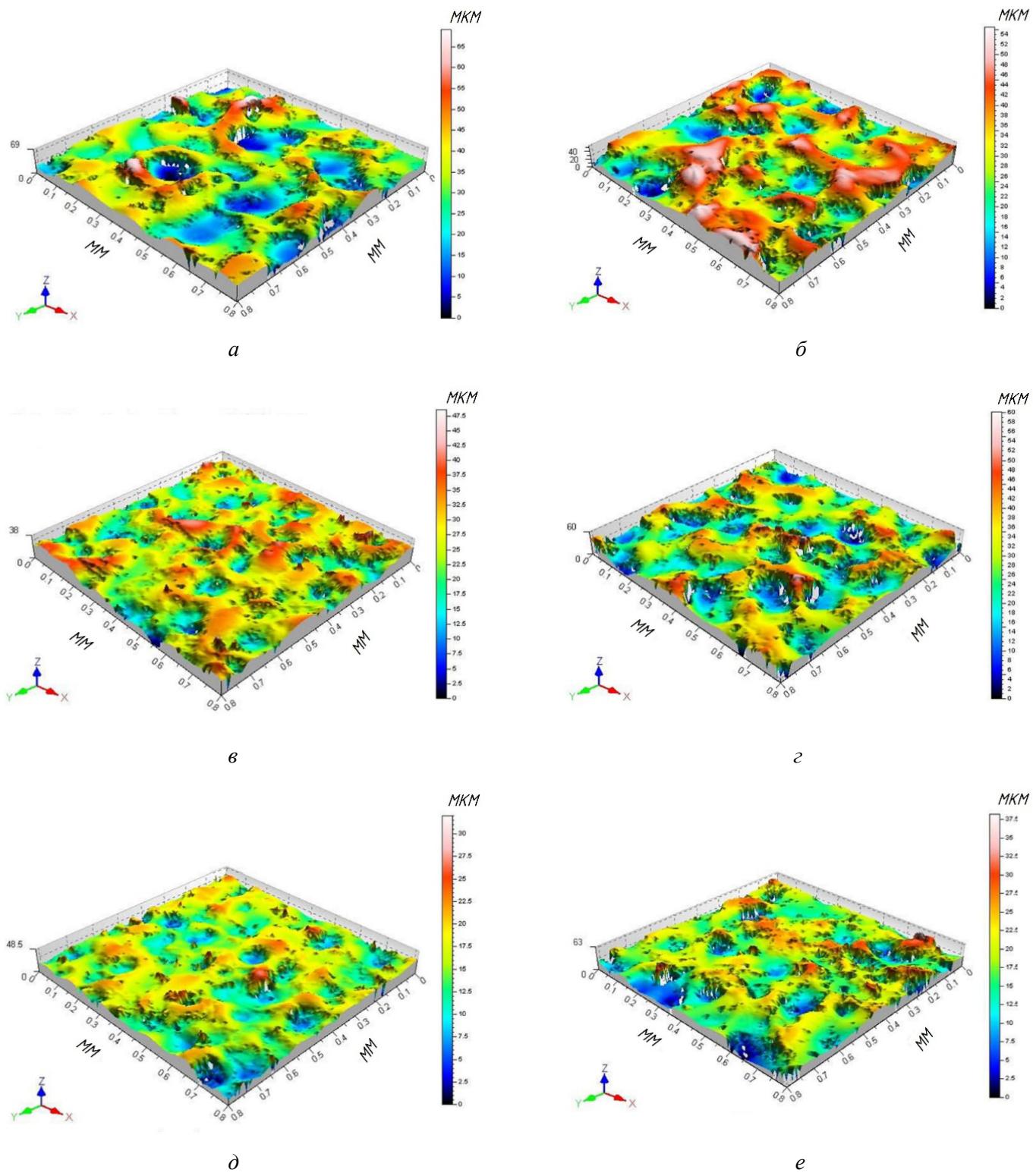


Рис. 3. Топография поверхности после КПЭЭО стали AlSi 1045 при использовании в качестве диэлектрика деионизированной воды:

а – при силе тока 9 А и времени включения импульса 100 мкс; *в* – при силе тока 3 А и времени включения импульса 100 мкс; *д* – при силе тока 6 А и времени включения импульса 100 мкс; при использовании керосина: *б* – при силе тока 6 А и времени включения импульса 100 мкс; *е* – при силе тока 9 А и времени включения импульса 100 мкс; *е* – при силе тока 3 А и времени включения импульса 100 мкс [40]

Fig. 3. Surface topography after EDM of AlSi 1045 steel using deionized water as a dielectric:

а – at a current of 9 A and a pulse on-time of 100 μ s; *в* – at a current of 3 A and a pulse on-time of 100 μ s; *д* – at a current of 6 A and a pulse on-time of 100 μ s; using kerosene: *б* – at a current of 6 A and a pulse on-time of 100 μ s; *е* – at a current of 9 A and a pulse on-time of 100 μ s; *е* – at a current of 3 A and a pulse on-time of 100 μ s [40]

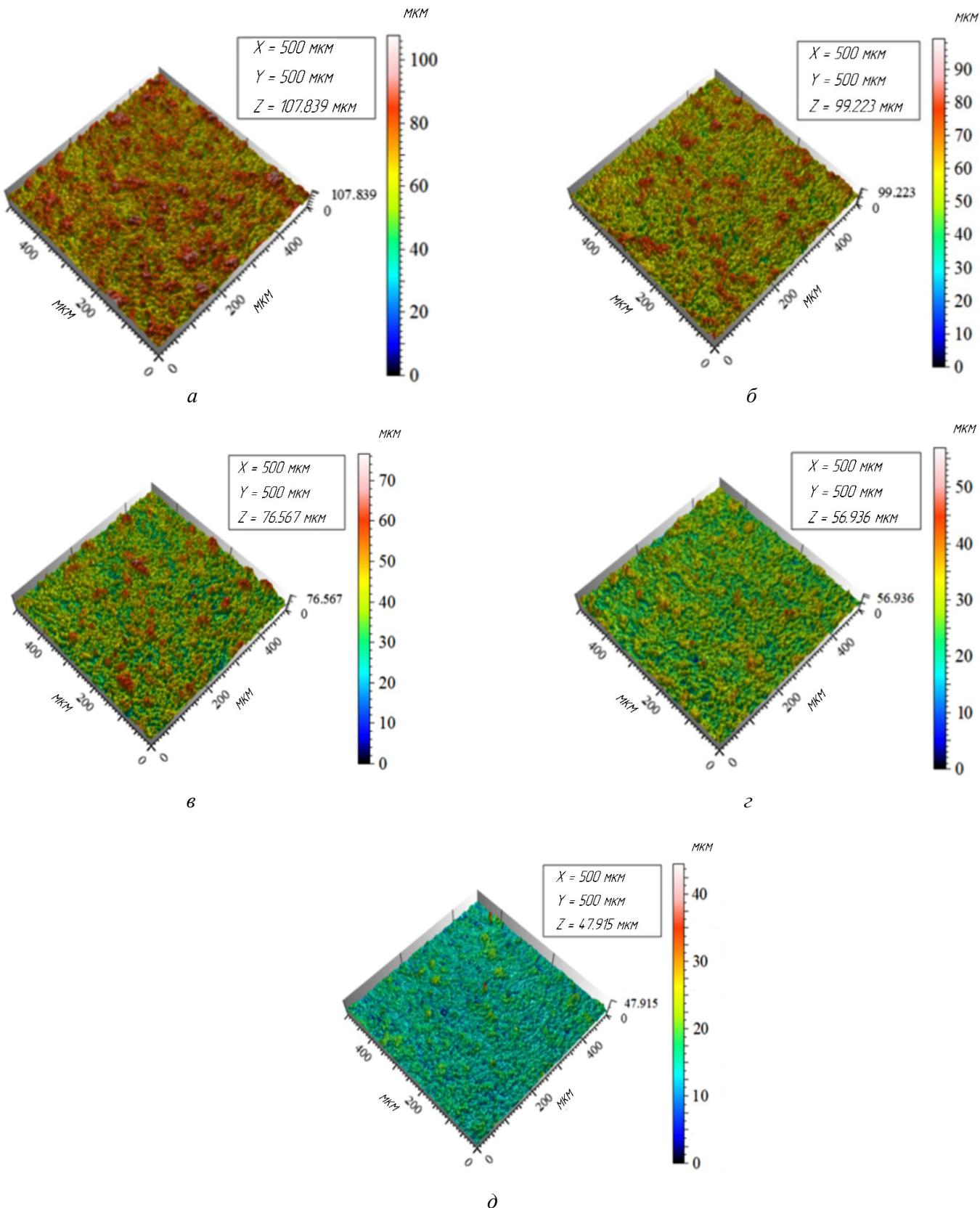


Рис. 4. Топография поверхности после ПВЭЭО инконеля 718 при использовании следующих режимов:
 $T_{on} = 12 \text{ мкс}, T_{off} = 0,5 \text{ мкс}, I = 12 \text{ A}$ (а), $T_{on} = 12 \text{ мкс}, T_{off} = 7,5 \text{ мкс}, I = 15 \text{ A}$ (б), $T_{on} = 4,5 \text{ мкс}, T_{off} = 7,5 \text{ мкс}, I = 10 \text{ A}$ (в),
 $T_{on} = 2 \text{ мкс}, T_{off} = 7,5 \text{ мкс}, I = 8 \text{ A}$ (г), $T_{on} = 0,5 \text{ мкс}, T_{off} = 16 \text{ мкс}, I = 6 \text{ A}$ (д) [41]

Fig. 4. Surface topography after WEDM of Inconel 718 using:

$T_{on} = 12 \mu\text{s}, T_{off} = 0.5 \mu\text{s}, I = 12 \text{ A}$ (a); $T_{on} = 12 \mu\text{s}, T_{off} = 7.5 \mu\text{s}, I = 15 \text{ A}$ (б), $T_{on} = 4.5 \mu\text{s}, T_{off} = 7.5 \mu\text{s}, I = 10 \text{ A}$ (в), $T_{on} = 2 \mu\text{s}, T_{off} = 7.5 \mu\text{s}, I = 8 \text{ A}$ (г), $T_{on} = 0.5 \mu\text{s}, T_{off} = 16 \mu\text{s}, I = 6 \text{ A}$ (д) [41]

са – также у графитового электрода, что связано с его высокой температурой плавления, в то время как наилучшую шероховатость при экспериментах демонстрировал алюминиевый электрод. Отмечено, что при обработке жаропрочных материалов присутствует неоднородность износа электрода-инструмента. Это связано с неоднородностью составов жаропрочных материалов и присутствием тугоплавких включений материалов (вольфрама, молибдена), которые приводят к различной эрозионной стойкости участков обрабатываемой поверхности. Участки с молибденом и вольфрамом отличаются повышенным порогом плавления и различной теплопроводностью по отношению к другим участкам. При обработке же материалов из другой группы обрабатываемости, например сталей или нержавеющих сталей, характерной особенностью является равномерный износ ЭИ и съем материала, что обусловлено однородностью участков обрабатываемого материала.

В работе [32] отмечено, что для достижения минимального расхода электрода-инструмента в процессе КПЭО требуется применять наименьший пиковый ток и наименьшую длительность воздействия импульса. В работе [43] отмечено, что основной параметр, влияющий на качество ЭЭО, – это ток, определяющий скорость удаления материала, а время действия импульса – показатель, в основном влияющий на износ электрода-инструмента. Исследования показали, что увеличение тока разряда единичного импульса приводит к возникновению более сильной искры и к расплавлению большего количества материала за единичный импульс.

В работе [39] авторы исследовали влияние включений в рабочую жидкость на производительность процесса. В качестве включений применялись графен и многослойные углеродные нанотрубки. Обращено внимание на то, что добавление углеродных частиц замедлило скорость снятия материала с заготовки на 15–17 % в среднем, что связано с повышением вязкости жидкости и ухудшением вывода шлама из зоны обработки.

Сравнение влияния среды с использованием в качестве рабочей жидкости масла и высококарбонатной жидкости приведено в работе [45]. Результаты показали, что плотность энергии разряда значительно увеличилась, что привело

к интенсификации процесса удаления материала с обрабатываемой поверхности.

Важное влияние на производительность обработки КПЭО оказывает материал электрода-инструмента. Основные материалы ЭИ представлены на рис. 5.

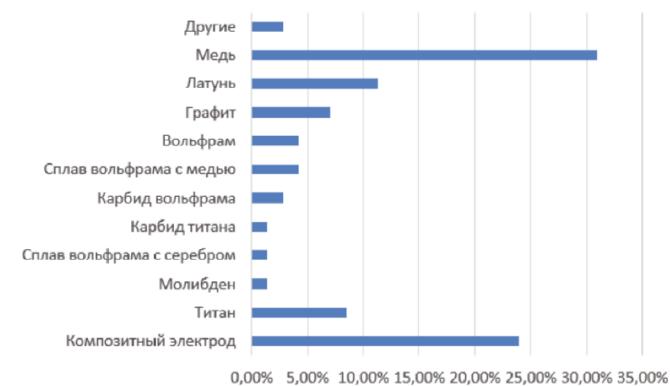


Рис. 5. Типы материалов ЭИ, применяемых при КПЭО

Fig. 5. Types of tool electrode materials used in the CPEDM process

Актуальные исследования проведены по влиянию материала ЭИ на производительность процесса в работах [46, 47]. Установлено, что медный электрод обладает более высокой скоростью съема материала (до 10,7 $\text{мм}^3/\text{мин}$) и самым низким износом ЭИ (13–14 %). Именно медные электроды применяются для чистовых проходов при обработке жаропрочных сплавов, при этом обеспечивается высокое качество получаемой поверхности с минимальным формированием поверхностных дефектов. Для медных ЭИ характерна высокая электропроводность, обеспечивающая эффективное протекание электрического тока, и отличная теплопроводность, способствующая быстрому отводу тепла от зоны обработки, особенно при наличии тугоплавких материалов в обрабатываемых участках.

Точность процесса ЭЭО

При ПВЭО жаропрочных сплавов один из главных параметров точности – межэлектродный зазор (МЭЗ). От значения МЭЗ зависит стабильность процесса ПВЭО: увеличение зазора ведет к неравномерному распределению энергии импульса, что вызывает нестабильность процесса и отклонение геометрических размеров [48].

На рис. 6 представлены результаты изучения ширины реза жаропрочных материалов [49–51].

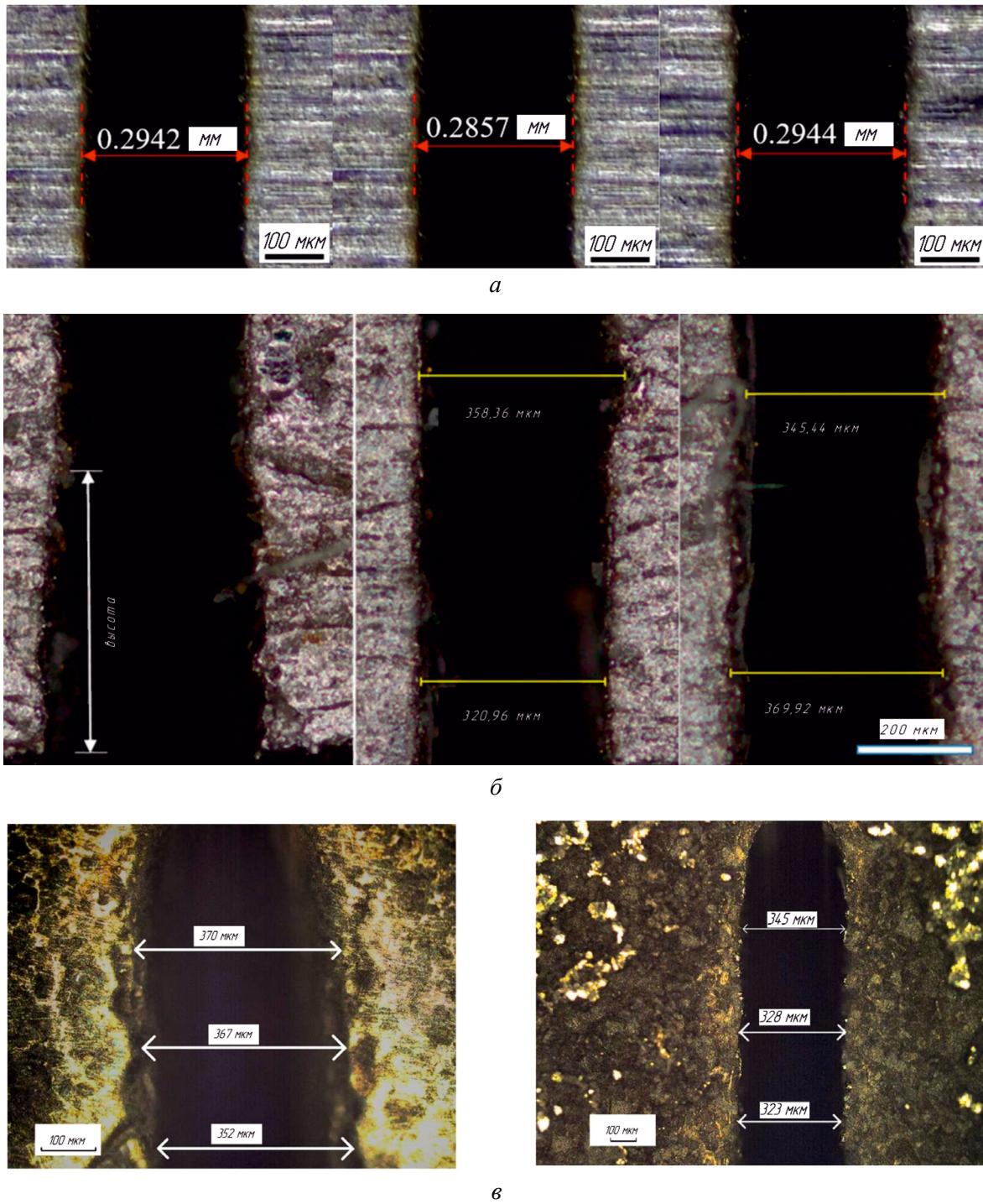


Рис. 6. Исследование ширины реза при ПВЭЭО:
 а – инконеля 718 [49]; б – инконеля 617 [50]; в – ВВ751П [51]

Fig. 6. Investigation of the cutting width in WEDM:
 а – Inconel 718 [49]; б – Inconel 617 [50]; в – VV751P [51]

Авторы работ [49–51] исследовали влияние режимов обработки – силы тока I , времени включения импульса T_{on} и времени выключения импульса T_{off} – на ширину реза и величину межэлектродного зазора при ПВЭЭО с применением в качестве электрода-инструмента проволоки диаметром 0,25 мм. Полученные эмпирические

модели позволяют сделать вывод о том, что с увеличением силы тока и времени включения импульса происходит интенсификация единичных разрядов, что приводит к более интенсивному плавлению материала. В работе [49] получена наименьшая ширина реза при наибольшей мощности обработки. Как отмечают авторы,

это связано с тем, что при большей мощности электрод-инструмент быстрее плавит металл и проходит обрабатываемый участок, тем самым передавая меньшую тепловую энергию заготовке. Полученные в работах результаты позволяют рационализировать параметры обработки и контролировать ширину реза с минимальным термическим воздействием на заготовку для минимизации поверхностных дефектов.

Проведенный сравнительный анализ результатов трех независимых исследований позволяет сделать вывод о единобразии результатов, которые при одинаковых режимах электроэрозионной обработки демонстрируют высокую степень воспроизводимости. Стабильность выходного параметра – ширины реза при обработке различных жаропрочных материалов – свидетельствует о том, что режимы обработки являются универсальными для жаропрочных материалов, и позволяет применять данные режимы для широкого спектра жаропрочных материалов.

Деформированный (белый) слой

При электроэрозионной обработке научными коллективами установлено, что в процессе удалении материала в искровом промежутке между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью часть материала вымывается рабочей жидкостью, а оставшийся расплавленный металл повторно затвердевает и закаливается в присутствии диэлектрической жидкости. Именно повторно затвердевший материал формирует белый измененный слой. Белый слой представляет собой мелкозернистую твердую и хрупкую структуру из-за локального термического воздействия. Поскольку скорость охлаждения от верхней поверхности к внутренним слоям исходного материала увеличивается, то мартенситы направляются перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Остаточные напряжения, возникающие из-за особенности процесса, приводят к образованию пустот и микротрещин, которые влияют на функциональные характеристики изделия. Белый слой необходимо минимизировать при подборе режимов и других технологических параметров из-за наличия пустот, выбоин и формирования поверхностных микротрещин, которые могут распространяться вглубь основного материала. Для каждого материала существуют свои особенности формирования

белого слоя, связанные с эксплуатационными характеристиками и химическим составом материала [52, 53].

Отмечено малое количество исследований научных коллективов, посвященных вопросам возникновения и влияния измененного (белого) слоя при обработке жаропрочных сплавов, что связано со сложностью изучения и получения качественных образцов для исследования из-за возникновения слоя в результате сложно прогнозируемых термических процессов. Авторы [32, 54] также отмечают, что на формирование белого дефектного слоя на поверхности жаропрочных сплавов влияет множество факторов – режим обработки, материал заготовки и параметры рабочей жидкости, что усложняет процесс исследования. Авторы работ отмечают, что при формировании белого слоя после обработки жаропрочного материала характерны более интенсивное образование деформированного слоя из-за высокой термостойкости материала и большая глубина залегания слоя, чем при обработке иных групп обрабатываемости материалов (сталь или нержавеющая сталь). Неравномерное распределение белого слоя обусловлено комплексной природой жаропрочных материалов, характеризующихся неоднородностью как химического состава, так и структурных компонентов.

В статье [55] авторами установлено, что на величину белого дефектного слоя при ПВЭО влияют параметры обработки, а именно сила тока при постоянном напряжении и времени действия импульса. Отмечено, что при минимальных режимах величина белого слоя стабильна и не прерывиста, что важно при постобработке и эксплуатации изделий. В работе [54] авторы обратили внимание на влияние не только скважности импульсов, но и их полярности на стабильность образуемого деформированного слоя. Отмечено, что при применении прямой полярности измененный дефектный слой более стабильный и обрабатываемая поверхность имеет гладкую и ровную структуру в отличие от обратной полярности, для которой характерны трещины и кратеры на обработанной поверхности.

На рис. 7 представлены результаты исследований авторов [56–59] измененного слоя при ПВЭО различных жаропрочных материалов.

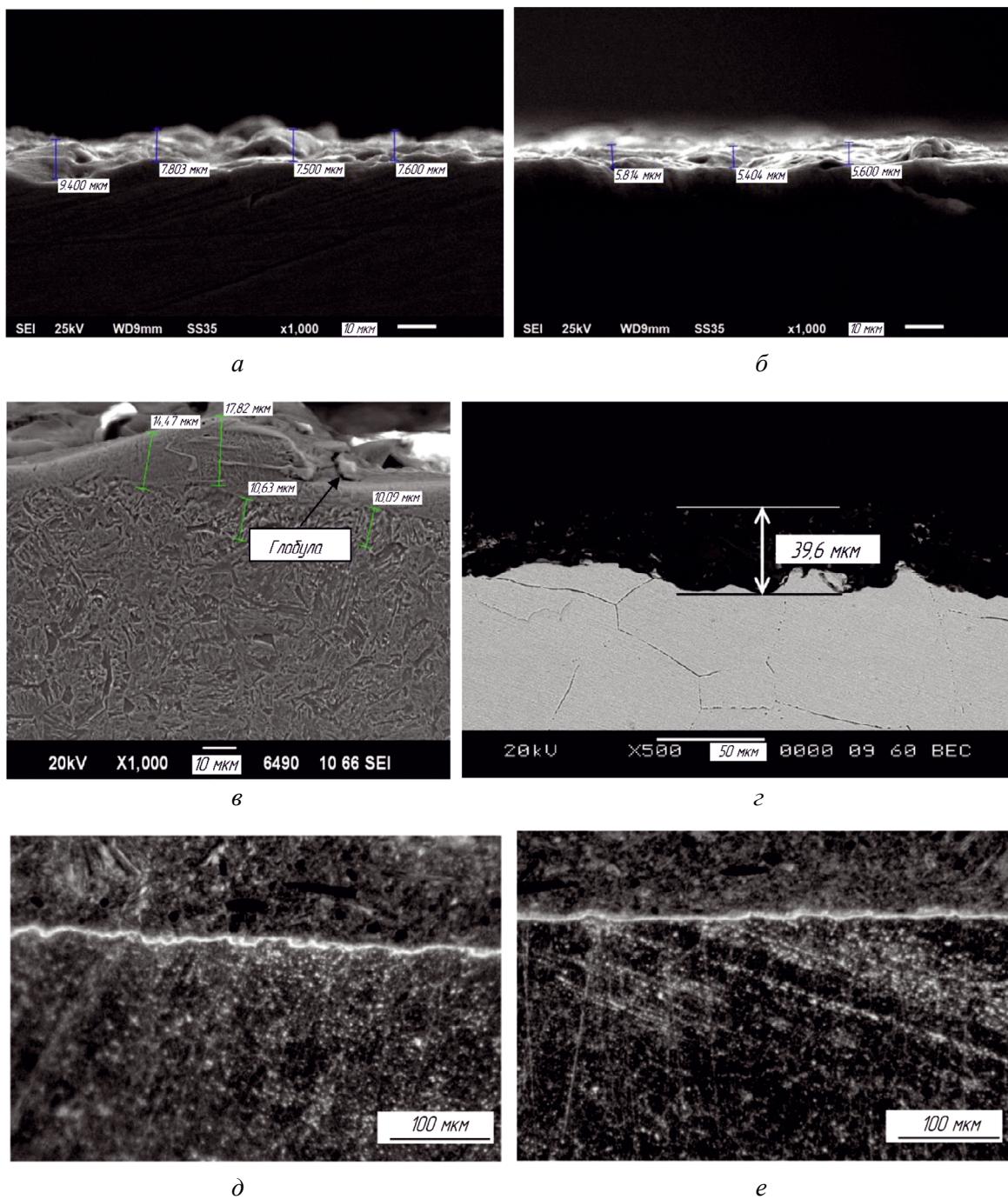


Рис. 7. Изменений (белый) слой на различных материалах:

a – Monel 400 (сплав на основе никеля и меди) [57]; *б* – Monel 400 с добавлением в рабочую жидкость алюминиевого порошка [57]; *в* – высокопрочная низколегированная сталь [56]; *г* – инконель 706 [58]; *д, е* – ВВ751П на минимальном и максимальном режиме соответственно [59]

Fig. 7. Modifications of the (white) layer on different materials:

a – Monel 400 (a nickel-copper alloy) [57]; *б* – Monel 400 with aluminum powder added to the working fluid [57]; *в* – high-strength low-alloy steel [56]; *г* – Inconel 706 [58]; *д* – VV751P at minimum mode [59]; *е* – VV751P at maximum mode [59]

Авторы работы [56] провели факторный эксперимент с исследованием белого измененного слоя и установили (рис. 7, *в*), что в пределах одного режима при времени включения импульса 96 мкс толщина слоя формируется неравно-

мерно и составляет 14...17 мкм, что связано с неустойчивыми условиями межэлектродного зазора и нестабильностью тока, и предположили, что данный слой формируется остатком расплавленного материала, который не был удален

в процессе обработки из зоны МЭЗ. В статье [57] проведено исследование влияния добавления в рабочую жидкость (РЖ) алюминиевого порошка на формирование белого дефектного слоя. Установлено, что толщина белого слоя с применением дистиллированной воды составляет от 7 до 9 мкм (рис. 7, *a*), а добавление алюминиевого порошка в РЖ оказало положительное влияние на результат и способствовало уменьшению величины слоя до 5 мкм.

В работе [58] установлено, что при ПВЭЭО материала толщина измененного слоя составила 39,6 мкм (рис. 7, *г*), что связано с большой энергией единичных импульсов на выбранном режиме. Большая толщина измененного слоя приводит к созданию многочисленных микропустот и микротрещин и характеризуется меньшей твердостью из-за термического изменения данного слоя. В статье [59] были проведены исследования влияния режимов ПВЭЭО, а именно силы тока и времени включения импульса, на формирование измененного слоя. Установлено, что величина дефектного слоя была постоянна и составляла около 10 мкм на всем участке (рис. 7, *д*, *е*). В работах [58, 59] были изучены остаточные напряжения в измененном слое. Установлено, что при обработке материала инконель 706 появляются растягивающие напряжения, так же как и при обработке материала ВВ751П. Остаточные напряжения возникают из-за значительного термического локального воздействия и приводят к снижению твердости поверхностного слоя. Связь остаточных напряжений растяжения с микротвердостью приведена в работе [60].

В работе [39] авторы исследовали влияние включений в рабочую жидкость на формирование белого слоя. В качестве включений применялись графен и многослойные углеродные нанотрубки. Авторами установлено, что с использованием графена при обработке инконеля 825 толщина измененного слоя составила 21,5 мкм, а при использовании графеновых нанотрубок – 29,5 мкм, что отличается от обычной обработки, при которой толщина составляет 42,21 мкм.

Разница в формировании белого слоя может быть связана с увеличением скорости передачи тепловой энергии в результате улучшения диэлектрической среды. Именно наличие углерод-

ного проводящего порошка в диэлектрической среде действует в качестве дополнительного канала разрядки для рассеивания тепла.

В работе [40] авторами проведено исследование влияния рабочей жидкости на формирование белого слоя. В качестве используемого диэлектрика наиболее эффективна деионизированная вода, это обусловлено ее более низкой вязкостью и плотностью, что благоприятно влияет на многократную разрядку в межэлектродном зазоре и уменьшению измененного дефектного слоя (рис. 8). Наиболее заметно это при применении максимального режима (при силе тока 9 А) в деионизированной воде, в этом случае толщина измененного слоя составила 16 мкм, а в керосине – 18 мкм. Более гладкая структура измененного слоя, не содержащая резких переходов различных фаз, отмечена также в деионизированной воде, а в керосине наблюдаются отдельные участки неравномерного распределения дефектного слоя. В качестве вывода отметим, что хоть керосиновый диэлектрик и является довольно распространенным коммерческим диэлектриком, но применение деионизированной воды благоприятно влияет на качество поверхности.

В работе [61] авторы провели экспериментальные исследования для анализа роли теплопроводности материала заготовки в процессе электроэррозионной обработки. В качестве заготовок использовались алюминий, латунь и инконель 617. При одинаковых режимах обработки на алюминии сформировался сравнительно более толстый белый слой (16...17,4 мкм), чем на латуни (6,4...8,5 мкм), а на инконеле 617 – самый тонкий измененный слой (1,5...2,1 мкм), поскольку материалы с более низкой теплопроводностью с трудом отводят тепло, выделяющееся при электроэррозионной обработке. Это вызывает локальное повышение температуры, что, в свою очередь, приводит к образованию более тонких слоев, поскольку тепло концентрируется на меньшей площади.

Качество поверхности – трещины, впадины

В работе [43] отмечено, что увеличение тока разряда единичного импульса приводит к интенсификации образования трещин на поверхности образцов и увеличению толщины белого слоя.

Современный перспективный метод, позволяющий улучшить качество поверхности

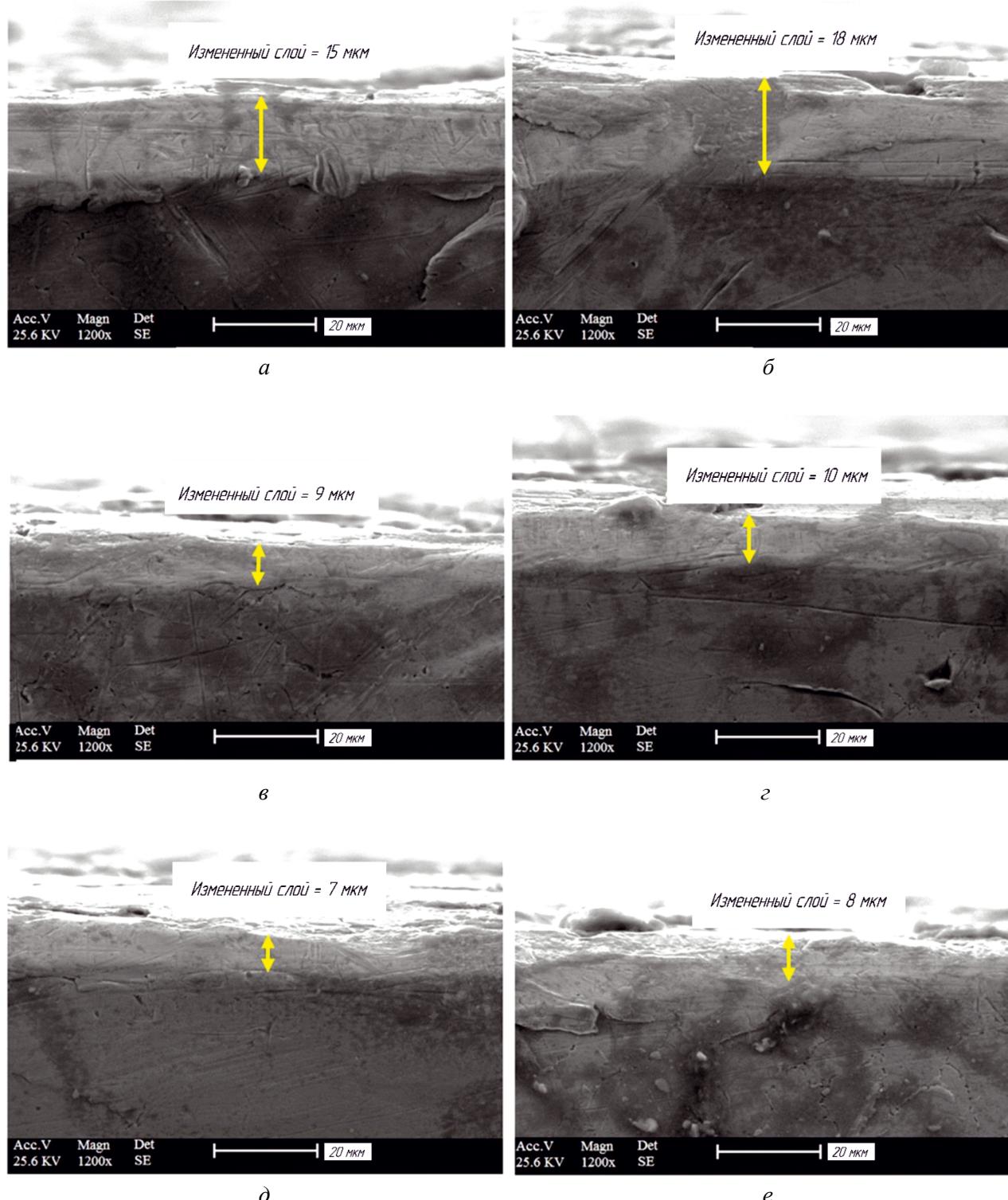


Рис. 8. Измененный слой после КПЭО стали AlSi 1045 при использовании в качестве диэлектрика дейонизированной воды:

а – при силе тока 9 А и времени включения импульса 100 мкс; б – при силе тока 6 А и времени включения импульса 100 мкс; в – при силе тока 3 А и времени включения импульса 100 мкс; при использовании воздуха: г – при силе тока 9 А и времени включения импульса 100 мкс; д – при силе тока 6 А и времени включения импульса 100 мкс; е – при силе тока 3 А и времени включения импульса 100 мкс [40]

Fig. 8. Modified layer after EDM of AlSi 1045 steel using deionized water as a dielectric:

а – at a current of 9 A and a pulse on-time of 100 μ s; б – at a current of 6 A and a pulse on-time of 100 μ s; в – at a current of 3 A and a pulse on-time of 100 μ s; using air: г – at a current of 9 A and a pulse on-time of 100 μ s; д – at a current of 6 A and a pulse on-time of 100 μ s; е – at a current of 3 A and a pulse on-time of 100 μ s [40]

и значительно увеличить производительность процесса электроэрозионной обработки, – порошковая электроэрозионная обработка (ПЭЭО). Суть данной технологии заключается в том, что в рабочую жидкость добавляют мелкодисперсные включения (металлические порошки, аллотропные модификации углерода). Мелкодисперсные частицы, смешанные с жидкостью, образуют цепочку проводников в жидкости, тем самым увеличивая энергию электрического пробоя. Увеличение энергии приводит к повышению скорости удаления материала с поверхности электрода-детали (ЭД). Авторы работ [62, 63] установили, что при подаче соответствующего напряжения создается электрическое поле, которое заставляет частицы порошка приобретать положительные и отрицательные заряды. Эти заряженные гранулы движутся быстро и зигзагообразно, что увеличивает разность напряжений между электродами. Именно большая разность между электродами, влияющая на напряженность поля, формирует величину межэлектродного пробоя. При достижении критического значения напряженности на участке с минимальным расстоянием между электродами возникает электрический разряд, который приводит к разрушению материала заготовки.

Авторы работы [64] сообщили о влиянии добавления порошков алюминия, хрома и меди в диэлектрическую жидкость на эффективность удаления материала и скорость износа инструмента во время электроэрозионной обработки. Авторы пришли к выводу, что концентрация частиц, их размер, плотность частиц, электрическое сопротивление и теплопроводность порошков играют важную роль в повышении эффективности электроэрозионной обработки. Правильный выбор порошков (в нужном количестве) приводит к повышению скорости удаления материала и снижению износа инструмента. По результатам исследований авторы пришли к выводу, что порошок с малым размером частиц может повысить эффективность удаления материала, а также качество поверхности. Однако при малом размере частиц был обнаружен сравнительно толстый белый слой, в то время как толщина белого слоя уменьшалась с увеличением размера частиц. Дополнительно применяли электроэрозионную обработку, смешанную с порошком кремния, варьируя концентрацию

порошка и скорость промывки. Был сделан вывод, что использование диэлектрика, смешанного с порошком кремния, может значительно улучшить морфологию поверхности с точки зрения уменьшения размеров кратеров, получения тонкого белого слоя и превосходной отделки поверхности. Авторы также утверждают, что концентрация порошка и скорость промывки должны быть тщательно подобраны для повышения эффективности полировки. Это связано с тем, что реологические свойства рабочей жидкости существенно влияют на эффективность промывки при электроэрозионной обработке. Различные типы частиц по-разному воздействуют на вязкость жидкости, что определяет оптимальные параметры промывки.

Например, порошок вольфрама, смешанный с диэлектрической жидкостью, обеспечивает повышенную скорость удаления материала и снижает износ электрода-инструмента [65]. Порошок карбида кремния, смешанный с диэлектрической жидкостью, улучшает шероховатость поверхности [66] и увеличивает толщину белого слоя [67]. Авторами работы [68] проведено исследование по включению в рабочую жидкость порошка кремния и хрома. Результаты свидетельствуют о значительном улучшении скорости удаления материала и уменьшении скорости износа электрода-инструмента. Хром обладает высокой износостойкостью к истиранию, что обеспечивает высокое качество обработки поверхности. Хром также обладает стойкостью к высоким температурам, что делает его идеальным выбором в качестве включения в рабочую жидкость. Порошок хрома, смешанный с диэлектрической жидкостью, улучшает скорость удаления материала с ЭД, уменьшает износ инструмента и коэффициент износа электродов.

В работе [57] авторы отмечают положительное влияние включения алюминиевого порошка на морфологию поверхности, получив с добавлением алюминиевого порошка более гладкую текстуру поверхностного слоя с меньшим количеством кратеров и трещин. Трещины образуются из-за кавитационных ударов, возникающих при схлопывании парогазового слоя, из-за высоких термических перепадов (в месте обработки температура достигает 10 000 °C, в то время как температура рабочей жидкости 20 °C) [43–45].

В работе [39] авторы исследовали влияние включений в рабочую жидкость на качество поверхности. В качестве включений применялись графен и многослойные углеродные нанотрубки. Отмечено, что присутствие данных материалов в рабочей жидкости уменьшает возникновение трещин в процессе обработки на 20–25 %.

Так, например, в работе [57] авторы приводят объяснение снижения плотности трещин при добавлении углеродных наночастиц в диэлектрическую жидкость. Согласно исследованиям, микрокремний, содержащий углеродные нанопорошки, улучшает теплопроводность диэлектрической среды, что повышает скорость теплопередачи в диэлектрической среде и отвод тепла из зоны МЭЗ. В результате установлено, что улучшенная скорость теплопередачи снижает плотность энергии в канале единичного разряда, тем самым уменьшая концентрацию трещин на поверхности образцов. На основе данного анализа очевидно, что применение токопроводящих наночастиц перспективно и требует дополнительного внимания научных коллективов.

Особенности обработанной поверхности были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии в работе [69]. Установлено, что образцы, обработанные с добавлением в жидкость порошка титана, имеют меньшее количество трещин, впадин и микроотверстий, а также осажденных материалов из рабочей жидкости и ЭИ по сравнению с образцом, который обрабатывался в среде с добавлением порошка графита, но в данной работе не проведено исследование по сравнению с масляной средой. Высококарбонатная жидкость признана наиболее подходящей для формирования диэлектрической среды для высоких энергий единичных разрядов. Однако обнаружено, что концентрация дефектов – трещин и микроотверстий – увеличилась с ростом значения разрядов. Толщина измененного слоя также увеличилась с повышением вязкости среды из-за плохого удаления материала из зоны межэлектродного зазора, что приводило к повторному затвердеванию материала в зоне обработки.

В работе [70] проведено исследование по влиянию включений Al_2O_3 в рабочую жидкость при КПЭО сплава инконель 825. Выполнено сравнение поверхности после обработки в рабочей жидкости с включениями и обработки

в чистой рабочей жидкости. Авторы отмечают, что при стандартной обработке на поверхности сконцентрировано множество микроотверстий, микротрещин и наплывов, которые возникают из-за неверного осаждения материала из рабочей жидкости. В то время как при обработке с добавлением в рабочую жидкость Al_2O_3 указанные дефекты отсутствуют.

В работе [40] авторы провели исследование влияния времени включения импульса и вида рабочей жидкости на формирование трещин в процессе обработки. Отмечено, что с увеличением длительности импульсов происходит интенсификация образования микротрещин. Связано это с тем, что при большем времени воздействия импульса вводимая энергия в зоне единичных разрядов увеличивается, что повышает температуру в локальных точках и температурный градиент на обрабатываемой поверхности, увеличивая плотность трещин. При использовании керосина в качестве рабочей жидкости отмечено большее количество трещин на поверхности. Из-за многоразрядности в деионизированной воде генерируется меньшая мощность искры и энергия разряда. Соответственно меньшая интенсивность искры и более низкий температурный градиент воздействия на обрабатываемую поверхность приводят к более низкой вероятности появления микротрещин при обработке с использованием деионизированной воды. Другой причиной образования большего количества трещин на обработанной поверхности в керосине является различие в теплопроводностях двух видов диэлектриков, что изменяет скорость охлаждения в зоне разряда. Высокая скорость охлаждения деионизированной воды эффективно рассеивает тепло от расплавленного материала и ограничивает образование микротрещин. Более того, в процессе КПЭО с керосином в качестве диэлектрика из-за карбонизации углеродные остатки прилипают к поверхности электрода, что в конечном итоге приводит к образованию карбида на поверхности заготовки. Это состояние вызывает нестабильную обработку в зоне разряда, что сопровождается более высоким импульсным усилием и приводит к большей тенденции распространения трещин при обработке с керосином (рис. 9).

В работе [71] авторы провели комплексное исследование влияния режимов обработки

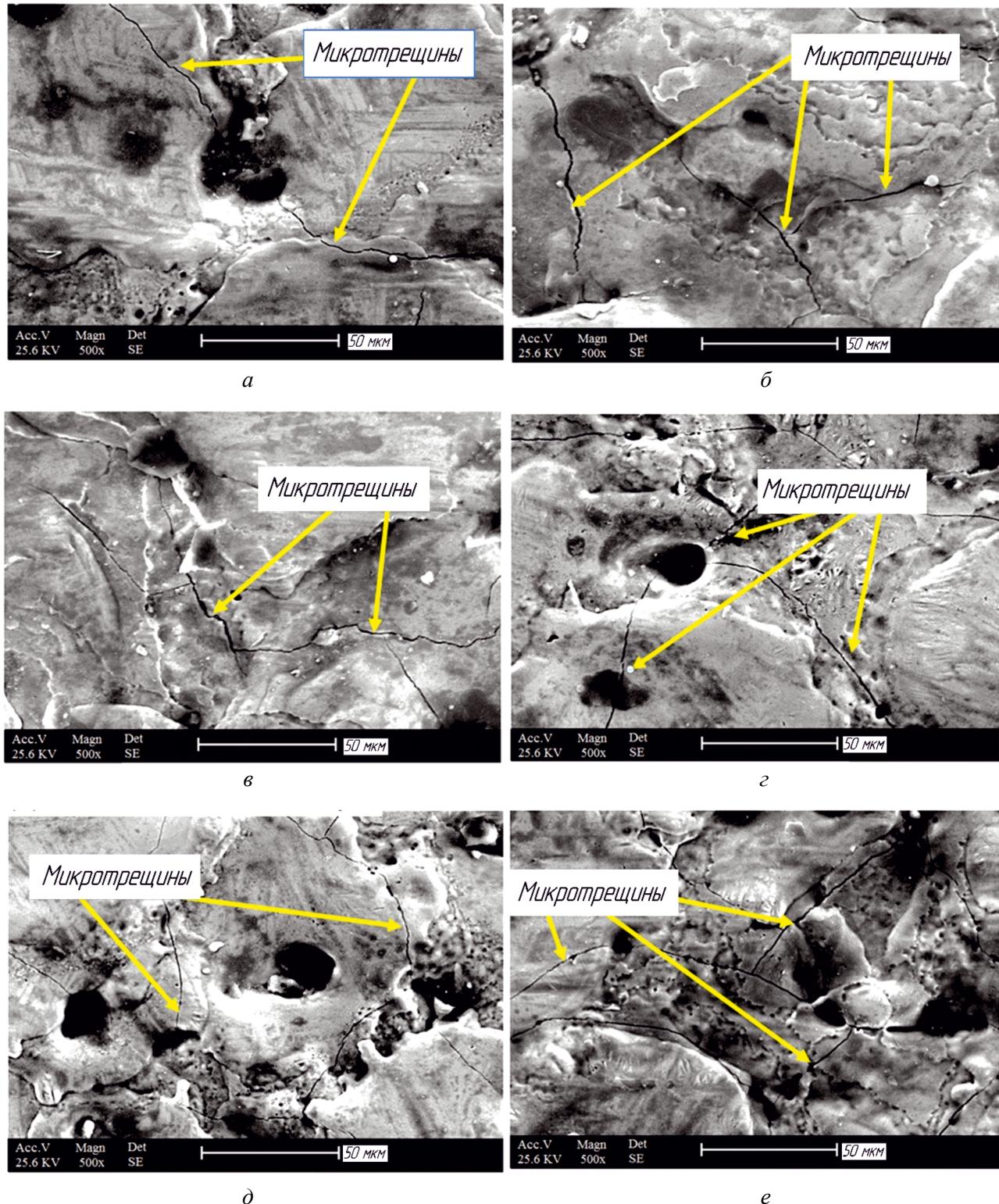


Рис. 9. Поверхность после КПЭО стали AlSi 1045 при использовании в качестве диэлектрика деионизированной воды:

a – при силе тока 6 А и времени включения импульса 150 мкс; *в* – при силе тока 6 А и времени включения импульса 100 мкс; *д* – при силе тока 6 А и времени включения импульса 50 мкс; при использовании керосина: *б* – при силе тока 6 А и времени включения импульса 150 мкс; *г* – при силе тока 6 А и времени включения импульса 100 мкс, *е* – при силе тока 6 А и времени включения импульса 50 мкс [40]

Fig. 9. The surface after EDM of AlSi 1045 steel using deionized water as a dielectric:

a – at a current of 6 A and a pulse on-time of 150 μs; *в* – at a current of 6 A and a pulse on-time of 100 μs; *д* – at a current of 6 A and a pulse on-time of 50 μs; using kerosene: *б* – at a current of 6 A and a pulse on-time of 150 μs; *г* – at a current of 6 A and a pulse on-time of 100 μs; *е* – at a current of 6 A and a pulse on-time of 50 μs [40]

с добавлением в рабочую жидкость углеродных нанотрубок на процесс формирования трещин при обработке сплава инконель 718. Обработка проводилась при силе тока от 2 до 8 А. Установлено, что с увеличением пикового тока до 6 А плотность поверхностных трещин имеет тенденцию к увеличению. Однако при силе тока от 6 до 8 А плотность трещин на обработанной поверхности резко снизилась. Такое явление может быть связано с тем, что увеличивающийся пиковый ток удаляет выступающие частицы материала с обрабатываемой поверхности, но с возрастанием силы тока происходит увеличение разрядов единичных импульсов и снимается больший объем материала, что в свою очередь снижает эффективность промывки диэлектрической жидкостью в межэлектродном зазоре. С прекращением разрядов, когда ЭИ поднимается для очистки межэлектродного зазора, из-за большой разницы температур происходит затвердевание частиц, которые остались на поверхности, с образованием вторичного слоя, после чего процесс обработки повторяется и расплавленный материал закрывает эти поры и трещины. Таким образом, затрудняется оценка и видимость наличия поверхностных трещин.

Большинство исследований направлено на изучение обработанной поверхности с добавлением включений, но не в полной мере изучен вопрос влияния добавляемого порошка на свойства рабочей среды и о связи между изменением диэлектрических свойств из-за добавления порошка, на что акцентируют внимание авторы исследования [72]. Они провели сравнение по добавлению в рабочую жидкость проводящего микропорошка (графита) и непроводящего микропорошка (оксида алюминия). Значения напряжения пробоя диэлектрика, измеренные для керосина, смеси керосина с графитовым порошком и смеси керосина с порошком оксида алюминия, составили 1521,74, 26 и 1652,17 В соответственно. Установлено, что напряжение пробоя диэлектрика минимально при наличии в нем графитового порошка и максимально при наличии порошка оксида алюминия. Это может быть связано с тем, что графитовые порошки обладают электропроводностью. Следовательно, при добавлении графитового порошка в диэлектрик снижается его изолирующая способность, а значит, и напряжение пробоя диэлектрика. По-

скольку порошок оксида алюминия не обладает электропроводностью, то при добавлении его в диэлектрик напряжение пробоя диэлектрика увеличивается еще больше, чем в незагрязненном состоянии диэлектрика. Выявлено, что выбор типа порошковых добавок требует тщательного подхода, учитывая не только их влияние на обработанную поверхность, но и воздействие на диэлектрические свойства рабочей среды.

Включения после процесса в поверхностном слое

Одним из сложно прогнозируемых параметров является легирование поверхности жаропрочных сплавов частицами электрода-инструмента. Это связано с тем, что крайне сложно разработать математическую модель, описывающую процессы, которые происходят на поверхности обработки, и учитывающую массоперенос продуктов эрозии. В настоящее время отсутствует единая термодинамическая модель процесса, как отсутствуют и фундаментальные исследования процессов формирования поверхностных модифицированных слоев. Микроструктурные изменения обработанной поверхности жаропрочных материалов после ЭЭО представлены остатками электроэррозионного шлама, частицами материала электрода-инструмента, продуктами эрозии и закрытыми порами с рабочей жидкостью. Механические характеристики обработанной поверхности существенно зависят от характера и количества включений. Наличие включений в поверхностном слое снижает усталостную прочность изделия. В статье [58] авторы также провели исследование измененного слоя после ПВЭЭО на наличие включений и выявили присутствие в поверхностном слое таких включений, как кислород (12,96 %), что подтверждает образование оксидной пленки на поверхности обработки, и наличие меди и цинка на поверхности слоя (рис. 10).

В работе [73] авторы установили, что в зоне термического влияния происходит изменение химического состава относительно основного материала – снижение содержания никеля на 9 %, уменьшение концентрации кобальта и алюминия на 1 % и появление сторонних элементов, не относящихся к изначальному химическому составу, – натрия 9 %, хлора 4 % и калия около 1 %. При анализе точки, которая расположена

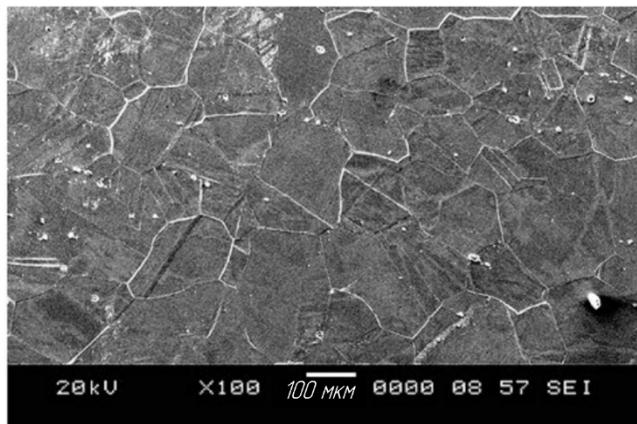


Рис. 10. Включения в поверхностном слое после ПВЭЭО инконеля 706 [44]

Fig. 10. Inclusions in the surface layer after WEDM of Inconel 706 [44]

на белом слое, установлены более значительные изменения основного состава, содержащегося в данном сплаве, – снижение содержания никеля до 50 %, уменьшение содержания хрома на 9 % и алюминия на 3 %. Установлено полное удаление с поверхностного слоя кобальта, молибдена, вольфрама и ванадия. Для данного слоя также характерно появление хлора до 47 % и натрия до 31 %, что объясняется применением в качестве рабочей жидкости дистиллированной воды. Изменение концентрации легирующих элементов связано с высокой температурой обработки и их растворимостью в жидкой фазе, процессами их перемещения в кристаллизующемся материале и направленной кристаллизацией белого слоя, ускоряющей термодиффузию элементов.

В работе [74] авторы провели исследование влияния режима на включения в поверхностный слой и изменение химического состава (рис. 11).

Эксперименты были проведены на грубой обработке, чистовой обработке, шлифовании и шлифовании с травлением. Установлено, что на поверхности после грубой ПВЭЭО отмечено наличие кислорода из-за окисления различных легирующих элементов, а чистовая обработка способствовала небольшому уменьшению (на 10–12 %) кислорода на поверхности заготовки. В поверхностном слое присутствовали элементы цинк и медь, которые диффундировали из ЭИ в процессе обработки. Поверхность, полученная с помощью многопроходной резки, показывает улучшение в процентном соотношении изнальных элементов сплава.

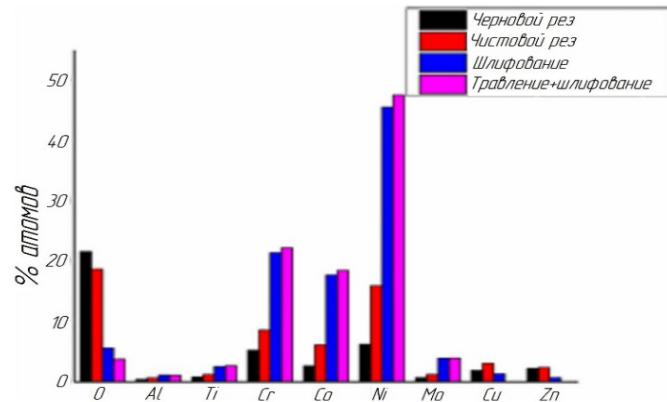


Рис. 11. Включения в поверхностном слое после ПВЭЭО материала нимоник C263

Fig. 11. Inclusions in the surface layer after WEDM of Nimonik C263 material

Влияние конфигурации и материала ЭИ

Научные исследования эффективности процесса КПЭЭО в меньшей степени затрагивают влияние промывки в МЭЗ. Авторы отмечают влияние промывки в МЭЗ на повышение производительности процесса и качества поверхности. В работах [75, 76] авторы создали ЭИ с внутренними каналами для более эффективного вывода шлама из зоны обработки и повышения эффективности охлаждения электродо-инструмента, что способствовало увеличению производительности процесса на 40–45 %.

В работе [77] авторы провели сравнение исследования сплошного электрода-инструмента и пористого электрода (рис. 12).

Применение полого пористого электрода привело к увеличению эффективности обработки в три раза по сравнению со сплошным электродом. Время обработки было сокращено на 47 %, что связано с лучшим охлаждением электрода-инструмента и более эффективным потоком рабочей жидкости.

В работе [78, 79] авторы изготовили электроды-инструменты с использованием армирующей матрицы из графена. Уникальные свойства графена (высокая электропроводность и теплопроводность, превосходящие медь) делают его перспективным материалом для применения в качестве электрода-инструмента при ЭЭО, но в связи с дороговизной материала целесообразно использовать его в качестве армирующей матрицы или определенных включений при изготовлении ЭИ. Авторами установлено, что применение

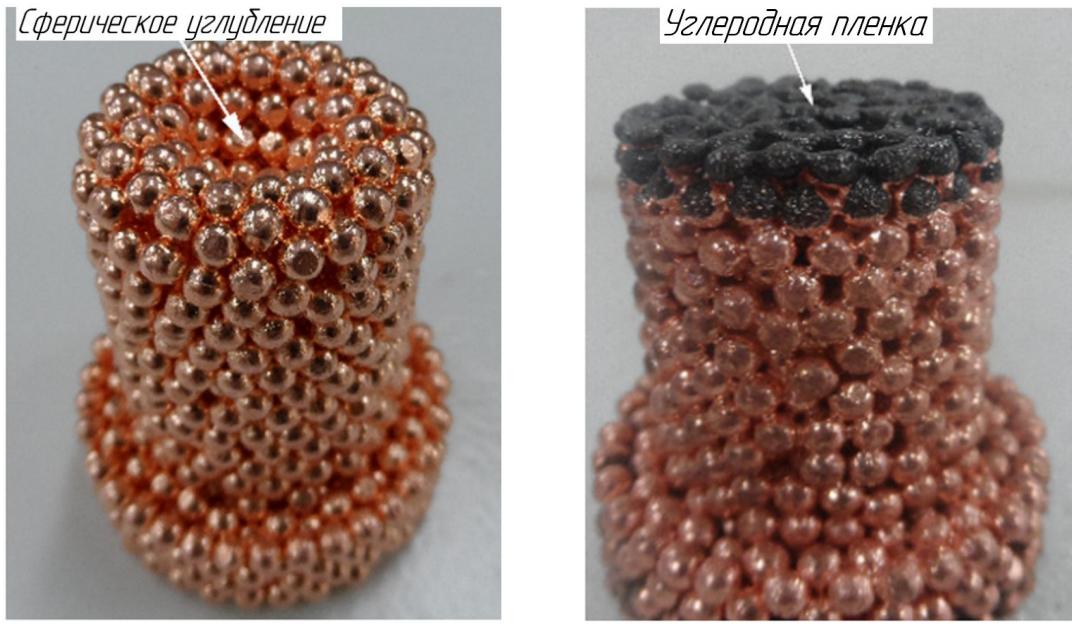


Рис. 12. Медный ЭИ, применяемый при КПЭЭО:

а – до обработки; *б* – после обработки [53]

Fig. 12. Copper electrode tool used in CPEDM:

a – before processing; *b* – after processing [53]

композитных ЭИ позволило снизить расход ЭИ в процессе обработки, что связано с более высоким рассеиванием тепла в зоне обработки и со снижением температуры ЭИ, испытываемой в процессе обработки. Использование данных матриц позволяет значительно увеличить срок службы ЭИ.

В работе [80] авторы провели исследования по применению спирального электрода-инструмента. Особое внимание акцентировано на удалении шлама из зоны обработки и подаче рабочей жидкости в зону обработки при обработке инконеля 718. В качестве электродов использовались цилиндрический и спиральный ЭИ (рис. 13), которые в процессе обработки вращались с одинаковой скоростью.

Эффективность спирального электрода при ЭЭО превосходит эффективность традиционных цилиндрических электродов из-за разницы в осевой скорости. С увеличением скорости вращения максимальная осевая скорость спирального электрода возрастает, значительно повышая циркуляцию рабочей жидкости в зоне обработки. Спиральный ЭИ также имеет более низкий коэффициент расхода материала, чем цилиндрический, что положительно сказывается на эффективности применения данных электродов.

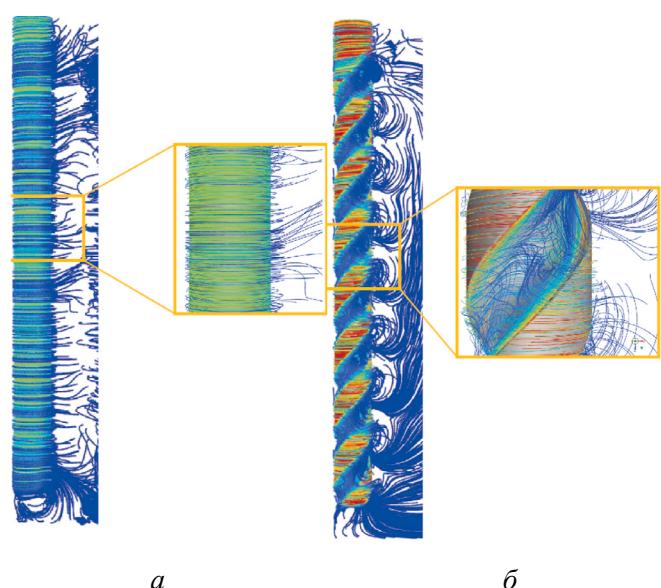


Рис. 13. Контур осевой скорости ЭИ:

а – цилиндрического; *б* – спирального [80]

Fig. 13. Axial velocity contours of cylindrical (*a*) and spiral (*b*) electrode tools [80]

На боковой стенке прорези шероховатость поверхности заготовки, обработанной спиральным электродом, составляет всего 11 мкм, что лучше, чем 28 мкм в случае цилиндрического электрода. Спиральный электрод демонстрирует превосходство над традиционным цилиндриче-

ским электродом в стабильности разряда, сроке службы электрода, контроле прорезей и качестве поверхности.

При одинаковых режимах обработки толщина белого слоя была уменьшена с 107,82 до 44,37 мкм для спирального электрода по сравнению с обработкой цилиндрическим электродом, при этом в некоторых областях белый слой отсутствовал.

Анализ показывает, что спиральный электрод обладает существенными преимуществами в системе удаления шлама по сравнению с цилиндрическим. Это обусловлено его конструктивными особенностями, которые обеспечивают более эффективное перемещение и удаление частиц шлама из зоны обработки. Спиральная геометрия электрода создает уникальные условия: формирование вихревых потоков рабочей жидкости, улучшенную циркуляцию рабочей жидкости в зоне обработки, оптимизированную и упорядоченную траекторию вывода частичек шлама и предотвращение застойных зон, служащих вторичными зонами переплава.

В работах [81–83] проводились исследования микроэлектроэррозионного сверления тремя разными электродами – твердым электродом из карбида вольфрама (цилиндр), сверлом с твердосплавным наконечником и латунным ЭИ. После анализа результатов авторы установили, что с применением цилиндрического электрода на выходе из сквозного отверстия получился конус в связи с проблемой вывода шлама из зоны обработки при электроэррозионном сверлении. Геометрия твердосплавного сверла позволила улучшить удаление шлама из межэлектродного зазора, стабилизировать температуру в зоне обработки и сократить время обработки. Выбор материала инструмента существенно влияет на производительность электроэррозионной обработки – например, латунь обеспечивает наиболее точные микроотверстия (наименьший износ, перерез и конусность) за счет увеличения времени обработки. Карбид вольфрама обеспечивает высокую износостойкость, но при этом получаются большие углы надреза и конусности при умеренном времени обработки. Твердосплавные сверла обеспечивают баланс износостойкости, времени обработки и угла надреза/конусности.

В работах [84–90] авторы исследовали влияние криогенной обработки электрода-инстру

мента на качество и эффективность электроэррозионной обработки. На основании полученных результатов было установлено, что криогенный электрод-инструмент обеспечивает лучшую производительность обработки (максимальную скорость съема материала и лучшую шероховатость поверхности) по сравнению с обычным электродом-инструментом. Авторы отметили увеличение электропроводности латунной проволоки при неглубокой криогенной обработке. Кроме того, было обнаружено, что зерна стали более тонкими. Эти результаты связаны непосредственно с влиянием криогенной обработки на структурные изменения ЭИ – формирование более однородной структуры, устранение пор и структурных дефектов и уменьшение внутренних напряжений, в связи с чем повышается износостойкость электрода-инструмента. Эффект криогенной обработки был дополнительно исследован путем проведения исследований обрабатываемости электроэррозионной обработкой инконеля 601 с использованием меди, подвергнутой криогенной обработке, в качестве инструмента. Износ инструмента снижается на 33 % за счет криогенной обработки по сравнению с инструментом из необработанной меди. Указанные работы были сосредоточены на изучении влияния тока, напряжения в зазоре и времени импульса на скорость удаления материала, износ электрода и шероховатость поверхности. Установлено, что наиболее важным фактором контроля является ток.

Выводы

В данной статье рассмотрено современное состояние исследований в области электроэррозионной обработки жаропрочных сплавов. Представлены современные тенденции и интересы для изучения научными коллективами, занимающимися этим вопросом. Проведен анализ научной литературы, посвященной экспериментальным исследованиям. Выявлено отсутствие обобщенных и комплексных результатов исследований. ЭЭО – сложный процесс, на результат которого влияет огромное количество факторов, и в настоящее время отсутствуют технологические базы данных и рекомендательные базы для обработки жаропрочных сплавов.

На основании проведенного анализа литературы установлено следующее.

1. Актуально проведение экспериментальных исследований влияния компонентов различных материалов, добавляемых в рабочую жидкость, для улучшения показателей качества поверхности после КПЭО и влияние легирования данными материалами поверхностного слоя жаропрочных материалов.

2. Установлено, что сила тока и время включения импульса являются основными технологическими параметрами, определяющими качество обработанной поверхности и скорость съема материала. При этом превышение параметра времени включения импульса вызывает ускоренный износ электрода-инструмента и оплавление заготовки, что приводит к затруднению вывода шлама из межэлектродного зазора.

3. Установлена эффективность применения модифицированной рабочей жидкости (с добавлением графена и углеродных нанотрубок) при обработке жаропрочных материалов для улучшения качества поверхности.

4. Установлено, что включения в рабочую жидкость оказывают существенное влияние на параметры и качество электроэрозионной обработки. Анализ показывает, что правильный подбор материала и концентрации включений может значительно улучшить результаты процесса.

5. Установлено, что геометрические параметры электрода-инструмента являются одним из определяющих факторов, влияющих на результат электроэрозионной обработки. Анализ литературы показывает, что правильная конфигурация ЭИ способна существенно улучшить качество и эффективность процесса. Правильно подобранная конструкция ЭИ обеспечивает более интенсивное удаление продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, что напрямую влияет на качество обработки.

Список литературы

1. Enhancing corrosion resistance of nickel-based alloys: A review of alloying, surface treatments, and environmental effects / X. Wang, G. Wang, W. Wang, X. Liu, Y. Liu, Y. Jin, Y. Zhang // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1032. – P. 181–195. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.181014.

2. High-temperature corrosion resistance of weld overlay In625 coating in aggressive environments

of waste incinerators / H. Li, H. Liu, J. Li, H. Yao // Corrosion Science. – 2025. – Vol. 249. – DOI: 10.1016/j.corsci.2025.112865.

3. High temperature intergranular oxidation of nickel based superalloy Inconel 718 / S. Madhusudan, E. Epifano, J. Favergeon, T. Sanvienvongsak, D. Marechal, D. Monceau // High Temperature Corrosion of Materials. – 2024. – Vol. 101. – P. 873–884. – DOI: 10.1007/s11085-024-10260-z.

4. Karmuhilan M., Kumanan S. A review on additive manufacturing processes of Inconel 625 // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2022. – Vol. 31. – P. 2583–2592. – DOI: 10.1007/s11665-021-06427-3.

5. Pendokhare D., Chakraborty S. A review on multi-objective optimization techniques of wire electrical discharge machining // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2025. – Vol. 32. – P. 1797–1839. – DOI: 10.1007/s11831-024-10195-3.

6. A state-of-the-art review on metal additive manufacturing: milestones, trends, challenges and perspectives / P. Badoniya, M. Srivastava, P.K. Jain, S. Rathee // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Vol. 46 (6). – P. 339–351. – DOI: 10.1007/s40430-024-04917-8.

7. Experimental modeling techniques in electrical discharge machining (EDM): A review / M.M. Hasan, T. Saleh, A. Sophian, M.A. Rahman, T. Huang, M.S. Ali // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 127. – P. 2125–2150. – DOI: 10.1007/s00170-023-11603-x.

8. Ajay P., Dabhade V.V. Heat treatments of Inconel 718 nickel-based superalloy: A review // Metals and Materials International. – 2025. – Vol. 31. – P. 1204–1231. – DOI: 10.1007/s12540-024-01812-8.

9. Computer simulation of phase transformation and plastic deformation in IN718 superalloy: Microstructural evolution during precipitation / N. Zhou, D.C. Lv, H.L. Zhang, D. McAllister, F. Zhang, M.J. Mills, Y. Wang // Acta Materialia. – 2014. – Vol. 65. – P. 270–286. – DOI: 10.1016/j.actamat.2013.10.069.

10. Deformation mechanisms of D022 ordered intermetallic phase in superalloys / D.C. Lv, D. McAllister, M.J. Mills, Y. Wang // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 118 (1). – P. 350–361. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.055.

11. An overview on welding of Inconel 718 alloy – Effect of welding processes on microstructural evolution and mechanical properties of joints / T. Sonar, V. Balasubramanian, S. Malarvizhi, T. Venkateswaran, D. Sivakumar // Materials Characterization. – 2021. – Vol. 174. – P. 1–22. – DOI: 10.1016/j.matchar.2021.110997.

12. Erdogan N.N., Basyigit A.B. Investigating thermal shock and corrosion resistance of Inconel 601 super al-

- loy after thermal barrier coating with %8 YSZ powder // Materials Today Communications. – 2023. – Vol. 36. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106516.
13. Re-heat treatment effect on the microstructure and mechanical properties of the Inconel 706 alloy for repair / H.S. Kang, H. Kim, E.Y. Yoon, Y.S. Lee, S. Kim, J.G. Kim // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 31. – P. 2193–2201. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.07.011.
14. The experimental and numerical studies on multiaxial creep behavior of Inconel 783 at 700 °C / J. Mao, X. Li, S. Bao, R. Ge, L. Yan // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2019. – Vol. 173. – P. 133–146. – DOI: 10.1016/j.ijpvp.2019.05.005.
15. Varied heat treatments and properties of laser powder bed printed Inconel 718 / R. Jiang, A. Mostafaei, J. Pauza, C. Kantzios, A.D. Rollett // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 755. – P. 170–180. – DOI: 10.1016/J.MSEA.2019.03.103.
16. *Jamil M.F., Sahto M.P., Mehmood A.* Comprehensive study on high-performance machining (HPM) of Inconel-718: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – Vol. 139 (11–12). – P. 5305–5337. – DOI: 10.1007/s00170-025-16225-z.
17. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Шестаков А.В. Жаропрочные интерметаллидные никелевые сплавы для двигателей летательных аппаратов // Идеи и новации. – 2020. – Т. 8, № 3–4. – С. 138–146. – DOI: 10.48023/2411-7943_2020_8_3_4_138.
18. Высокопрочные конструкционные стали для валов газотурбинных двигателей (обзор)/ В.И. Громов, Н.А. Якушева, А.В. Востриков, Н.Н. Черкашнева // Авиационные материалы и технологии. – 2021. – № 1 (62). – С. 3–12. – DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
19. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Попов Н.А. Структура и свойства жаропрочных никелевых сплавов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 164 с.
20. Sudhir, Sehgal A.K., Nain S.S. Machine learning algorithms evaluation and optimization of WEDM of nickel based super alloy: A review // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 50 (5). – P. 1793–1798. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.202.
21. Abhilash P.M., Chakradhar D. Prediction and analysis of process failures by ANN classification during wire-EDM of Inconel 718 // Advanced Manufacturing. – 2020. – Vol. 8. – P. 519–536. – DOI: 10.1007/s40436-020-00327-w.
22. Machine learning and statistical approach in modeling and optimization of surface roughness in wire electrical discharge machining / U.M.R. Paturi, S. Cheruku, V.P.K. Pasunuri, S. Salike, N.S. Reddy, S. Cheruku // Machine Learning with Applications. – 2021. – Vol. 6. – DOI: 10.1016/j.mlwa.2021.100099.
23. Optimization of wire electrical discharge machining of Monel 400 using Taguchi-Grey approach / N. Manikandan, R. Raju, K.L. Narasimhamu, A.K. Damodaram // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 68 (5). – P. 1690–1696. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.215.
24. Multi aspects optimization on spark erosion machining of Incoloy 800 by Taguchi Grey approach / N. Manikandan, J.S. Binoj, P. Thejasree, H. Abhishek, B.K. Goud // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 39 (1). – P. 148–154. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.403.
25. Goyal A. Investigation of material removal rate and surface roughness during wire electrical discharge machining (WEDM) of Inconel 625 super alloy by cryogenic treated tool electrode // Journal of King Saud University – Science. – 2017. – Vol. 29. – P. 528–535. – DOI: 10.1016/j.jksus.2017.06.005.
26. Archana G., Dharma K.D., Venkataramaiah P. Study on machining response in wire EDM of Inconel 625 // International Journal of Applied Engineering Research. – 2018. – Vol. 13 (21). – P. 15270–15277.
27. Tata N., Pacharu R.K., Devarakonda S.K. Multi response optimization of process parameters in wire-cut EDM on INCONEL 625 // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 47 (19). – P. 6960–6964. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.214.
28. Tonday H.R., Tigga A.M. Empirical assessment and modeling of MRR and surface roughness acquired from wire electrical discharge machining of Inconel 718 // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 8 (1). – P. 152–159.
29. Sinha A., Majumder A., Gupta K. A RSM based MOGOA for process optimization during WEDM of Inconel 625 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 236 (5). – P. 1824–1832. – DOI: 10.1177/09544089221074837.
30. Multi-material modeling for wire electro-discharge machining of Ni-based superalloys using hybrid neural network and stochastic optimization techniques / S. Biswas, A.R. Paul, A.R. Dhar, Y. Singh, M. Mukherjee // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2023. – Vol. 41. – P. 350–364. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.12.005.
31. Повышение эффективности электроэррозионной обработки изделий, выполненных из гранулированного жаропрочного никелевого сплава ВВ751П / Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз, В.Б. Блохин, И.В. Осинников, К.Р. Муратов // Конструкции из композиционных материалов. – 2025. – № 1 (177). – С. 27–30. – DOI: 10.52190/2073-2562_2025_1_27.

32. Said A., Lajis M.A. An electrical discharge machining (EDM) of Inconel 718 by using copper electrode at higher peak current and pulse duration // Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 15 (5). – P. 1–7.
33. Tsai H.C., Yan B.H., Huang F.Y. The properties and characteristics of the new electrodes based on Cr-Cu for EDM machines // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. – Vol. 43 (3). – P. 245–252.
34. Performance and microstructure of TiN/Cu EDM electrodes / J.J. Zhang, K.Y. Jiang, J. Yan, F. Wang, X.W. Wang // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 268. – P. 82–86. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.268-270.82.
35. Rajyalakshmi G. Optimization of process parameters of wire electrical discharge machining on Inconel825 using grey relational analysis coupled with principle component analysis // International Journal of Applied Engineering Research. – 2013. – Vol. 8 (11). – P. 1294–1314.
36. Jay M., Çaydas U., Hasçalik A. Optimization of micro-EDM drilling of Inconel 718 superalloy // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 66 (5). – P. 1015–1023. – DOI: 10.1007/s00170-012-4385-8.
37. Machining of Inconel 718 with a defined geometry tool or by electrical discharge machining / V. Baldin, C.R.B. Baldin, A.R. Machado, F.L. Amorim // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2020. – Vol. 42 (5). – P. 1–14. – DOI: 10.1007/s40430-020-02358-7.
38. Mohanty A., Talla G., Gangopadhyay S. Experimental investigation and analysis of EDM characteristics of Inconel 825 // Materials and Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 29. – P. 540–459. – DOI: 10.1080/104269126914.2014.901536.
39. Experimental study on EDM of CFRP based on graphene aqueous solution / N. Chen, L. Kong, W. Lei, R. Qiu // Materials and Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 38 (9). – P. 1180–1189. – DOI: 10.1080/10426914.2023.2165674.
40. Rahimi H., Masoudi S., Tolouei-Rad M. Experimental investigation of the effect of EDM parameters and dielectric type on the surface integrity and topography // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 118. – P. 1767–1778. – DOI: 10.1007/s00170-021-08040-z.
41. Surface microstructure evolution and mechanical property investigation of Inconel 718 alloy using multiple trimmings and WEDM / L. Sun, S. Shi, X. Li, Y. Hou, Z. Chu, B. Chen // Experimental Techniques. – 2025. – Vol. 49. – P. 299–312. – DOI: 10.1007/s40799-024-00749-2.
42. Hasçalik A., Caydas U. Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti–6Al–4V) // Applied Surface Science. – 2007. – Vol. 253. – P. 9007–9016. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.05.031.
43. Mohanty C.P., Mahapatra S.S., Singh M.R. An experimental investigation of machinability of Inconel 718 in electrical discharge machining // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 6. – P. 605–611. – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.075.
44. Talla G., Gangopadhyay S., Biswas C.K. Influence of graphite powder mixed EDM on the surface integrity characteristics of Inconel 625 // Particulate Science and Technology. – 2016. – Vol. 35 (2). – P. 219–226. – DOI: 10.1080/02726351.2016.1150371.
45. An analysis of machining response parameters, crystalline structures, and surface topography during EDM of die-steel using EDM oil and liquid based viscous dielectrics: a comparative analysis of machining performance / K. Paswan, A. Pramanik, S. Chattopadhyaya, A.M. Khan, S. Singh // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 48 (1). – P. 1–17. – DOI: 10.1007/s13369-023-07626-x.
46. Sonker P.K., Nahak B., Singh T.J. Comparative study of copper and graphite electrodes performance in Electrical Discharge Machining (EDM) of die steel // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 68. – P. 167–170. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.07.182.
47. Comparison of copper and tungsten electrodes for the electric discharge machined SUS-316L / G. Singh, A. Mahajan, S. Devgan, S.S. Sidhu // Sustainable Machining Strategies for Better Performance: Select Proceedings of SMSBP 2020. – Springer, 2022. – P. 197–206. – DOI: 10.1007/978-981-16-2278-6_17.
48. Исследование влияния режимов процесса проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на формирование значения ширины реза при обработке жаропрочного никелевого сплава BB751П / В.Т. Хайрулин, Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, В.Б. Блохин, К.Р. Муратов // СТИН. – 2024. – № 6. – С. 27–30.
49. Utilizing wire electrical discharge machining for surface quality and precise profile control of Inconel 718 fir-tree slot / L. Sun, Z. Chu, Y. Hou, K. Rajurkar, X. Li, S. Shi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 133. – P. 1271–1283. – DOI: 10.1007/s00170-024-13826-y.
50. Dzionk S., Siemiatkowski M.S. Studying the effect of working conditions on WEDM machining performance of super alloy Inconel 617 // Machines. – 2020. – Vol. 8 (3). – P. 1–18. – DOI: 10.3390/machines8030054.
51. Factors affecting the cut width in the wire-cut electrical discharge machining of VV751P heat-resistant nickel alloy / V.T. Khairulin, T.R. Ablyaz, E.S. Shlykov, V.B. Blokhin, K.R. Muratov // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44 (7). – P. 1014–1016. – DOI: 10.3103/S1068798X24701387.

52. *Padhi P.C., Routara B.C.* Effect of recast layer thickness of high-carbon alloy (EN-31) in wire EDM process by varying operating parameters // Recent Advances in Thermofluids and Manufacturing Engineering: Select Proceedings of ICTMS 2022. – Springer, 2022. – P. 505–517. – DOI: 10.1007/978-981-19-4388-1_43.
53. *Walder G., Richard J.* Removal of the heat affect zone created by EDM with pico-second LASER machining // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 475–480. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.235.
54. Influence of electrical resistivity and machining parameters on electrical discharge machining performance of engineering ceramics / R. Ji, Y. Liu, R. Diao, C. Xu, X. Li, B. Cai, Y. Zhang // PLoS ONE. – 2017. – Vol. 9 (11). – P. 1–9. – DOI: 10.1371/journal.pone.0110775.
55. Исследование микроструктуры поверхностного слоя жаропрочных материалов, обработанных методом электроэррозионной обработки / Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, И.В. Осинников, К.Р. Муратов, В.Т. Хайруллин // СТИН. – 2024. – № 6. – С. 33–35.
56. Parametric analysis of recast layer formation in wire-cut EDM of HSLA steel / M. Azam, M. Jahanzaib, J.A. Abbasi, M. Abbas, A. Wasim, S. Hussain // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 87. – P. 713–722. – DOI: 10.1007/s00170-016-8518-3.
57. Surface integrity analysis of surfaces of nickel-based alloys machined with distilled water and aluminium powder-mixed dielectric fluid after WEDM / V.K. Rohilla, R. Goyal, A. Kumar, Y.K. Singla, N. Sharma // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 116. – P. 2467–2472. – DOI: 10.1007/s00170-021-07610-5.
58. *Sharma P., Chakradhar D., Narendranath S.* Analysis and optimization of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for aerospace application // Silicon. – 2018. – Vol. 10. – P. 921–930. – DOI: 10.1007/s12633-017-9549-6.
59. Исследование влияния режимов электроэррозионной обработки на эксплуатационные свойства изделий, выполненных из гранулированного жаропрочного никелевого сплава BB751П / Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, В.Б. Блохин, И.В. Осинников, В.Т. Хайруллин, К.Р. Муратов // Конструкции из композиционных материалов. – 2024. – № 2 (174). – С. 22–27. – DOI: 10.52190/2073-2562_2024_2_22.
60. *Sharma R.K., Singh J.* Determination of multi-performance characteristics for powder mixed electric discharge machining of tungsten carbide alloy // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2016. – Vol. 230 (2). – P. 303–315. – DOI: 10.1177/0954405414554017.
61. Unravelling the analysis of electrical discharge machining process parameters, microstructural morphology, surface integrity, recast layer formation, and material properties: A comparative study of aluminum, brass, and Inconel 617 materials / K. Paswan, S. Sharma, C. Li, K.A. Mohammed, A. Kumar, M. Abbas, E.M. Tag-Eldin // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 27. – P. 7713–7729. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.186.
62. *Bui V.D., Mwangi J.W., Schubert A.* Powder mixed electrical discharge machining for antibacterial coating on titanium implant surfaces // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 44. – P. 261–270. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.032.
63. Antibacterial activity and biofilm inhibition by surface modified titanium alloy medical implants following application of silver, titanium dioxide and hydroxyapatite nanocoatings / A. Besinis, S.D. Hadi, H.R. Le, C. Tredwin, R.D. Handy // Nanotoxicology. – 2017. – Vol. 11 (3). – P. 327–338. – DOI: 10.1080/17435390.2017.1299890.
64. *Kumar S., Dhingra A.K., Kumar S.* Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining for nickel-based superalloy inconel-800 using response surface methodology // Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. – 2017. – Vol. 7 (3). – DOI: 10.1186/s40759-017-0022-4.
65. *Kumar N., Ahsan R.* Study of PMEDM efficiency on EN-31 steel using tungsten powder in dielectric fluid // International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research. – 2017. – Vol. 5 (5). – P. 17–24.
66. *Bhaumik M., Maity K.* Effect of machining parameter on the surface roughness of AISI 304 in silicon carbide powder mixed EDM // Decision Science Letters. – 2017. – Vol. 6 (3). – P. 261–268. – DOI: 10.5267/j.dsl.2016.12.004.
67. *Al-Khazraji A.N., Amin S.A., Ali S.M.* The effect of SiC powder mixing electrical discharge machining on white layer thickness, heat flux and fatigue life of AISI D2 die steel // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2016. – Vol. 19 (3). – P. 1400–1415. – DOI: 10.1016/j.jestch.2016.01.014.
68. *Kazi F., Waghmare C.A., Sohani M.S.* Multi-objective optimization of machining parameters in hybrid powder-mixed EDM process by response surface methodology and normalized fuzzy logic algorithm // The International Journal on Interactive Design and Manufacturing. – 2021. – Vol. 15. – P. 695–706. – DOI: 10.1007/s12008-021-00788-8.
69. Synthesis and characterization of titanium and graphite powder mixed electric discharge machining on Inconel 718 / S. Bhowmick, A. Paul, N. Biswas, S. Sarkar, G. Majumdar // Advances in Transdisciplinary

- Engineering. – 2022. – Vol. 27. – P. 58–63. – DOI: 10.3233/ATDE220722.
70. Comparison in the performance of EDM and NPMEDM using Al_2O_3 nanopowder as an impurity in DI water dielectric / A. Kumar, A. Mandal, A.R. Dixit, A. Kumar, S. Kumar, R. Ranjan // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 100. – P. 1327–1339. – DOI: 10.1007/s00170-018-3126-z.
71. Kumar S.B., Saurav D., Mahapatra S.S. On electro-discharge machining of Inconel 718 super alloys: An experimental investigation // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. – P. 4861–4869. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.062.
72. Sahu D.R., Kumar V., Mandal A. Surface integrity analysis in powder mixed EDM of Nimonic 263 // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 62 (1). – P. 353–359. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.467.
73. Электронно-микроскопический анализ поверхностного слоя изделий из жаропрочных никелевых сплавов после электроэррозионной обработки / Т.Р. Абляз, Е.С. Шлыков, И.В. Осинников, В.Б. Блохин, К.Р. Муратов // СТИН. – 2025. – № 5. – С. 55–58.
74. Improvement of surface integrity of Nimonic C 263 super alloy produced by WEDM through various post-processing techniques / A. Mandal, A.R. Dixit, S. Chattopadhyaya, A. Paramanik, S. Hloch, G. Królczyk // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 93. – P. 433–443. – DOI: 10.1007/s00170-017-9993-x.
75. Nguyen H.P., Ngo N.V., Nguyen C.T. Study on multi-objects optimization in EDM with nickel coated electrode using Taguchi-AHP-Topsis // International Journal of Engineering. – 2022. – Vol. 35 (2). – P. 276–282. – DOI: 10.5829/ije.2022.35.02b.02.
76. Bozdana A.T., Alkarkhi N.K. Comparative experimental investigation and gap flow simulation in electrical discharge drilling using new electrode geometry // International Journal of Mechanical Sciences. – 2017. – Vol. 8 (2). – P. 289–298. – DOI: 10.5194/ms-8-289-2017.
77. Experimental research on preparation and machining performance of porous electrode in electrical discharge machining / Y. Jiang, L. Kong, J. Yu, C. Hua, W. Zhao // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2022. – Vol. 36 (12). – P. 6201–6215. – DOI: 10.1007/s12206-022-1134-2.
78. Fabrication of graphene reinforced aluminium metal matrix composites for advanced tool materials / S. Mondal, G. Paul, S.C. Mondal, K. Mondal, Z. Seikh, M. Sekh // Journal of the Institution of Engineers (India): Series D. – 2024. – DOI: 10.1007/s40033-024-00847-w.
79. Electric discharge machining with graphene reinforced aluminium metal matrix composite (Gr Al MMC) tool for EN 31 die steel work piece / S. Mondal, G. Paul, K. Mondal, Z. Seikh, M. Sekh // Journal of the Institution of Engineers (India): Series C. – 2025. – Vol. 106. – P. 541–551. – DOI: 10.1007/s40032-025-01163-2.
80. Study on immersion rotary helical electrode electrochemical discharge machining of Inconel 718 alloy / X. Chen, N. Ma, H. Liu, Y. Chen, R. Nie, Z. Zhang, J. Zhou, Z. Zhou // Journal of Materials Research and Technology. – 2025. – Vol. 38. – P. 288–305. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.07.191.
81. A novel application of the micro-wire-electro-discharge-grinding (μ -WEDG) method for the generation of tantalum and brass nanoparticles / A. Korgal, P.N. Karanth, A.K. Shettigar, J.B. Madhavi // Micro and Nano Systems Letters. – 2024. – Vol. 12 (1). – P. 1–19. – DOI: 10.1186/s40486-024-00210-4.
82. Micro-drill on Al/SiC composite by EDD process: An RSM-MOGOA based hybrid approach / A. Sharma, N. Sharma, R.P. Singh, R. Arora, R.S. Gill, G. Singh // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2022. – Vol. 5 (4). – P. 564–575. – DOI: 10.1016/j.ijlmm.2022.07.002.
83. Electro-discharge machining of microholes on 3d printed Hastelloy using the novel tool-feeding approach / A. Korgal, A.K. Shettigar, N.P. Karanth, N. Kumar, M.J. Bindu // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2025. – Vol. 8 (2). – P. 157–164. – DOI: 10.1016/j.ijlmm.2024.10.005.
84. Goyal A. Investigation of material removal rate and surface roughness during wire electrical discharge machining (WEDM) of Inconel 625 super alloy by cryogenic treated tool electrode // Journal of King Saud University – Science. – 2017. – Vol. 29 (4). – P. 528–535. – DOI: 10.1016/j.jksus.2017.06.005.
85. Pandey A., Kumar R. Some studies using cryogenically treated rotary Cu-tool electrode electrical discharge machining // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 7635–7639. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.438.
86. Torres A., Puertas I., Luis C.J. Modelling of surface finish, electrode wear and material removal rate in electrical discharge machining of hard-to-machine alloys // Precision Engineering. – 2015. – Vol. 40. – P. 33–45. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.10.001.
87. Kumar S.V., Kumar M.P. Optimization of cryogenic cooled EDM process parameters using grey relational analysis // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2018. – Vol. 28. – P. 3777–3784. – DOI: 10.1007/s12206-014-0840-9.
88. Tharian B.K., Dhanish P.B., Manu R. Enhancement of material removal rate in electric discharge machining of Inconel 718 using cryo-treated graphite electrodes // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 47. – P. 5172–5176. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.506.

89. *Datta R.S., Biswal B.B.* Experimental studies on electro-discharge machining of Inconel 825 super alloy using cryogenically treated tool/workpiece // Measurement. – 2019. – Vol. 145. – P. 611–630. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.06.006.

90. *Singh N., Routara B.C., Nayak R.K.* Study of machining characteristics of Inconel 601 with cryogenic cooled electrode in EDM using RSM // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5 (11). – P. 24277–24286. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.223.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Research and analysis of electrical discharge machining in the manufacture of products from heat-resistant alloys: a literature review

Evgeniy Shlykov ^{a,*}, Timur Ablyaz ^b, Vladimir Blokhin ^c, Karim Muratov ^d, Ilya Osinnikov ^e

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>,  Kruspert@mail.ru; ^b  [http://orcid.org/0000-0001-6607-4692](https://orcid.org/0000-0001-6607-4692),  lowrider11-13-11@mail.ru;
^c  <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>,  warkk98@mail.ru; ^d  [http://orcid.org/0000-0001-7612-8025](https://orcid.org/0000-0001-7612-8025),  Karimur_80@mail.ru;
^e  <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>,  ilyuhaosinnikov@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 June 2025

Revised: 04 July 2025

Accepted: 09 September 2025

Available online: 15 December 2025

Keywords:

Electrical discharge machining
Heat-resistant alloys
Experimental studies
Working fluid
Surface roughness
Accuracy
Microcracks
Surface layer

ABSTRACT

Introduction. In modern mechanical engineering, there is a growing trend toward the development and implementation of novel heat-resistant alloys with enhanced physical and mechanical properties. Electrical discharge machining (EDM) is a promising method for manufacturing products from these new-generation heat-resistant alloys. This paper presents an analysis of current research in the field of EDM of heat-resistant alloys. The primary focus is on analyzing output qualitative and quantitative indicators in relation to input parameters – machining mode and conditions. The key factors influencing the efficiency of EDM are considered, including machining parameters and the composition of the working fluid and electrode material. This analysis of current research is intended for specialists in the field of heat-resistant alloy machining, developers of EDM technologies, and researchers working to improve manufacturing methods for aircraft engine components. **The purpose of this work** is to conduct a literature review of existing research on modern methods for ensuring and improving the efficiency and quality of electrical discharge machining (EDM) of heat-resistant materials. **The methods of investigation** involved a theoretical analysis of current research on electrical discharge machining of heat-resistant alloys. **Results and discussion.** A literature analysis was conducted, and it revealed that current strength and pulse duration are the main technological parameters determining the quality of the processed surface and the material removal rate. The effectiveness of using modified working fluids (with graphene and carbon nanotubes) during heat-resistant material processing to improve surface quality was confirmed. It is of particular interest to conduct experimental studies on the influence of adding various material components to the working fluid to improve surface quality indicators after complex pulse electrical discharge machining (CPEDM) and to assess the impact of these alloying materials on the surface layer of heat-resistant materials.

For citation: Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Muratov K.R., Osinnikov I.V. Research and analysis of electrical discharge machining in the manufacture of products from heat-resistant alloys: a literature review. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 16–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.4-16-47. (In Russian).

References

1. Wang X., Wang G., Wang W., Liu X., Liu Y., Jin Y., Zhang Y. Enhancing corrosion resistance of nickel-based alloys: A review of alloying, surface treatments, and environmental effects. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, vol. 1032, pp. 181–195. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.181014.
2. Li H., Liu H., Li J., Yao H. High-temperature corrosion resistance of weld overlay In625 coating in aggressive environments of waste incinerators. *Corrosion Science*, 2025, vol. 249. DOI: 10.1016/j.corsci.2025.112865.
3. Madhusudan S., Epifano E., Favergon J., Sanviemvongsak T., Marechal D., Monceau D. High temperature intergranular oxidation of nickel based superalloy Inconel 718. *High Temperature Corrosion of Materials*, 2024, vol. 101, pp. 873–884. DOI: 10.1007/s11085-024-10260-z.

* Corresponding author

Shlykov Evgeniy S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky prospekt,
614990, Perm, Russian Federation
Tel.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

4. Karmuhilan M., Kumanan S. A review on additive manufacturing processes of Inconel 625. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, vol. 31, pp. 2583–2592. DOI: 10.1007/s11665-021-06427-3.
5. Pendokhare D., Chakraborty S. A review on multi-objective optimization techniques of wire electrical discharge machining. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2025, vol. 32, pp. 1797–1839. DOI: 10.1007/s11831-024-10195-3.
6. Badoniya P., Srivastava M., Jain P.K., Rathee S. A state-of-the-art review on metal additive manufacturing: milestones, trends, challenges and perspectives. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, vol. 46 (6), pp. 339–351. DOI: 10.1007/s40430-024-04917-8.
7. Hasan M.M., Saleh T., Sophian A., Rahman M.A., Huang T., Ali M.S. Experimental modeling techniques in electrical discharge machining (EDM): A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 127, pp. 2125–2150. DOI: 10.1007/s00170-023-11603-x.
8. Ajay P., Dabhadse V.V. Heat treatments of Inconel 718 nickel-based superalloy: A review. *Metals and Materials International*, 2025, vol. 31, pp. 1204–1231. DOI: 10.1007/s12540-024-01812-8.
9. Zhou N., Lv D.C., Zhang H.L., McAllister D., Zhang F., Mills M.J., Wang Y. Computer simulation of phase transformation and plastic deformation in IN718 superalloy: Microstructural evolution during precipitation. *Acta Materialia*, 2014, vol. 65, pp. 270–286. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.10.069.
10. Lv D.C., McAllister D., Mills M.J., Wang Y. Deformation mechanisms of D022 ordered intermetallic phase in superalloys. *Acta Materialia*, 2016, vol. 118 (1), pp. 350–361. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.055.
11. Sonar T., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Venkateswaran T., Sivakumar D. An overview on welding of Inconel 718 alloy – Effect of welding processes on microstructural evolution and mechanical properties of joints. *Materials Characterization*, 2021, vol. 174, pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.110997.
12. Erdogan N.N., Başyigit A.B. Investigating thermal shock and corrosion resistance of Inconel 601 super alloy after thermal barrier coating with %8 YSZ powder. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 36, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106516.
13. Kang H.S., Kim H., Yoon E.Y., Lee Y.S., Kim S., Kim J.G. Re-heat treatment effect on the microstructure and mechanical properties of the Inconel 706 alloy for repair. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 31, pp. 2193–2201. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.07.011.
14. Mao J., Li X., Bao S., Ge R., Yan L. The experimental and numerical studies on multiaxial creep behavior of Inconel 783 at 700 °C. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2019, vol. 173, pp. 133–146. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2019.05.005.
15. Jiang R., Mostafaei A., Pauza J., Kantzos C., Rollett A.D. Varied heat treatments and properties of laser powder bed printed Inconel 718. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 755, pp. 170–180. DOI: 10.1016/J.MSEA.2019.03.103.
16. Jamil M.F., Sahto M.P., Mehmood A. Comprehensive study on high-performance machining (HPM) of Inconel-718: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 139 (11–12), pp. 5305–5337. DOI: 10.1007/s00170-025-16225-z.
17. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Shestakov A.V. Zharoprochnye intermetallicidnye nikellevye splavy dlya dvigatelei letatel'nykh apparatov [High-temperature intermetallic nickel alloys for aircraft engines]. *Idei i novatsii = Ideas and Innovations*, 2020, vol. 8, no. 3–4, pp. 138–146. DOI: 10.48023/2411-7943_2020_8_3_4_138.
18. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Vostrikov A.V., Cherkashneva N.N. Vysokoprochnye konstruktsionnye stali dlya valov gazoturbinnikh dvigatelei (obzor) [High strength structural steels for gas turbine engine shafts (review)]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*, 2021, vol. 62, iss. 1, pp. 3–12. DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
19. Kuznetsov V.P., Lesnikov V.P., Popov N.A. *Struktura i svoistva zharoprochnykh nikellevykh splavov* [Structure and properties of heat-resistant nickel alloys]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2016. 164 p.
20. Sudhir, Sehgal A.K., Nain S.S. Machine learning algorithms evaluation and optimization of WEDM of nickel based super alloy: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 50 (5), pp. 1793–1798. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.202.
21. Abhilash P.M., Chakradhar D. Prediction and analysis of process failures by ANN classification during wire-EDM of Inconel 718. *Advanced Manufacturing*, 2020, vol. 8, pp. 519–536. DOI: 10.1007/s40436-020-00327-w.
22. Paturi U.M.R., Cheruku S., Pasunuri V.P.K., Salike S., Reddy N.S., Cheruku S. Machine learning and statistical approach in modeling and optimization of surface roughness in wire electrical discharge machining. *Machine Learning with Applications*, 2021, vol. 6. DOI: 10.1016/j.mlwa.2021.100099.
23. Manikandan N., Raju R., Narasimhamu K.L., Damodaram A.K. Optimization of wire electrical discharge machining of Monel 400 using Taguchi-Grey approach. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 68 (5), pp. 1690–1696. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.215.

24. Manikandan N., Binoj J.S., Thejasree P., Abhishek H., Goud B.K. Multi aspects optimization on spark erosion machining of Incoloy 800 by Taguchi Grey approach. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 39 (1), pp. 148–154. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.403.
25. Goyal A. Investigation of material removal rate and surface roughness during wire electrical discharge machining (WEDM) of Inconel 625 super alloy by cryogenic treated tool electrode. *Journal of King Saud University – Science*, 2017, vol. 29, pp. 528–535. DOI: 10.1016/j.jksus.2017.06.005.
26. Archana G., Dharma K.D., Venkataramaiah P. Study on machining response in wire EDM of Inconel 625. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018, vol. 13 (21), pp. 15270–15277.
27. Tata N., Pacharu R.K., Devarakonda S.K. Multi response optimization of process parameters in wire-cut EDM on INCONEL 625. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 47 (19), pp. 6960–6964. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.214.
28. Tonday H.R., Tigga A.M. Empirical assessment and modeling of MRR and surface roughness acquired from wire electrical discharge machining of Inconel 718. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, vol. 8 (1), pp. 152–159.
29. Sinha A., Majumder A., Gupta K. A RSM based MOGOA for process optimization during WEDM of Inconel 625. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, vol. 236 (5), pp. 1824–1832. DOI: 10.1177/09544089221074837.
30. Biswas S., Paul A.R., Dhar A.R., Singh Y., Mukherjee M. Multi-material modeling for wire electro-discharge machining of Ni-based superalloys using hybrid neural network and stochastic optimization techniques. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, vol. 41, pp. 350–364. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.12.005.
31. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Osinnikov I.V., Muratov K.R. Povyshenie effektivnosti elektroerozionnoi obrabotki izdelii, vypolnennykh iz granulirovannogo zharoprochnogo nikellevogo splava VV751P [Increasing the efficiency of electrical discharge machining of products made of granulated heat-resistant nickel alloy VV751P]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov = Composite Materials Constructions*, 2025, no. 1 (177), pp. 27–30. DOI: 10.52190/2073-2562_2025_1_27.
32. Said A., Lajis M.A. An electrical discharge machining (EDM) of Inconel 718 by using copper electrode at higher peak current and pulse duration. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 15 (5), pp. 1–7.
33. Tsai H.C., Yan B.H., Huang F.Y. The properties and characteristics of the new electrodes based on Cr-Cu for EDM machines. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43 (3), pp. 245–252.
34. Zhang J.J., Jiang K.Y., Yan J., Wang F., Wang X.W. Performance and microstructure of TiN/Cu EDM electrodes. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 268, pp. 82–86. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.268-270.82.
35. Rajyalakshmi G. Optimization of process parameters of wire electrical discharge machining on Inconel825 using grey relational analysis coupled with principle component analysis. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2013, vol. 8 (11), pp. 1294–1314.
36. Jay M., Çaydas U., Hasçalık A. Optimization of micro-EDM drilling of Inconel 718 superalloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66 (5), pp. 1015–1023. DOI: 10.1007/s00170-012-4385-8.
37. Baldin V., Baldin C.R.B., Machado A.R., Amorim F.L. Machining of Inconel 718 with a defined geometry tool or by electrical discharge machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, vol. 42 (5), pp. 1–14. DOI: 10.1007/s40430-020-02358-7.
38. Mohanty A., Talla G., Gangopadhyay S. Experimental investigation and analysis of EDM characteristics of Inconel 825. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, vol. 29, pp. 540–459. DOI: 10.1080/10426914.2014.901536.
39. Chen N., Kong L., Lei W., Qiu R. Experimental study on EDM of CFRP based on graphene aqueous solution. *Materials and Manufacturing Processes*, 2023, vol. 38 (9), pp. 1180–1189. DOI: 10.1080/10426914.2023.2165674.
40. Rahimi H., Masoudi S., Tolouei-Rad M. Experimental investigation of the effect of EDM parameters and dielectric type on the surface integrity and topography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 118, pp. 1767–1778. DOI: 10.1007/s00170-021-08040-z.
41. Sun L., Shi S., Li X., Hou Y., Chu Z., Chen B. Surface microstructure evolution and mechanical property investigation of Inconel 718 alloy using multiple trimmings and WEDM. *Experimental Techniques*, 2025, vol. 49, pp. 299–312. DOI: 10.1007/s40799-024-00749-2.
42. Hascalik A., Caydas U. Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Applied Surface Science*, 2007, vol. 253, pp. 9007–9016. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.05.031.

43. Mohanty C.P., Mahapatra S.S., Singh M.R. An experimental investigation of machinability of Inconel 718 in electrical discharge machining. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, pp. 605–611. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.075.
44. Talla G., Gangopadhyay S., Biswas C.K. Influence of graphite powder mixed EDM on the surface integrity characteristics of Inconel 625. *Particulate Science and Technology*, 2016, vol. 35 (2), pp. 219–226. DOI: 10.1080/02726351.2016.1150371.
45. Paswan K., Pramanik A., Chattopadhyaya S., Khan A.M., Singh S. An analysis of machining response parameters, crystalline structures, and surface topography during EDM of die-steel using EDM oil and liquid based viscous dielectrics: a comparative analysis of machining performance. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 48 (1), pp. 1–17. DOI: 10.1007/s13369-023-07626-x.
46. Sonker P.K., Nahak B., Singh T.J. Comparative study of copper and graphite electrodes performance in Electrical Discharge Machining (EDM) of die steel. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 68, pp. 167–170. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.07.182.
47. Singh G., Mahajan A., Devgan S., Sidhu S.S. Comparison of copper and tungsten electrodes for the electric discharge machined SUS-316L. *Sustainable Machining Strategies for Better Performance: Select Proceedings of SMSBP 2020*. Springer, 2022, pp. 197–206. DOI: 10.1007/978-981-16-2278-6_17.
48. Khayrulin V.T., Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Blokhin V.B., Muratov K.R. Issledovanie vliyaniya rezhimov protsessa provolochno-vyreznoi elektroerozionnoi obrabotki na formirovanie znacheniya shiriny reza pri obrabotke zharoprochnogo nikellevogo splava VV751P [Study of the influence of wire-cut electrical discharge machining process modes on the formation of the cut width value when processing heat-resistant nickel alloy VV751P]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2024, no. 6, pp. 27–30. (In Russian).
49. Sun L., Chu Z., Hou Y., Rajurkar K., Li X., Shi S. Utilizing wire electrical discharge machining for surface quality and precise profile control of Inconel 718 fir-tree slot. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 133, pp. 1271–1283. DOI: 10.1007/s00170-024-13826-y.
50. Dzionk S., Siemiatkowski M.S. Studying the effect of working conditions on WEDM machining performance of super alloy Inconel 617. *Machines*, 2020, vol. 8 (3), pp. 1–18. DOI: 10.3390/machines8030054.
51. Khairulin V.T., Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Blokhin V.B., Muratov K.R. Factors affecting the cut width in the wire-cut electrical discharge machining of VV751P heat-resistant nickel alloy. *Russian Engineering Research*, 2024, vol. 44 (7), pp. 1014–1016. DOI: 10.3103/S1068798X24701387.
52. Padhi P.C., Routara B.C. Effect of recast layer thickness of high-carbon alloy (EN-31) in wire EDM process by varying operating parameters. *Recent Advances in Thermofluids and Manufacturing Engineering: Select Proceedings of ICTMS 2022*. Springer, 2022, pp. 505–517. DOI: 10.1007/978-981-19-4388-1_43.
53. Walder G., Richard J. Removal of the heat affect zone created by EDM with pico-second LASER machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 475–480. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.235.
54. Ji R., Liu Y., Diao R., Xu C., Li X., Cai B., Zhang Y. Influence of electrical resistivity and machining parameters on electrical discharge machining performance of engineering ceramics. *PLoS ONE*, 2017, vol. 9 (11), pp. 1–9. DOI: 10.1371/journal.pone.0110775.
55. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Osinnikov I.V., Muratov K.R., Khayrullin V.T. Issledovanie mikrostruktury poverkhnostnogo sloya zharoprochnykh materialov, obrabotannykh metodom elektroerozionnoi obrabotki [Study of the microstructure of the surface layer of heat-resistant materials processed by electrical discharge machining]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2024, no. 6, pp. 33–35. (In Russian).
56. Azam M., Jahanzaib M., Abbasi J.A., Abbas M., Wasim A., Hussain S. Parametric analysis of recast layer formation in wire-cut EDM of HSLA steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 87, pp. 713–722. DOI: 10.1007/s00170-016-8518-3.
57. Rohilla V.K., Goyal R., Kumar A., Singla Y.K., Sharma N. Surface integrity analysis of surfaces of nickel-based alloys machined with distilled water and aluminium powder-mixed dielectric fluid after WEDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 116, pp. 2467–2472. DOI: 10.1007/s00170-021-07610-5.
58. Sharma P., Chakradhar D., Narendranath S. Analysis and optimization of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for aerospace application. *Silicon*, 2018, vol. 10, pp. 921–930. DOI: 10.1007/s12633-017-9549-6.
59. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Blokhin V.B., Osinnikov I.V., Khayrulin V.T., Muratov K.R. Issledovanie vliyaniya rezhimov elektroerozionnoi obrabotki na ekspluatatsionnye svoistva izdelii, vypolnennykh iz granulirovannogo zharoprochnogo nikellevogo splava VV751P [Investigation of the influence of electrical discharge machining modes on operational properties of products made of granulated heat-resistant nickel alloy VV751P]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov = Composite Materials Constructions*, 2024, vol. 2 (174), pp. 22–27. DOI: 10.52190/2073-2562_2024_2_22.

60. Sharma R.K., Singh J. Determination of multi-performance characteristics for powder mixed electric discharge machining of tungsten carbide alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, vol. 230 (2), pp. 303–315. DOI: 10.1177/0954405414554017.
61. Paswan K., Sharma S., Li C., Mohammed K.A., Kumar A., Abbas M., Tag-Eldin E.M. Unravelling the analysis of electrical discharge machining process parameters, microstructural morphology, surface integrity, recast layer formation, and material properties: A comparative study of aluminum, brass, and Inconel 617 materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, vol. 27, pp. 7713–7729. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.186.
62. Bui V.D., Mwangi J.W., Schubert A. Powder mixed electrical discharge machining for antibacterial coating on titanium implant surfaces. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, vol. 44, pp. 261–270. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.032.
63. Besinis A., Hadi S.D., Le H.R., Tredwin C., Handy R.D. Antibacterial activity and biofilm inhibition by surface modified titanium alloy medical implants following application of silver, titanium dioxide and hydroxyapatite nanocoatings. *Nanotoxicology*, 2017, vol. 11 (3), pp. 327–338. DOI: 10.1080/17435390.2017.1299890.
64. Kumar S., Dhingra A.K., Kumar S. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining for nickel-based superalloy inconel-800 using response surface methodology. *Mechanics of advanced materials and modern processes*, 2017, vol. 7 (3). DOI: 10.1186/s40759-017-0022-4.
65. Kumar N., Ahsan R. Study of PMEDM efficiency on EN-31 steel using tungsten powder in dielectric fluid. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, 2017, vol. 5 (5), pp. 17–24.
66. Bhaumik M., Maity K. Effect of machining parameter on the surface roughness of AISI 304 in silicon carbide powder mixed EDM. *Decision Science Letters*, 2017, vol. 6 (3), pp. 261–268. DOI: 10.5267/j.dsl.2016.12.004.
67. Al-Khazraji A.N., Amin S.A., Ali S.M. The effect of SiC powder mixing electrical discharge machining on white layer thickness, heat flux and fatigue life of AISI D2 die steel. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2016, vol. 19 (3), pp. 1400–1415. DOI: 10.1016/j.jestch.2016.01.014.
68. Kazi F., Waghmare C.A., Sohani M.S. Multi-objective optimization of machining parameters in hybrid powder-mixed EDM process by response surface methodology and normalized fuzzy logic algorithm. *The International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2021, vol. 15, pp. 695–706. DOI: 10.1007/s12008-021-00788-8.
69. Bhowmick S., Paul A., Biswas N., Sarkar S., Majumdar G. Synthesis and characterization of titanium and graphite powder mixed electric discharge machining on Inconel 718. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 2022, vol. 27, pp. 58–63. DOI: 10.3233/ATDE220722.
70. Kumar A., Mandal A., Dixit A.R., Kumar A., Kumar S., Ranjan R. Comparison in the performance of EDM and NPMEDM using Al_2O_3 nanopowder as an impurity in DI water dielectric. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 100, pp. 1327–1339. DOI: 10.1007/s00170-018-3126-z.
71. Kumar S.B., Saurav D., Mahapatra S.S. On electro-discharge machining of Inconel 718 super alloys: An experimental investigation. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, pp. 4861–4869. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.062.
72. Sahu D.R., Kumar V., Mandal A. Surface integrity analysis in powder mixed EDM of Nimonic 263. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 62 (1), pp. 353–359. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.467.
73. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Osinnikov I.V., Blokhin V.B., Muratov K.R. Elektronno-mikroskopicheskii analiz poverkhnostnogo sloya izdelii iz zharoprochnykh nikellevykh splavov posle elektroerozionnoi obrabotki [Electron-microscopic analysis of the surface layer of products made of heat-resistant nickel alloys after electrical discharge machining]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2025, no. 5, pp. 55–58. (In Russian).
74. Mandal A., Dixit A.R., Chattopadhyaya S., Paramanik A., Hloch S., Królczyk G. Improvement of surface integrity of Nimonic C 263 super alloy produced by WEDM through various post-processing techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 93, pp. 433–443. DOI: 10.1007/s00170-017-9993-x.
75. Nguyen H.P., Ngo N.V., Nguyen C.T. Study on multi-objects optimization in EDM with nickel coated electrode using Taguchi-AHP-Topsis. *International Journal of Engineering*, 2022, vol. 35 (2), pp. 276–282. DOI: 10.5829/ije.2022.35.02b.02.
76. Bozdana A.T., Alkarkhi N.K. Comparative experimental investigation and gap flow simulation in electrical discharge drilling using new electrode geometry. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, vol. 8 (2), pp. 289–298. DOI: 10.5194/ms-8-289-2017.
77. Jiang Y., Kong L., Yu J., Hua C., Zhao W. Experimental research on preparation and machining performance of porous electrode in electrical discharge machining. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, vol. 36 (12), pp. 6201–6215. DOI: 10.1007/s12206-022-1134-2.

78. Mondal S., Paul G., Mondal S.C., Mondal K., Seikh Z., Sekh M. Fabrication of graphene reinforced aluminium metal matrix composites for advanced tool materials. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2024. DOI: 10.1007/s40033-024-00847-w.
79. Mondal S., Paul G., Mondal K., Mondal S.C. Electric discharge machining with graphene reinforced aluminium metal matrix composite (Gr Al MMC) tool for EN 31 die steel work piece. *The Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2025, vol. 106, pp. 541–551. DOI: 10.1007/s40032-025-01163-2.
80. Chen X., Ma N., Liu H., Chen Y., Nie R., Zhang Z., Zhou J., Zhou Z. Study on immersion rotary helical electrode electrochemical discharge machining of Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, vol. 38, pp. 288–305. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.07.191.
81. Korgal A., Karanth P.N., Shettigar A.K., Madhavi J.B. A novel application of the micro-wire-electro-discharge-grinding (μ -WEDG) method for the generation of tantalum and brass nanoparticles. *Micro and Nano Systems Letters*, 2024, vol. 12 (1), pp. 1–19. DOI: 10.1186/s40486-024-00210-4.
82. Sharma A., Sharma N., Singh R.P., Arora R., Gill R.S., Singh G. Micro-drill on Al/SiC composite by EDD process: An RSM-MOGOA based hybrid approach. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2022, vol. 5 (4), pp. 564–575. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2022.07.002.
83. Korgal A., Shettigar A.K., Karanth N.P., Kumar N., Bindu M.J. Electro-discharge machining of microholes on 3d printed Hastelloy using the novel tool-feeding approach. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2025, vol. 8 (2), pp. 157–164. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2024.10.005.
84. Goyal A. Investigation of material removal rate and surface roughness during wire electrical discharge machining (WEDM) of Inconel 625 super alloy by cryogenic treated tool electrode. *Journal of King Saud University – Science*, 2017, vol. 29 (4), pp. 528–535. DOI: 10.1016/j.jksus.2017.06.005.
85. Pandey A., Kumar R. Some studies using cryogenically treated rotary Cu-tool electrode electrical discharge machining. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (2), pp. 7635–7639. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.438.
86. Torres A., Puertas I., Luis C.J. Modelling of surface finish, electrode wear and material removal rate in electrical discharge machining of hard-to-machine alloys. *Precision Engineering*, 2015, vol. 40, pp. 33–45. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.10.001.
87. Kumar S.V., Kumar M.P. Optimization of cryogenic cooled EDM process parameters using grey relational analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 28, pp. 3777–3784. DOI: 10.1007/s12206-014-0840-9.
88. Tharian B.K., Dhanish P.B., Manu R. Enhancement of material removal rate in electric discharge machining of Inconel 718 using cryo-treated graphite electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 47, pp. 5172–5176. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.506.
89. Datta R.S., Biswal B.B. Experimental studies on electro-discharge machining of Inconel 825 super alloy using cryogenically treated tool/workpiece. *Measurement*, 2019, vol. 145, pp. 611–630. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.06.006.
90. Singh N., Routara B.C., Nayak R.K. Study of machining characteristics of Inconel 601 with cryogenic cooled electrode in EDM using RSM. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (11), pp. 24277–24286. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.223.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.