



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Улучшение характеристик электроэрозионной обработки сплавов NiTi, NiCu и BeCu с использованием многокритериального подхода на основе функции полезности

Виджаякумар Джатти^{1, a}, Виджаян Сингараджан^{2, b}, А. Сайятибрагим^{3, c},
 Винаякумар Джатти^{4, d}, Мурали Кришнан^{2, e, *}, Савита Джатти^{5, f}

¹ Инженерная школа и школа прикладных наук, Университет Беннетта, Нойда, 201310, Индия

² Технологический институт Карпагама, Коимбатур – 641105, Тамил Наду, Индия

³ Университетский центр исследований и разработок, Чандигархский университет, 140413, Пенджаб, Индия

⁴ Технологический институт Симбиоза, Международный университет Симбиоза, Пуна, 412115, Махараштра, Индия

⁵ Инженерный колледж им. Д.И. Патила, Университет Савитрибай Пхуле Пуна, Пуна, Индия

^a  <https://orcid.org/0000-0001-7949-2551>,  vijaykijatti@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-3636-7731>,  s.n.vijayan@gmail.com;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-1968-0937>,  imsaiyath@gmail.com; ^d  <https://orcid.org/0000-0001-6016-0709>,  vinay.jatti89@gmail.com;

^e  <https://orcid.org/0009-0004-0107-0753>,  murali15091990@gmail.com; ^f  <https://orcid.org/0000-0001-5514-8078>,  savitabirajdardyp@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:

Поступила: 20 февраля 2025

Рецензирование: 25 марта 2025

Принята к печати: 27 марта 2025

Доступно онлайн: 15 июня 2025

Ключевые слова:

Карбид бора

EDM (электроэрозионная обработка)

Сплав с памятью формы

Многокритериальная оптимизация Тагучи

Дисперсионный анализ (ANOVA) и концепция полезности

АННОТАЦИЯ

Введение. Обработка твердых материалов и сплавов с памятью формы (СПФ), таких как сплавы NiTi, NiCu и BeCu, традиционными методами затруднена из-за чрезмерного износа инструмента в процессе обработки и низкого качества обработанной поверхности. Нетрадиционные методы обработки, в частности электроэрозионная обработка (EDM), обеспечивают повышенную точность и качество поверхности. Однако эффективность EDM зависит от оптимизации параметров процесса. **Целью данного исследования** является оптимизация параметров EDM для улучшения характеристик обработки СПФ путем учета таких факторов, как длительность импульса, длительность паузы между импульсами, ток разряда, напряжение в межэлектродном зазоре и электропроводность заготовки. **Методы.** В данном исследовании использован подход планирования эксперимента Тагучи для анализа влияния ключевых параметров процесса на удельный съем материала (MRR Q), шероховатость поверхности (SR Ra) и скорость износа инструмента (TWR v_h). Дисперсионный анализ (ANOVA) был применен для выявления наиболее статистически значимых факторов, влияющих на характеристики обработки. Многокритериальный метод оптимизации, основанный на теории полезности, был использован для определения оптимальных настроек EDM, обеспечивающих баланс между MRR Q , Ra и TWR v_h . Результаты были подтверждены экспериментальными испытаниями. **Результаты и обсуждение.** Экспериментальные результаты показали, что в испытании № 15 достигнута наивысшая MRR Q , равная 9,076 мм³/мин, в то время как в испытании № 1 получена наименьшая SR Ra , равная 2,238 мкм. Минимальная TWR v_h , равная 0,041 мм³/мин, наблюдалась в испытании № 10, это способствует увеличению срока службы инструмента. Дисперсионный анализ показал, что напряжение в межэлектродном зазоре является наиболее влияющим фактором, определяющим 85,98 % вариации характеристик обработки, за которым следуют ток разряда (4,76 %) и длительность паузы между импульсами (2,59 %). Процесс многокритериальной оптимизации успешно определил конфигурации параметров, которые оптимизируют MRR Q при минимизации SR Ra и TWR v_h . Разработанная в данном исследовании модель прогнозирования продемонстрировала высокую точность со значением $R^2 = 93,3$ % и скорректированным $R^2 = 89,7$ %. Валидационные эксперименты подтвердили эффективность оптимизированных параметров, что привело к среднему MRR $Q = 8,852$ мм³/мин, SR $Ra = 2,818$ мкм и TWR $v_h = 0,148$ мм³/мин. Полученные результаты подтверждают, что тщательная оптимизация параметров электроэрозионной обработки позволяет существенно улучшить характеристики обработки сплавов с памятью формы, значительно повышая эффективность и долговечность инструмента.

Для цитирования: Улучшение характеристик электроэрозионной обработки сплавов NiTi, NiCu и BeCu с использованием многокритериального подхода на основе функции полезности / В.С. Джатти, В. Сингараджан, А. Сайятибрагим, В.С. Джатти, М.Р. Кришнан, С.В. Джатти // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 57–88. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-57-88.

Введение

Усовершенствованная нетрадиционная электроэрозионная обработка (EDM) – это электро-термический процесс, при котором материал с заготовки удаляется с помощью электриче-

*Адрес для переписки

Кришнан Мурали Р., д.т.н., доцент

Технологический институт Карпагама,

Коимбатур – 641105, Тамил Наду, Индия

Тел.: +91 9789339171, e-mail: murali15091990@gmail.com

ских разрядов (искр). EDM широко применяется в производстве изделий из сплавов с памятью формы, керамических и композиционных материалов благодаря способности обеспечивать высокую точность и сложность формы [1]. EDM считается одним из наиболее эффективных методов обработки труднообрабатываемых материалов, таких как высокопрочные, хрупкие и твердые сплавы, поскольку не требует применения механической силы [2].

В процессе EDM тепловая энергия, необходимая для удаления материала, генерируется в результате электрических искр, возникающих в диэлектрической жидкости. Локальный интенсивный нагрев, вызванный непрерывными электрическими пробоями, приводит к плавлению и испарению материала заготовки. Диэлектрическая жидкость выполняет несколько важных функций: удаление продуктов эрозии, охлаждение заготовки и предотвращение возникновения дугового разряда [3].

Различают два типа EDM-станков: электроэрозионные станки погружного типа (sinker EDM) и электроэрозионные станки вырезного типа (wire EDM или WEDM). Выбор конкретного типа EDM определяется требованиями к применению, а также свойствами материала и геометрическими параметрами изготавливаемой детали [4]. EDM позволяет обрабатывать электропроводящие материалы с широким диапазоном механических свойств. Благодаря высокой точности и возможности обеспечения заданных требований к качеству поверхности технология EDM востребована в аэрокосмической, автомобильной, биомедицинской промышленности, а также в производстве инструментов и штампов [5].

Эффективность EDM определяется многочисленными технологическими параметрами, включая характеристики разрядной энергии (длительность импульса и интервала между импульсами, ток, напряжение в зазоре, искровой зазор), типом электрода и диэлектрической жидкости, давлением промывки и длительностью цикла. Оптимизация этих параметров является ключевым фактором для достижения максимальной производительности (скорости удаления материала), минимальной шероховатости поверхности и увеличения срока службы инструмента [6].

Исследования в области EDM-обработки временных материалов часто включают в себя параметрические исследования, посвященные изучению влияния технологических параметров на скорость удаления материала (MRR), шероховатость поверхности (SR) и скорость износа инструмента (TWR). Эти исследования, как правило, включают оценку физических процессов, сопровождающихся методами оптимизации параметров [7]. Результаты таких исследований позволяют разрабатывать EDM-технологии, пригодные для высокопроизводительных применений, требующих точной обработки труднообрабатываемых материалов.

В связи с улучшенными механическими и термическими свойствами сплавы с памятью формы (NiTi), никель-медные сплавы (NiCu) и бериллиевая бронза (BeCu) находят все более широкое применение, что увеличивает востребованность электроэрозионной обработки (EDM) как эффективного метода их обработки. Сплавы системы NiTi обладают как эффектом памяти формы, так и сверхупругостью, что делает их востребованными в биомедицинских устройствах, аэрокосмической промышленности и роботизированных системах [8]. К важным характеристикам сплавов системы NiTi относятся высокая коррозионная стойкость, биосовместимость и способность к упругому восстановлению после деформации. EDM является предпочтительным методом обработки таких материалов, поскольку традиционные методы обработки часто оказываются неэффективными из-за высокой прочности и твердости этих сплавов.

Никель-медные сплавы системы NiCu характеризуются превосходной коррозионной стойкостью в сочетании с высокой механической прочностью и термической стабильностью. Эти свойства делают никель-медные сплавы пригодными для применения в морской среде, химической промышленности и аэрокосмической отрасли. Сложность обработки никель-медных сплавов связана с эффектом деформационного упрочнения и высокой вязкостью, что делает EDM оптимальным решением.

Бериллиевая бронза (BeCu) сочетает в себе высокую прочность, теплопроводность и коррозионную стойкость. Основные области применения этого сплава включают в себя электронные

разъемы, компоненты аэрокосмической техники и элементы оснастки для литья под давлением. Упрочнение бериллиевой бронзы приводит к увеличению ее прочности, но одновременно затрудняет обработку из-за интенсивного тепловыделения и износа инструмента [9].

Для повышения производительности процесса EDM и сокращения времени обработки необходимо увеличивать скорость удаления материала (MRR). Шероховатость поверхности (SR) является важным показателем качества, определяющим гладкость обработанной поверхности. На SR влияют такие факторы, как энергия разряда, величина искрового промежутка и условия промывки диэлектрической жидкостью. При использовании в областях, требующих прецизионной обработки, к качеству поверхности предъявляются высокие требования, которые достигаются за счет минимизации SR.

Износ инструмента (TWR) характеризует скорость потери материала электрода в процессе EDM [10]. TWR зависит от тока в искровом промежутке, материала электрода и свойств диэлектрической жидкости. Минимизация TWR важна для снижения затрат на инструмент и повышения экономической эффективности процесса.

В результате быстрой кристаллизации расплавленного материала, удаленного электрическим разрядом, формируется упрочненный слой, известный как «переплавленный слой» (recast layer) определенной толщины. Контроль толщины переплавленного слоя достигается путем оптимизации параметров EDM [11]. Область вокруг обработанной поверхности подвергается термическому воздействию, при этом формируется зона термического влияния (ЗТВ). Значительные размеры ЗТВ могут приводить к возникновению остаточных напряжений и микротрещин, ухудшающих механические свойства детали. Управление энергией импульса и эффективное использование диэлектрической жидкости позволяют улучшить терморегулирование и минимизировать ЗТВ. Микротвердость обработанной поверхности может изменяться из-за термических эффектов, что необходимо учитывать при оценке характеристик материала после EDM [12].

Точность размеров и величина перереза (overcut) характеризуют отклонение размеров обработанной детали от заданных. На величину

перереза влияют величина искрового промежутка, длительность импульса и износ инструмента. Достижение высокой точности размеров является критически важным для производства прецизионных компонентов. Изменение параметров процесса EDM позволяет обеспечить повышение производительности, улучшение качества поверхности и увеличение срока службы инструмента в соответствии с отраслевыми стандартами [13].

Метод Тагучи представляет собой эффективный метод статистической оптимизации, широко применяемый для различных технологических процессов, в том числе и для электроэрозионной обработки (EDM). Данный метод позволяет исследователям планировать эффективные эксперименты, оптимизируя параметры процесса при минимальном количестве экспериментальных повторов. В основе метода Тагучи лежит использование ортогональных массивов (ОА) для одновременного исследования влияния нескольких факторов на выходные параметры процесса [14]. Ортогональный массив L18 часто применяется для оптимизации EDM, поскольку обеспечивает эффективную оценку влияния различных уровней параметров процесса. Массив L18 позволяет анализировать до восьми факторов с использованием двух или трех различных уровней параметров, что подходит для исследования основных параметров EDM, таких как длительность импульса, интервал между импульсами, ток и напряжение [15].

Оптимизация процесса с помощью метода Тагучи основана на анализе отношения сигнал/шум (S/N) для определения оптимальных значений параметров, обеспечивающих желаемые результаты обработки. В EDM-исследованиях используются три стандартных критерия отношения S/N: «Меньше – лучше» (Smaller-the-better) для минимизации шероховатости поверхности (SR) и износа инструмента (TWR), «Больше – лучше» (Larger-the-better) для максимизации скорости удаления материала (MRR) и «Номинал – лучше» (Nominal-the-best) для обеспечения прецизионного контроля размеров. Метод Тагучи позволяет повысить эффективность EDM, поскольку с его помощью определяются оптимальные режимы обработки при ограниченном числе экспериментов, что сокращает затраты и время выполнения, а также улучшает

качество поверхности и производительность процесса [16].

В процессе EDM необходимо учитывать несколько показателей производительности одновременно, стремясь к максимальной MRR при минимальных SR и TWR. Для сбалансированной оптимизации этих конкурирующих критериев часто используется метод полезности (Utility method), являющийся популярным инструментом многокритериальной оптимизации. Метод полезности преобразует различные выходные переменные в единый комбинированный индекс, упрощая процесс принятия решений. Применение метода полезности для оптимизации EDM включает в себя следующие этапы: нормализацию значений отклика (приведение различных характеристик производительности к сопоставимому масштабу), назначение весов каждому отклику в зависимости от его относительной важности и расчет единого значения полезности путем умножения нормализованных значений на соответствующие веса и суммирования результатов. Оптимальное сочетание параметров процесса определяется на основе максимального значения полезности, после чего проводится экспериментальная проверка. Применение метода полезности позволяет производителям находить оптимальные настройки параметров, что обеспечивает эффективную структуру для сбалансированной оптимизации показателей производительности EDM [17].

В результате применения метода полезности была достигнута оптимизация трех ключевых параметров производительности процесса электроэрозионной обработки (EDM), а именно скорости удаления материала (MRR), шероховатости поверхности (SR) и износа инструмента (TWR). Использование данного метода позволило сбалансировать требования к скорости производства и качеству обработанной поверхности. Интеграция методов взвешенной нормализации в систему принятия решений повысила ее точность и надежность. Высокая эффективность процесса стала возможной благодаря применению метода Тагучи, обеспечивающего систематическое исследование влияния параметров EDM при минимальном объеме экспериментальных испытаний. Анализ отношения сигнал/шум (S/N) позволил выявить критические параметры, необходимые для точной оптимизации процесса.

Кроме того, установлено, что электропроводность материала заготовки, наряду с измерениями тока и напряжения в разряде, оказывает существенное влияние на производительность обработки и, в частности, на гладкость поверхности [18].

Проведено детальное исследование методов обработки сплавов с памятью формы (SMAs), в котором оценивалась эффективность EDM и ее вариаций, включая традиционную EDM в жидкой среде и микро-EDM в жидкой среде. Сплавы SMAs, обладающие уникальными свойствами, такими как эффект памяти формы, сверхэластичность, высокая коррозионная стойкость и биосовместимость, в частности сплавы на основе NiTi и сплавы на основе меди, широко востребованы в различных областях применения. EDM является перспективной альтернативой традиционным методам механической обработки, особенно при обработке SMAs, поскольку позволяет решить проблемы, связанные с износом инструмента, обеспечить высокую точность обработки и выполнять прецизионную ЧПУ-обработку. Настоящее исследование посвящено анализу влияния входных параметров EDM на поведение отклика при обработке SMAs с акцентом на системы сплавов NiTi.

В обзоре рассмотрены различные стратегии оптимизации параметров электроэрозионной обработки (EDM), акцентирующие внимание на нетрадиционных подходах в дополнение к широко используемым статистическим методам и методам многокритериального принятия решений. Особое внимание уделено как гибридным методам EDM, так и усовершенствованным технологическим подходам, применяемым при обработке сплавов с памятью формы (SMAs) [19].

Обширный обзор посвящен обработке сплавов с памятью формы (SMA) электроэрозионной обработкой (EDM) с акцентом на методах обработки SMA на основе NiTi. Подчеркивается широкое промышленное внедрение SMA в качестве конструкционных материалов благодаря их уникальным свойствам, находящим применение в ортопедических имплантатах, приводах, аэрокосмических компонентах и биомедицинских устройствах. При этом отмечается, что эффективное соединение и обработка NiTi SMA по-прежнему представляют собой сложные задачи. Обзор анализирует экспериментальные, теоре-

тические, а также основанные на моделировании и оптимизации подходы, используемые для описания процессов EDM, WEDM и традиционных методов обработки SMA. Подчеркивается, что повышение эффективности обработки требует оптимального выбора параметров процесса, подходящих инструментов-электродов и диэлектрических жидкостей. Среди методов EDM наиболее исследованным в контексте резки SMA является метод WEDM, который опережает традиционную EDM в жидкой среде и PMEDM (смешанный порошковый электроэрозионный способ), используемые для повышения производительности и точности обработки SMA [20].

В ряде работ исследована оптимизация параметров процесса WEDM для сплавов с памятью формы (нитинол – никель-титановый сплав), демонстрирующих способность возвращаться к своей первоначальной форме под воздействием тепловых и механических факторов. В работе [21] для определения оптимальных условий обработки используется анализ функции желательности (DFA) в сочетании с процессом аналитической иерархии (АНР) в рамках многокритериального принятия решений (MCDM). Исследовано влияние четырех входных параметров WEDM – длительности импульса, интервала между импульсами, натяжения проволоки и подачи проволоки – на ширину пропила, скорость удаления материала (MRR) и шероховатость поверхности (SR). На основе методов DFA–АНР определены оптимальные параметры обработки: длительность импульса 120 мкс, интервал между импульсами 55 мкс, натяжение проволоки 8 кгс и подача проволоки 3 м/мин. Результаты подтверждены анализом отношения сигнал/шум (S/N) по методу Тагучи. Комбинация результатов показала, что подход MCDM успешно определяет эффективные параметры процесса, обеспечивающие повышение производительности при обработке нитинола методом WEDM [21].

В работе [22] исследовалась обработка WEDM сверхэластичного SMA из никеля-титана ($\text{Ni}_{54.1}\text{Ti}$), обусловленная сложностями традиционных методов обработки. Сплав на основе NiTi требует прецизионных методов обработки, особенно в критических областях применения, таких как медицинская промышленность. Оценка сосредоточена на влиянии длительности

импульса, интервала между импульсами и тока в зазоре на два основных выходных показателя – MRR и SR. Эксперименты, систематически оценивающие эти параметры, были спланированы с использованием смешанного ортогонального массива Taguchi L27 (L27 OA) и продемонстрировали, что длительность импульса является ключевым параметром, определяющим значения MRR и SR [22].

Оптимизация шероховатости поверхности NiTi SMA при EDM с применением метода Тагучи исследована в работе [23]. Сплав на основе NiTi широко используется в качестве «умного» материала в различных отраслях, включая индустрию безопасности, морской сектор и аэрокосмическую область, благодаря своим уникальным свойствам. В связи с высокой твердостью этого материала обработка традиционными инструментами представляет значительные трудности, что делает EDM подходящим решением. Качество обработки NiTi в значительной степени зависит от параметров шероховатости поверхности. Переменные процесса EDM были оптимизированы с помощью систематического метода Тагучи для повышения производительности. Результаты исследований демонстрируют возможность улучшения качества поверхности сплава на основе NiTi и, следовательно, подтверждают эффективность EDM как метода прецизионной обработки этого сложного материала [23].

Несмотря на сложность обработки никель-титанового (NiTi) сплава традиционными методами, электроэрозионная обработка (EDM) обеспечивает оптимальную производительность при работе с этим материалом. Однако высокий износ инструмента при EDM NiTi приводит к снижению скорости удаления материала. Исследование, представленное в [24], было направлено на максимизацию MRR и минимизацию TWR с использованием метода Тагучи и принципа полезности. Эксперименты проводились на станке EDM в жидкой среде с применением смешанного ортогонального массива Тагучи L36 (22×33). В качестве материала заготовки использовался сплав NiTi, а в качестве электрода-инструмента – электролитическая медь. Анализ Тагучи выявил, что электропроводность заготовки и электрода-инструмента, ток в зазоре и длительность импульса являются основными факторами, влияющими на MRR и TWR. Было

установлено, что MRR на уровне 6,31 мм³/мин и TWR на уровне 0,031 мм³/мин достигаются при следующих параметрах: электропроводность заготовки 4219 См/м, электропроводность инструмента 26 316 См/м, ток в зазоре 16 А, длительность импульса 38 мкс [24].

В работе [25] исследуется возможность обработки никель-титановых (NiTi) SMA методом EDM с использованием медных, графитовых и вольфрам-медных электродов, а также диэлектрика 358 как диэлектрической жидкости. В качестве параметров процесса EDM использовали три уровня тока (6, 12 и 18 А) в сочетании с тремя значениями длительности импульса (200, 400 и 600 мкс) при постоянном напряжении 3 В и фиксированном интервале между импульсами 50 мкс. Основная задача заключалась в определении оптимальных настроек, обеспечивающих максимальную MRR и минимальную SR для сплавов NiTi с памятью формы. Анализ поверхности заготовки включал в себя исследование размеров и длины электрода с использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной спектроскопии (EDX) для оценки адгезии материала электрода к заготовке. Дисперсионный анализ (ANOVA) использовался в качестве статистического метода для определения значимости параметров процесса. Выявлено, что различия между материалами электродов относительно незначительны, а перерез (overcut) является основным фактором, влияющим на MRR и SR. Поверхностное исследование выявило наличие дефектов поверхности в виде капель, продуктов разрушения, комков, микротрещин и отверстий. Повышенные значения SR были связаны с остатками Cu и W от электрода, которые прилипали к заготовке из-за недостаточной промывки диэлектрической жидкостью [25].

В работе [26] экспериментальные условия для фрезерования поверхности NiTi SMA оптимизированы до процесса сухой резки. Исследования были направлены на достижение наименьшего значения Ra (средней шероховатости) и минимального V_b (износа задней поверхности) с использованием неметаллического твердосплавного инструмента с радиусом закругления вершины 0,4 или 0,8 мм. Эксперименты по фрезерованию проводились при трех скоростях

резания (20, 35 и 50 м/мин), трех скоростях подачи (0,03, 0,07 и 0,14 мм/зуб) и фиксированной осевой глубине резания 0,7 мм. Ортогональный массив Taguchi L18 использовался в качестве метода планирования эксперимента с применением программного обеспечения Minitab 17 для анализа данных. Анализ дисперсии (ANOVA) показал, что радиус закругления вершины режущего инструмента является основным фактором, определяющим шероховатость поверхности, а скорость подачи (f_z) оказывает наибольшее влияние на износ задней поверхности (V_b). Проверочные испытания подтвердили, что оптимальные параметры обработки правильно предсказывают результаты лабораторных экспериментов, что свидетельствует об успехе процесса оптимизации [26].

Оптимизация параметров EDM для компонентов на основе Cu-SMA с применением алгоритмов машинного обучения (ML) описана в [27]. Процесс оптимизации был сосредоточен на изменении длительности импульса (T_{on}), интервала между импульсами (T_{off}), тока разряда (I_p) и напряжения в зазоре (GV) с целью уменьшения износа инструмента (TWR). Эмпирическое планирование экспериментов использовало центральный композитный дизайн (CCD) в сочетании с методологией поверхности отклика (RSM) для анализа характера обработки. В исследовании осуществлялась как одно-, так и многокритериальная оптимизация с подходом на основе функции желательности, а также генетических алгоритмов (GA) и алгоритмов машинного обучения (TLBO) [27].

В результате оптимизации технологических параметров была существенно повышена эффективность соответствующих методов обработки. Инновационным аспектом настоящего исследования является применение методов оптимизации на основе машинного обучения (ML) в процессе электроэрозионной обработки (EDM) сплавов на основе меди с памятью формы (Cu-SMA), что открывает новые перспективы для аэрокосмической, биомедицинской и автомобильной отраслей. На основании результатов, представленных в работе [27], можно заключить, что прецизионная обработка получает значительные преимущества от применения «умных» материалов и методов оптимизации, основанных на анализе данных.

Проведен всесторонний анализ существующих методов обработки сплавов с памятью формы (SMA), охватывающий как традиционные, так и нетрадиционные подходы. Обзор включает в себя результаты исследований по водоструйной обработке (WJM), криогенной обработке, электроэрозионной проволоочной резке (WEDM), электроэрозионной обработке (EDM) и электрохимической обработке. Ключевыми факторами, определяющими производительность и ограничения рассматриваемых процессов, являются скорость удаления материала (MRR), скорость износа инструмента (TWR), шероховатость поверхности (SR) и целостность поверхностного слоя. На основе проведенного анализа были определены наиболее эффективные методы обработки SMA [28].

Рассмотрен процесс оптимизации электроэрозионной обработки (EDM) высокотемпературного высокоэнтропийного сплава с памятью формы (HT-HE-SMA) состава 35Ni-35Ti-15Zr-10Cu-5Sn с использованием медного электрода. Подчеркивается, что EDM является эффективным методом обработки деталей сложной геометрии из труднообрабатываемых материалов, а оптимизация технологических параметров EDM позволяет значительно повысить производительность и качество обработанной поверхности. Исследована взаимосвязь между входными параметрами процесса EDM – током разряда (I_p), длительностью импульса (T_{on}) и интервала между импульсами (T_{off}) – и выходными параметрами, такими как скорость удаления материала (MRR), скорость износа электрода (TWR) и шероховатость поверхности (SR). Для оценки влияния параметров обработки была применена методология поверхности отклика (RSM) с использованием центрального композиционного плана (CCD), а сбор экспериментальных данных осуществлялся с помощью программного обеспечения Minitab19. На основе дисперсионного анализа (ANOVA) при уровне значимости 5 % были определены наиболее существенные факторы и проведена оценка адекватности регрессионных моделей второго порядка. Установлено, что ток разряда, длительность импульса и интервал между импульсами оказывают значительное влияние на MRR, TWR и Ra . Подтверждена высокая точность разработанных математических моделей, о чем свидетельствуют высокие значе-

ния коэффициента детерминации (R^2), достигшие 97,82 % для MRR, 99,53 % для SR и 95,36 % для TWR [29].

Проведена оптимизация параметров электроэрозионной обработки (EDM) с целью достижения максимальных значений скорости удаления материала (MRR) для сплавов NiTi, NiCu и BeCu. В связи со сложностями обработки перспективных материалов традиционными методами EDM рассматривается как эффективная альтернатива. Подчеркивается, что стабильность процесса EDM является сложной задачей, обусловленной влиянием множества факторов. В работе исследована оптимизация параметров EDM путем анализа тока и напряжения в межэлектродном зазоре в сочетании с управлением длительностью импульса, интервалом между импульсами и электропроводностью заготовки. Для планирования экспериментов был использован ортогональный массив Тагучи, а для определения наиболее значимых факторов, влияющих на MRR, – отношение сигнал/шум (S/N) по Тагучи и дисперсионный анализ (ANOVA). Результаты исследования демонстрируют, что производительность EDM в значительной степени зависит от управления током и напряжением в зазоре, а также от длительности импульса и паузы [30].

Проведена оценка шероховатости поверхности (SR) и длины поверхностных трещин (SCL) при электроэрозионной обработке (EDM) электролитической бескислородной меди с использованием различных режимов обработки. Исследовано влияние криогенной обработки заготовки на параметры процесса EDM, включая электропроводность, длительность импульса, длительность паузы, напряжение в зазоре и ток в зазоре. Эксперименты были спланированы с использованием ортогонального массива Тагучи L18 и подвергнуты статистическому анализу. Результаты исследования показали, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают напряжение в зазоре, длительность импульса и интервал между импульсами, в то время как на длину поверхностных трещин влияет взаимодействие электропроводности заготовки с током в зазоре, длительностью импульса и напряжением в зазоре. Установлено, что длина поверхностных трещин сначала уменьшается с увеличением электропроводности, а затем начинает расти. Уменьшение тока в зазоре приво-

дит к увеличению длины трещин, в то время как увеличение напряжения в зазоре способствует уменьшению длины трещин.

Модели машинного обучения, примененные для регрессионного анализа, продемонстрировали высокую точность прогнозирования параметров SCL (длина поверхностных трещин) и SR, достигнув коэффициента детерминации (R^2) свыше 0,90 [31]. Скорость износа инструмента (TWR) минимизировалась путем оптимизации параметров электроэрозионной обработки (EDM), оказывающих влияние на точность и экономичность процесса. В качестве электрода при обработке заготовок из сплавов NiTi, NiCu и BeCu использовалась электролитическая медь. Для анализа влияния различных факторов на TWR применялся ортогональный массив Тагучи L18. В качестве факторов рассматривались электропроводность заготовки, напряжение и ток в межэлектродном зазоре, длительность импульса и интервалы между импульсами. Дисперсионный анализ (ANOVA) в сочетании с анализом отношения сигнал/шум по Тагучи выявил, что наибольшее влияние на TWR оказывают электропроводность материала заготовки, длительность импульса и ток в зазоре. На основе полученных результатов был определен набор оптимальных параметров, позволивший снизить износ инструмента и повысить производительность EDM [32].

В другом исследовании изучалось влияние криогенной обработки и внешнего магнитного поля на процесс электроэрозионной обработки бериллиевой бронзы (BeCu). Эксперименты проводились с использованием различных значений тока в зазоре, напряженности магнитного поля и длительности импульса, а также медных электродов. Наибольшая скорость удаления металла (MRR), равная 11,807 мм³/мин, была достигнута при обработке криогенно обработанных заготовок BeCu необработанными медными электродами. Среди изученных параметров существенное влияние на MRR оказал только ток в зазоре, в то время как влияние длительности импульса и напряженности магнитного поля было незначительным. Анализ микроструктуры поверхности с помощью сканирующей электронной микроскопии показал, что после EDM на сплаве BeCu формируется белый слой толщиной до 20 мкм с минимальным количеством поверхностных трещин [33].

Рассматривалась также электроэрозионная обработка с добавлением порошка в диэлектрическую жидкость (PMEDM – смешанный порошковый электроэрозионный способ) как перспективный метод обработки труднообрабатываемых сплавов, в частности бериллиевой бронзы (BeCu). Добавление мелкодисперсных порошковых частиц в диэлектрик при PMEDM способствует повышению эффективности и стабильности обработки, а также увеличению концентрации искровых разрядов. В экспериментах использовался медный электрод при постоянных значениях длительности импульса, интервала между импульсами и напряжения в зазоре. Варьировались ток в межэлектродном зазоре (в диапазоне 8...14 А) и концентрация порошка (2...6 г/л). Результаты показали, что увеличение тока в межэлектродном зазоре и концентрации порошка приводит к повышению MRR. При этом ухудшение условий промывки на больших глубинах приводило к увеличению скорости износа инструмента (TWR) [34].

Помимо этого, были исследованы методы производства и обработки композиционных материалов на основе бериллиевой бронзы (BeCu). Композиционные материалы получали методом механического замешивания частиц в расплав, а для оценки их свойств использовались методы SEM и EDX. Было установлено, что увеличение содержания частиц карбида кремния приводит к повышению твердости материала. Для оценки производительности обработки композитов применялась струйно-абразивная обработка (AWJM), оценивались MRR и круглость отверстий. Полученные параметры сравнивались с параметрами, полученными при электроэрозионной обработке (EDM). Дисперсионный анализ позволил выявить наиболее значимые факторы, влияющие на процесс обработки, а применение метода Тагучи помогло оптимизировать параметры для достижения высокой производительности и точности [35].

Представленное исследование отличается новизной подхода к изучению особенностей процесса электроэрозионной обработки трех различных материалов: сплава с памятью формы (NiTi), никель-медного сплава (NiCu) и бериллиевой бронзы (BeCu). Особое внимание уделено трудностям, возникающим при обработке этих материалов, обусловленным их устойчивостью

к потере прочности, термическим воздействиям и механическим ударам. Результаты исследования могут быть востребованы в таких отраслях промышленности, как авиакосмическая, биомедицинская и инструментальная. Значимость работы определяется комплексным подходом, сочетающим исследования характеристик EDM для конкретных материалов, многокритериальную оптимизацию и экспериментальную верификацию, что в совокупности направлено на совершенствование высокопроизводительных методов обработки.

Материалы и методы

Основной целью исследования являлся поиск оптимальных сочетаний параметров электроэрозионной обработки (EDM) для достижения максимальной производительности. В качестве варьируемых параметров рассматривались электропроводность материала заготовки, ток и напряжение в межэлектродном зазоре, длительность импульса и интервал между импульсами. Основными выходными параметрами, характеризующими производительность процесса, являлись скорость удаления материала (MRR), шероховатость поверхности (SR) и скорость износа инструмента (TWR). Таким образом, задача состояла в максимизации скорости обработки сложных материалов за счет оптимального выбора параметров EDM с последующей оценкой обрабатываемости.

В качестве материалов заготовок использовались сплавы NiTi и NiCu (диаметр 20 мм, длина 20 мм) и BeCu (20×20×30 мм). Электролитическая медь была выбрана в качестве материала инструмента-электрода благодаря ее высокой электропроводности. Медный стержень (диаметр 6 мм, длина 2000 мм) был разрезан и обработан на фрезерном станке для получения заготовок прямоугольной формы, из которых изготавливались испытательные образцы (4×4×25 мм). В образцах формировалось квадратное углубление размером 3×3 мм и глубиной 5 мм с использованием электрода-инструмента. Использование бескислородной электролитической меди обеспечивало высокую электропроводность и износостойкость инструмента в процессе обработки.

Эксперименты проводились на электроэрозионном прошивном станке Electronica Machine

Tool Limited, модель C400×250. В качестве диэлектрической жидкости использовалось промышленное EDM-масло. Боковая промывка под давлением 0,5 кг/см² обеспечивала эффективное удаление продуктов эрозии и стабильность процесса обработки. Для измерения MRR и TWR применялись цифровые весы GR-300 (точность 0,0001 г), а шероховатость поверхности (SR) измерялась с помощью профилометра Mitutoyo SJ 210. Более подробное описание производственного процесса, экспериментальных методов и полученных результатов представлено в предыдущей работе Vijaykumar S. Jatti et al., 2022 [36].

Фотография использованного электроэрозионного прошивного станка представлена на рис. 1. Химические, физические и термоэлектрические свойства материалов заготовок и инструмента сведены в табл. 1 и 2 соответственно. На рис. 2 схематически показана методология исследования. Скорость удаления материала (MRR) и скорость износа инструмента (TWR) рассчитывались по следующим формулам:

$$MRR = \frac{\Delta W}{\rho_w t_m}, \quad (1)$$



Рис. 1. Электроэрозионный копировально-прошивочный станок

Fig. 1. EDM die-sinking machine

Таблица 1

Table 1

Химический состав использованных материалов

Chemical composition of materials used

Наименование материала / Name of the material	Ni (%)	Ti (%)	Be (%)	Cu (%)
Сплав NiTi / <i>NiTi</i> alloy	60	40	–	–
Сплав NiCu / <i>NiCu</i> alloy	72	–	–	28
Сплав BeCu / <i>BeCu</i> alloy	–	–	2	98
Медный электрод / Copper electrode	–	–	–	99,9

Таблица 2

Table 2

Физические свойства использованных материалов

Physical properties of materials used

Наименование материала / Name of the material	Плотность (ρ), г/см ³ / Density (ρ), g/cc	Удельная тепло- емкость (c_p), Дж/г·К / Specific heat capacity (c_p), J/gK	Температура плав- ления (H_m), К / Melting point (H_m), К	Теплопро- водность (k), Вт/м·К / Thermal conductivity (k), W/mk	Электропро- водность (σ), См/мм / Elect- rical conducti- vity (σ), S/mm
Сплав NiTi / <i>NiTi</i> alloy	6,45	0,320	1583	10	3,268
Сплав NiCu / <i>NiCu</i> alloy	8,8	0,427	1623	21,8	5,515
Сплав BeCu / <i>BeCu</i> alloy	8,25	0,420	1253	130	5,645
Медный элек- трод / Copper electrode	8,94	0,394	1356	391,1	10

где ΔW – изменение массы заготовки (г); ρ_w – плотность материала заготовки (г/см³); t_m – продолжительность обработки (мин);

$$TWR = \frac{\Delta T}{\rho_t t_m}, \quad (2)$$

где ΔT – изменение массы инструмента-электрода (г); ρ_t – плотность материала инструмента-электрода (г/см³); t_m – продолжительность обработки (мин).

Экспериментальный план разрабатывался и реализовывался с использованием метода Тагучи. С целью повышения статистической значимости результатов для каждого набора параметров проводилось три повторных измерения,

что является требованием метода Тагучи при использовании отношения сигнал/шум (S/N). Отношение S/N представляет собой объединенную статистику, учитывающую как среднее значение целевой характеристики, так и ее дисперсию. Использование этого отношения позволяет оптимизировать параметры процесса для достижения максимальной общей производительности.

При расчете отношения S/N применялись три основных типа характеристик качества: «Больше – лучше» (Larger-the-Better, LB) для MRR (стремление к максимальному значению отклика), «Меньше – лучше» (Smaller-the-Better, SB) для TWR и SR (стремление к минимизации), а также категория «Номинал – лучше» (Nominal-

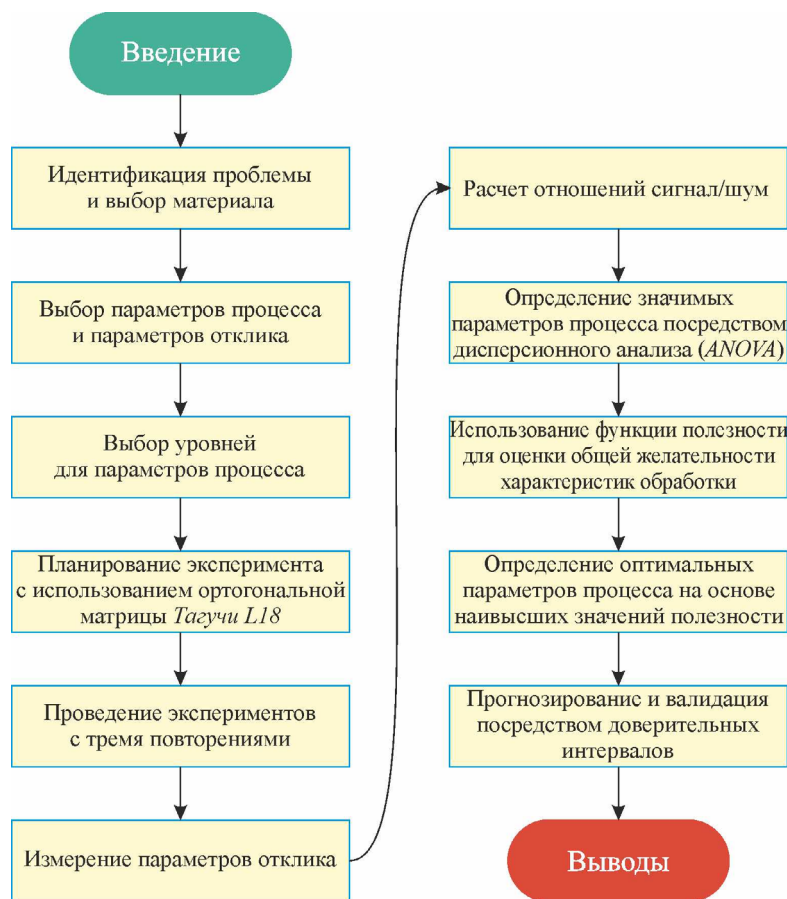


Рис. 2. Методология

Fig. 2. Methodology

the-Better, NB) – в случаях, когда необходимо обеспечить точное соответствие целевому значению (например, при поддержании заданных размеров). Математические выражения для вычисления отношения S/N, соответствующие различным характеристикам качества, представлены ниже.

«Больше – лучше»:

$$(S/N)_{LB} = 10 \log \left(\frac{1}{R} \sum_{j=1}^R \frac{1}{y_j^2} \right); \quad (3)$$

«Меньше – лучше»:

$$(S/N)_{SB} = 10 \log \left(\frac{1}{R} \sum_{j=1}^R y_j^2 \right); \quad (4)$$

«Номинал – лучше»:

$$(S/N)_{NB} = 10 \log \left(\frac{1}{R} \sum_{j=1}^R (y_j - y_0)^2 \right), \quad (5)$$

где y_i – значение параметра, полученное в i -м испытании; R – количество повторений испытания.

В экспериментальном плане Тагучи использовался ортогональный массив L18, выбранный на основе количества параметров процесса и числа их уровней. План включал в себя пять параметров: электропроводность заготовки, ток в зазоре, напряжение в зазоре, длительность импульса и интервал между импульсами. Одна переменная (электропроводность) варьировалась на шести уровнях, а остальные четыре – на трех. Эти параметры обозначены как A , B , C , D и E .

В табл. 3 представлены параметры процесса и соответствующие уровни, использованные в экспериментах. Метод Тагучи требует расчета степеней свободы (DoF) с целью выбора подходящего ортогонального массива для планирования экспериментов. Электропроводность материала заготовки, имеющая шесть уровней, определяет пять степеней свободы. Каждый из оставшихся четырех параметров (ток в зазоре, напряжение в зазоре, длительность импульса и интервал между импульсами), варьируемый на трех уровнях, имеет две степени свободы. Таким образом, общее количество степеней свободы

Таблица 3

Table 3

**Параметры процесса и их значения /
Process parameters and its levels**

Параметр / Parameters	Усл. обозна- чение / Code	Значения / Levels					
Электропро- водность заго- товки, См/мм / Electrical conductivity of workpiece (S/m)	A	NiTi		NiCu		BeCu	
		3268 (без обработки) / 3268 (Untreated)	4219 (после обработки) / 4219 (Treated)	5515 (без обработки) / 5515 (Untreated)	5625 (с обработкой) / 5625 (Treated)	5645 (без обработки) / 5645 (Untreated)	5902 (с обра- боткой) / 5902 (Treated)
Сила тока в межэлектродном зазоре, А / Gap current (A)	B	8	12	16	—	—	—
Напряжение в межэлектродном зазоре, В / Gap voltage (V)	C	40	55	70	—	—	—
Длительность импульса, мкс / Pulse on time (μs)	D	13	26	38	—	—	—
Длительность паузы между импульсами, мкс / Pulse off time (μs)	E	5	7	9	—	—	—

составляет $5 + (4 \times 2) = 13$. На основании этого был выбран смешанный ортогональный массив L18 ($6^1 \times 3^4$) как удовлетворяющий критерию минимального количества степеней свободы, необходимого для проведения эксперимента (не менее 13). Структура массива L18 представлена в табл. 4.

Эксперименты проводились в соответствии с методологией ортогонального массива Taguchi L18. В данном исследовании реализованы два ключевых принципа планирования экспериментов. Во-первых, для повышения статистической достоверности результатов использовался принцип повторения, предусматривающий проведение нескольких повторных измерений для каждого набора параметров. Это позволяет повысить точность оценки основных эффектов и их взаимодействий, а также корректно оценить экспериментальную ошибку. В данном исследовании для каждого сочетания параметров проводилось три повторных измерения. Во-вторых, данные собирались для каждого экспериментального условия.

На основе полученных данных для каждого экспериментального условия рассчитывалось отношение сигнал/шум (S/N) с использованием уравнений (3–5) в соответствии с выбранными характеристиками качества (MRR, TWR и SR). Для определения значимости влияния различных параметров процесса EDM на выходные характеристики применялся дисперсионный анализ (ANOVA). В дополнение к ANOVA для анализа результатов использовались графики главных эффектов и графики отклика. Статистическая обработка данных выполнялась с помощью программного обеспечения MINITAB 15.0. График главных эффектов визуально отображает влияние каждого параметра процесса на выходные характеристики, позволяя оценить тенденции изменений. График отклика показывает изменение значения выходного параметра в зависимости от изменения уровня входного параметра. Экспериментальная программа выполнялась трижды для каждой комбинации параметров, после чего собирались данные. Анализировались как исходные данные, так и данные S/N для определения

Таблица 4

Table 4

Смешанная ортогональная матрица L18 ($6^1 \times 3^4$)Mixed L₁₈ ($6^1 \times 3^4$) orthogonal array

Экспе- римент № / Trail No.	Параметр / Parameter				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	2	1	1	2	2
5	2	2	2	3	3
6	2	3	3	1	1
7	3	1	2	1	3
8	3	2	3	2	1
9	3	3	1	3	2
10	4	1	3	3	2
11	4	2	1	1	3
12	4	3	2	2	1
13	5	1	2	3	1
14	5	2	3	1	2
15	5	3	1	2	3
16	6	1	3	2	3
17	6	2	1	3	1
18	6	3	2	1	2

значимости параметров процесса путем сравнения графиков главных эффектов, построенных на основе данных S/N и исходных данных.

Теория полезности

Оптимизация на основе теории полезности позволяет количественно оценить ценность продукта, рассматривая ее как совокупность уровней полезности, соответствующих различным качественным характеристикам. Задача оптимизации продукта сводится к максимизации общей полезности за счет оптимизации индивидуальной полезности каждой характеристики.

Первым шагом является определение оптимальных уровней параметров процесса с использованием метода Тагучи, что позволяет повысить показатели производительности. Затем для каждого отклика (MRR, SR, TWR) устанавливается шкала предпочтений, учитывающая оптимальные и минимальные значения, полученные в ходе экспериментов. Шкала предпочтений строится на основе следующего уравнения:

$$P_i = A \log \frac{x_i}{x'_i}, \quad (6)$$

где P_i – значение предпочтения для i -го отклика; x_i – исходные данные, полученные в результате эксперимента для i -го отклика; x'_i – наименьшее допустимое значение i -го отклика; A – константа, определяемая как $A = \frac{9}{\log \frac{x_i}{x'_i}}$ (при оптималь-

ных условиях).

После определения значений предпочтений для каждого отклика необходимо определить весовой коэффициент W_i , $i = 1, 2, \dots, n$, для каждого показателя производительности, удовлетворяющий условию

$$\sum_{i=1}^n W = 1. \quad (7)$$

Впоследствии для каждого условия испытания и повторения вычисляется значение полезности $U_{(n, R)}$ на основе уравнения

$$U_{(n, R)} = \sum_{i=1}^n P_i(n, R) x W_i, \quad (8)$$

где n – номер испытания (1, 2, 3, ..., 18); R – номер повторения (1, 2, 3).

После расчета значений полезности для определения идеальных конфигураций параметров процесса вычисляется отношение сигнал/шум (S/N); полезность рассматривается как характеристика типа «Больше – лучше». Затем вычисляется среднее значение отклика и доверительный интервал с использованием значений значимых параметров. При расчете 95%-х доверительных интервалов для подтверждающих экспериментов CI_{CE} и совокупностей CI_{pop} используются следующие уравнения:

$$CI_{CE} = \sqrt{F_{\alpha}(1, f_e) V_e \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right)}; \quad (9)$$

$$CI_{pop} = \sqrt{\frac{F_{\alpha}(1, f_e) V_e}{n_{eff}}}. \quad (10)$$

Здесь $F_{\alpha}(1, f_e)$ – F -критерий Фишера при уровне значимости α (обычно 0,05) и степенях свободы 1 и f_e ; V_e – дисперсия ошибки; R – объем выборки для подтверждающих испытаний; n_{eff} – эффективный размер выборки, рассчитываемый как $N/(1 + \text{DoF})$, где N – общее количество результатов; DoF – суммарное количество степеней свободы, связанных с оценкой среднего отклика.

Конкретные значения:

$$N_{eff} = 54/(1 + 6) = 7,714;$$

$$N \text{ (общее количество результатов)} = 18 \times 3 = 54;$$

$$R \text{ (объем выборки для подтверждающих испытаний)} = 3;$$

$$V_e \text{ (дисперсия ошибки)} = 0,05087;$$

$$f_e \text{ (степени свободы ошибки)} = 11.$$

Значения полезности рассчитываются для всех 18 условий проведения эксперимента и трех повторений. Поскольку полезность является критерием качества типа «Больше – лучше», то проводится анализ средних значений полезности и отношения S/N для каждого уровня параметра.

Результаты и их обсуждение

В настоящем исследовании для оптимизации параметров электроэрозионной обработки (EDM) применялся подход анализа Тагучи. Дисперсионный анализ (ANOVA) позволил выявить статистически значимые факторы, влияющие на процесс. Эффективность режимов обработки оценивалась на основе следующих показателей: скорости удаления материала (MRR), шероховатости поверхности (SR) и износа инструмента (TWR). Результаты измерений, полученные с использованием плана эксперимента Тагучи, представлены в табл. 5. Для оценки влияния режимов EDM на показатели MRR, SR и TWR были рассчитаны отношения сигнал/шум (S/N). Выбор оптимальных параметров основывался на принципе максимизации S/N для MRR (критерий «Больше – лучше») и минимизации S/N для TWR (критерий «Меньше – лучше»).

Результаты показали, что EDM-обработка в значительной степени зависит от MRR, которая является ключевым показателем производительности, характеризующим объем удаленного материала за единицу времени. Для каждой серии измерений MRR (MRR1, MRR2, MRR3) рассчитывали среднее значение, используемое для определения соответствующего отношения S/N. Максимальные значения MRR были зафиксированы в экспериментах № 15 (9,076 мм³/мин, S/N = 19,1572 дБ) и № 9 (8,995 мм³/мин, S/N = 19,0883 дБ), что указывает на высокую эффек-

тивность удаления материала при соответствующих режимах обработки. Минимальные значения MRR наблюдались в экспериментах № 1 (2,096 мм³/мин, S/N = 6,3917 дБ) и № 16 (2,805 мм³/мин, S/N = 8,9493 дБ), что свидетельствует о снижении эффективности удаления материала. Наблюдаемые вариации MRR в различных испытаниях указывают на существенное влияние параметров обработки на объем удаляемого материала.

Анализ значений SR показал, что наилучшее качество поверхности (минимальная шероховатость и максимальное отношение S/N) было достигнуто в эксперименте № 1 (S/N = –7,0101 дБ) при следующих значениях шероховатости: SR1 = 2,238 мкм, SR2 = 2,244 мкм, SR3 = 2,242 мкм. Это позволяет заключить, что выбранные параметры EDM обеспечивают минимальные дефекты и повышенную целостность поверхности. Наихудшее качество поверхности (максимальная шероховатость и минимальное отношение S/N) зафиксировано в эксперименте № 3 (S/N = –11,3890 дБ) при значениях SR1 = 3,704 мкм, SR2 = 3,716 мкм, SR3 = 3,712 мкм. Вероятно, это связано с повышенной энергией разряда, значительным износом инструмента и (или) повышенными термическими напряжениями, приводящими к образованию глубоких кратеров и микротрещин. Диапазон значений шероховатости поверхности (2,238...3,716 мкм) подчеркивает значительную вариативность качества поверхности в зависимости от режимов обработки. Соответствующий диапазон отношений S/N (–7,0101...–11,3890 дБ) подтверждает существенное влияние параметров процесса на качество обработанной поверхности. Малые различия между значениями SR1, SR2 и SR3 в эксперименте № 11 (SR1 = 2,648, SR2 = 2,654, SR3 = 2,652) свидетельствуют о высокой повторяемости и стабильности процесса при данных условиях. Рассчитанные значения полезности факторов, использованных в анализе, представлены в табл. 5.

Износ инструмента (TWR) оказывает существенное влияние на срок службы оборудования и эксплуатационные расходы. Отношения S/N для TWR рассчитывались на основе трех повторных измерений (TWR1, TWR2, TWR3) в каждом испытании. Минимальный износ инструмента, зафиксированный в эксперименте № 10 (0,041 мм³/мин), соответствовал максимальному

Экспериментальные результаты для MRR, SR и TWR

Trial results for MRR, SR and TWR

Экспе- римент № / Trail No.	MRR, мм ³ /мин MRR (mm ³ /min)			Отноше- ние сигнал/ шум, дБ / S/N ratio (dB)	SR, мкм / SR (μm)			Отноше- ние сигнал/ шум, дБ / S/N ratio (dB)	TWR, мм ³ /мин / TWR (mm ³ /min)			Отноше- ние сигнал/ шум, дБ / S/N ratio (dB)
	Run 1	Run 2	Run 3		Run 1	Run 2	Run 3		Run 1	Run 2	Run 3	
1	2,096	2,078	2,088	6,3917	2,238	2,244	2,242	7,0101	0,072	0,068	0,073	22,9708
2	4,456	4,556	4,667	13,1740	2,998	3,018	3,010	9,5675	0,109	0,113	0,111	19,0926
3	7,109	7,118	7,112	17,0411	3,704	3,716	3,712	11,3890	0,151	0,148	0,146	16,5744
4	4,011	3,948	3,923	11,9542	2,756	2,764	2,762	8,8203	0,048	0,054	0,052	25,7818
5	6,502	6,498	6,495	16,2560	3,404	3,398	3,406	10,6364	0,088	0,081	0,084	21,4750
6	4,168	4,145	4,152	12,3714	2,806	2,799	2,802	8,9504	0,242	0,234	0,239	12,4555
7	2,803	2,688	2,781	8,8055	2,794	2,786	2,792	8,9142	0,101	0,094	0,098	20,2013
8	3,328	3,336	3,329	10,4515	2,988	2,979	2,984	9,4950	0,159	0,154	0,161	16,0254
9	8,995	8,989	9,027	19,0883	3,026	3,032	3,029	9,6260	0,198	0,204	0,201	13,9354
10	3,098	3,108	3,102	9,8347	3,318	3,307	3,311	10,4018	0,044	0,039	0,041	27,6633
11	5,981	5,972	5,982	15,5316	2,648	2,654	2,652	8,4693	0,179	0,172	0,175	15,1215
12	6,256	6,259	6,266	15,9319	2,826	2,818	2,822	9,0111	0,221	0,227	0,223	13,0074
13	3,411	3,398	3,405	10,6415	2,898	2,896	2,902	9,2440	0,045	0,048	0,041	26,9825
14	3,081	3,075	3,085	9,7719	2,886	2,892	2,888	9,2140	0,176	0,172	0,179	15,1051
15	9,076	9,069	9,081	19,1572	3,002	2,992	2,988	9,5251	0,214	0,209	0,212	13,4865
16	2,805	2,803	2,798	8,9493	3,308	3,298	3,302	10,3773	0,081	0,074	0,072	22,4106
17	6,707	6,698	6,704	16,5254	2,762	2,766	2,758	8,8245	0,122	0,116	0,124	18,3648
18	6,031	6,022	6,026	15,6011	2,752	2,748	2,754	8,7909	0,258	0,262	0,254	11,7669

отношению S/N (27,6633 дБ), что указывает на стабильную и надежную производительность. Наиболее неблагоприятные условия с точки зрения износа инструмента наблюдались в эксперименте № 6, где был зафиксирован максимальный износ (0,239 мм³/мин) и минимальное отношение S/N (12,4555 дБ). Существенный разброс значений TWR между испытаниями подчеркивает, что износ инструмента в основном зависит от параметров процесса, а именно от длительности импульса, интервала между импульсами, а также от параметров тока.

Многокритериальная оптимизация показателей критериев качества

Метод Тагучи, изначально разработанный для оптимизации одного выходного параметра, позволяет определить оптимальные уровни входных переменных для достижения максимального значения целевой функции. Однако выбранная комбинация параметров может приводить к ухудшению значений других откликов. В связи с этим возникает задача многокритериальной оптимизации, целью которой является определение компромиссной конфигурации параметров процесса, обеспечивающей приемлемые значения всех атрибутов качества. В на-

стоящем исследовании для решения этой задачи применяется сочетание метода Тагучи и теории полезности.

Табл. 6 содержит информацию об оптимальных сочетаниях параметров процесса и соответствующих прогнозируемых значениях критериев качества. На основе анализа Тагучи определены оптимальные режимы обработки для каждого отдельного отклика. В частности, максимальное значение MRR предсказано в эксперименте № 15 при оптимальной комбинации параметров $A_5B_3C_1D_2E_3$, здесь расчетное оптимальное значение MRR составляет 9,767 мм³/мин. Этот результат свидетельствует о том, что для достижения максимальной скорости удаления материала необходимо поддерживать высокий ток в межэлектродном зазоре в сочетании с умеренной длительностью импульса, обеспечивая тем самым эффективное удаление материала. Минимальное значение SR было предсказано для испытания № 1 при параметрах $A_1B_1C_1D_1E_1$ с прогнозируемой шероховатостью поверхности 2,2119 мкм. Это указывает на достижение минимальной шероховатости при использовании наименьшего тока в межэлектродном зазоре и самой малой длительности импульса, что минимизирует повреждение поверхности и улучшает

Таблица 6

Table 6

Оптимальные значения параметров процесса и прогнозируемое оптимальное значение отклика
Optimal settings of process parameters and predicted optimal value of response

Отклик / Response	Эксперимент № / Trail No.	Оптимальный набор параметров процесса / Optimal set of process Variables	Прогнозируемое оптимальное значение отклика / Predicted optimal response value
Максимальная MRR / Maximum MRR	15	$A_5B_3C_1D_2E_3$	9,767 мм ³ /мин
Минимальная SR / Minimum SR	1	$A_1B_1C_1D_1E_1$	2,2119 мкм
Минимальная TWR / Minimum TWR	13	$A_5B_1C_2D_3E_1$	0,00404 мм ³ /мин

качество отделки. Оптимальная скорость износа инструмента (TWR) предсказана в эксперименте № 13 при значениях параметров $A_5B_1C_2D_3E_1$ с расчетным значением TWR = 0,00404 мм³/мин. Минимальный износ инструмента, по-видимому, обеспечивается за счет оптимизации энергии разряда и коэффициента заполнения, что сводит к минимуму эрозию электрода.

Шкала предпочтений рассчитывается по приведенным ниже уравнениям для MRR (P_{MRR}), SR (P_{SR}) и TWR (P_{TWR}):

$$P_{MRR} = 13,03 \log \frac{x_i}{2}; \quad (11)$$

$$P_{SR} = -39,945 \log \frac{x_i}{3,716}; \quad (12)$$

$$P_{TWR} = -4,98 \log \frac{x_i}{0,262}; \quad (13)$$

$$U_{(n, R)} = P_{MRR}(n, R) + W_{MRR} + P_{TWR}(n, R) + W_{TWR} + P_{SR}(n, R) + W_{SR}, \quad (14)$$

где n – номер испытания (1, 2, 3, ..., 18); R – повторение (1, 2, 3...); $WMRR$, $WTWR$ и WSR – предполагаемые значения весовых коэффициентов.

При расчете шкалы предпочтений использовали прогнозируемые значения оптимального отклика: 9,767 мм³/мин для MRR, 2,2119 мкм для SR и 0,00404 мм³/мин для TWR. Экспериментальные данные показывают, что минимальное и максимальное значения MRR находятся в диапазоне от 2,078 до 9,081 мм³/мин, SR – от 2,238 до 3,716 мкм, а TWR – от 0,039 до 0,262 мм³/мин.

Значения полезности рассчитывали с использованием уравнения (14) для всех 18 экс-

периментальных условий и трех повторений для MRR, SR и TWR. Полученные значения, как для необработанных данных, так и для отношений S/N, представлены в табл. 7. Поскольку полезность является показателем качества, для которого желательны более высокие значения, то при расчете отношения S/N использовали уравнение (3). Данные, представленные в табл. 7, визуализированы в виде графиков главных эффектов для отношений S/N и необработанных данных.

Анализ значений полезности (табл. 7) показывает, что максимальное отношение S/N было получено в эксперименте № 17 (13,0980 дБ), что указывает на наилучшую совокупную эффективность и самые высокие значения полезности. Это свидетельствует об оптимальной комбинации параметров EDM, обеспечивающей улучшение общего качества обработки. Наихудшая эффективность, характеризующаяся минимальным отношением S/N, наблюдалась в эксперименте № 16 (6,8203 дБ), что указывает на неоптимальные параметры процесса, приводящие к низким значениям полезности. Значения полезности варьируются от 2,137 до 4,536, что отражает существенные различия в эффективности обработки в зависимости от выбранных режимов. Наблюдается положительная корреляция между отношением S/N и значением полезности, что подтверждает устойчивость оптимальных настроек параметров. Близкие значения полезности для повторных измерений $R1$, $R2$ и $R3$ в эксперименте № 11 (4,264, 4,276, 4,271) указывают на высокую повторяемость процесса, обусловленную стабильными параметрами. Испытания с существенными отклонениями между $R1$, $R2$ и $R3$ указывают на вариативность процесса, которая,

Таблица 7

Table 7

Данные функции полезности

Utility data

Эксперимент № / Trail No.	Необработанные данные (Значения полезности) / Raw data (Utility Values)			Отношение сигнал/шум (дБ) / S/N ratio (dB)
	R1	R2	R3	
1	3,913	3,922	3,885	11,8358
2	3,356	3,333	3,406	10,5391
3	2,787	2,786	2,800	8,9149
4	4,226	4,095	4,115	12,3486
5	3,489	3,557	3,517	10,9327
6	3,040	3,068	3,050	9,6936
7	2,945	2,934	2,956	9,3822
8	2,559	2,603	2,558	8,2086
9	4,192	4,158	4,182	12,4184
10	2,742	2,853	2,807	8,9407
11	4,264	4,276	4,271	12,6095
12	3,825	3,823	3,830	11,6546
13	3,681	3,631	3,736	11,3215
14	2,540	2,541	2,527	8,0836
15	4,199	4,234	4,234	12,5103
16	2,137	2,218	2,227	6,8203
17	4,511	4,536	4,506	13,0980
18	3,798	3,792	3,803	11,5906

вероятно, обусловлена нестабильностью энергии искрового разряда, изменениями натяжения проволоки (в случае проволоочной электроэрозионной обработки) и (или) сопутствующими термическими эффектами.

Влияние параметров процесса на функцию полезности: анализ данных S/N

Для визуализации влияния параметров процесса на функцию полезности в эксперименте по электроэрозионной обработке (EDM) использовали график главных эффектов для отношений сигнал/шум (S/N) (рис. 3). Значения электропроводности заготовки (Workpiece Electrical Conductivity, WEC) варьировались в диапазоне 3268...5902 (3268, 4219, 5515, 5625, 5645 и 5902). Анализ графика показывает, что максимальное значение отношения S/N наблюдается вблизи значения WEC 4219, что указывает на оптимальную электропроводность заготовки для эффективной обработки. Снижение производительности при значениях WEC, равных 5645 и 5902, свидетельствует о неопти-

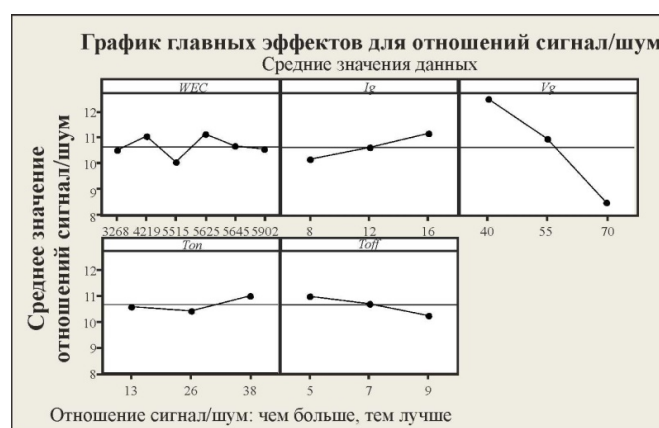


Рис. 3. Влияние технологических переменных на функцию полезности ($U_{MRR, SR, TWR}$) с данными об отношении сигнал/шум

Fig. 3. Impact of process variables for utility function ($U_{MRR, SR, TWR}$) with SN data

мальности этих значений для эффективной обработки.

При анализе влияния тока в зазоре (I_g) использовали три уровня: 8, 12 и 16. Отмечено, что отношение S/N монотонно возрастает с увеличе-

нием тока разряда. Более высокие значения тока ($I_g = 16$) приводят к увеличению эффективности, что, вероятно, обусловлено более высокой скоростью удаления материала. Однако следует учитывать, что чрезмерно высокий ток может приводить к увеличению шероховатости поверхности и износу инструмента. При рассмотрении влияния напряжения в зазоре (V_g) использовали уровни 40, 55 и 70. Отмечено значительное снижение отношения S/N с увеличением напряжения в межэлектродном зазоре. Более низкие значения V_g (уровень 40) приводят к лучшему отношению S/N, что, вероятно, связано с повышением стабильности искрового разряда и более контролируемой энергией разряда. Длительность импульса (T_{on}) варьировали в диапазоне от 13 до 38 мкс (с промежуточным значением 26 мкс). Анализ графика демонстрирует незначительное увеличение отношения S/N с увеличением T_{on} . Более длительный импульс ($T_{on} = 38$ мкс) потенциально может улучшить скорость удаления материала при сохранении требуемого качества поверхности. Варьирование интервала между импульсами (T_{off}) осуществляли путем выбора одного из следующих уровней: 5, 7 и 9. Установлено, что увеличение T_{off} приводит к снижению отношения S/N. Более короткое время выключения импульса ($T_{off} = 5$) способствует увеличению отношения S/N, что, вероятно,

связано с сокращением времени простоя и повышением эффективности искрового разряда.

Наиболее существенное влияние на отношение S/N оказывает напряжение в зазоре (V_g), что подтверждается максимальным наклоном линии главных эффектов. Ток в межэлектродном зазоре (I_g) и длительность импульса (T_{on}) также оказывают заметное влияние, хотя их тенденции выражены в меньшей степени, чем для V_g . Время выключения импульса (T_{off}) и электропроводность заготовки (WEC) оказывают относительно меньшее влияние, однако их вклад также следует учитывать при оптимизации общей производительности процесса. Оптимальные настройки параметров процесса, определенные на основе максимизации отношения S/N, представлены в табл. 8.

Оптимизация электропроводности заготовки (WEC), тока в межэлектродном зазоре (I_g) и напряжения в межэлектродном зазоре (V_g) является критически важной для достижения более высокого отношения S/N, отражающего улучшение общей эффективности. Неправильная настройка напряжения в межэлектродном зазоре (V_g) или интервала между импульсами (T_{off}) может привести к значительному ухудшению производительности, что подчеркивает важность точного контроля параметров EDM.

В табл. 9 представлены результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для функции полезно-

Таблица 8

Table 8

Оптимальные параметры настройки для отношения сигнал/шум

Optimal setting parameter for SN data

№ п/п / Sl.No	Параметр / Parameter	Описание / Description
1	WEC (износ электрода-инструмента) / WEC	Уровень 4219 для оптимальной обработки / Level 4219 for optimal machining
2	I_g (сила тока в межэлектродном зазоре) / I_g	Уровень 16, поскольку использование большей силы тока улучшает удаление материала и сокращает время обработки / Level 16, as higher current improves material removal and reduces machining time
3	V_g (напряжение в межэлектродном зазоре) / V_g	Уровень 40, поскольку использование меньшего напряжения в межэлектродном зазоре повышает стабильность искры / Level 40, as lower gap voltage enhances spark stability
4	T_{on} (длительность импульса) / T_{on}	Уровень 38 указывает на то, что большая длительность импульса является предпочтительной / Level 38, indicating that longer pulse ON times are favorable
5	T_{off} (длительность паузы между импульсами) / T_{off}	Уровень 5 указывает на то, что меньшая длительность паузы между импульсами повышает эффективность обработки / Level 5, where shorter pulse OFF times maximize machining efficiency

ANOVA для функции полезности ($U_{MRR, SR, TWR}$) для отношения сигнал/шум
ANOVA for utility function ($U_{MRR, SR, TWR}$) for SN data

Источник / Source	DF (степени свободы) / <i>DF</i>	Seq SS (последо- вательная сумма квадра- тов) / <i>Seq SS</i>	Adj SS (скоррек- тированная сумма квадратов) / <i>Adj SS</i>	Adj MS (скоррек- тированный средний квадрат) / <i>Adj MS</i>	<i>F</i> -отно- шение (отно- шение Фишера) / <i>F-ratio</i>	<i>P</i> -значение (вероят- ность ошибки первого рода) / <i>P-values</i>	Процент вклада / % <i>con- tribution</i>
I_g (сила тока в межэлектродном зазоре) / I_g	2	3,141	3,141	1,5707	3,94	0,051	5,344
V_g (напряжение в межэлектродном зазоре) / V_g	2	49,435	49,435	24,7174	61,96	0,000	84,102
T_{off} (длительность паузы между импульсами) / T_{off}	2	1,816	1,816	0,9082	2,28	0,149	3,089
Остаточная ошибка / Residual error	11	4,388	4,388	0,3989	—	—	7,465
Total	17	58,780	—	—	—	—	100
$S = 0,6316$; $R^2 = 92,5 \%$; R^2 (скорр.) = 88,5 % / $S = 0.6316$; $R\text{-Sq} = 92.5 \%$; $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 88.5 \%$							

сти, которая объединяет несколько показателей эффективности (MRR, TWR, SR) и полученных на основе данных S/N. Анализ позволяет оценить вклад и статистическую значимость параметров процесса в общую эффективность. Ниже приведена подробная интерпретация результатов ANOVA.

Каждый параметр процесса (I_g , V_g , T_{off}) имеет две степени свободы (DoF), что соответствует числу уровней, использованных в эксперименте, за вычетом единицы. Остаточная ошибка характеризуется одиннадцатью степенями свободы, представляющими вариативность, не объясненную исследуемыми факторами. Общее количество степеней свободы составляет 17, что соответствует сумме степеней свободы для всех факторов и остаточной ошибки. Последовательная сумма квадратов (Sequential Sum of Squares) отражает вклад каждого фактора в общую вариативность функции полезности. Напряжение в зазоре (V_g) вносит наибольший вклад в вариативность (49,435), что подтверждает его значительное влияние на эффективность. Ток в межэлек-

тродном зазоре (I_g) оказывает умеренное влияние на эффективность (3,141). Вклад интервала между импульсами (T_{off}) является наименьшим среди трех рассматриваемых факторов (1,816).

Скорректированная сумма квадратов (Adj SS – Adjusted Sum of Squares) отражает долю вариативности, объясненную каждым фактором, с учетом влияния других факторов в модели.

Скорректированный средний квадрат (Adj MS – Adjusted Mean Squares) вычисляется путем деления Adj SS на соответствующие степени свободы (DoF) и представляет собой оценку среднего вклада каждого фактора в общую вариативность функции полезности.

F-отношение (*F*-ratio) представляет собой отношение Adj MS для каждого фактора к среднему квадрату остаточной ошибки (MSE – Mean Square of Error). *F*-отношение используется для оценки статистической значимости каждого фактора, т. е. для проверки гипотезы о том, что фактор оказывает влияние на отклик.

P-значение (*P*-value) используется для проверки нулевой гипотезы о том, что рассматри-

ваемый фактор не оказывает статистически значимого влияния на функцию полезности. Если P -значение меньше выбранного уровня значимости (обычно $\alpha = 0,05$), то нулевая гипотеза отвергается и делается вывод о статистической значимости фактора.

На основе результатов ANOVA напряжение в зазоре (V_g) является статистически значимым фактором ($P < 0,001$), что указывает на его существенное влияние на функцию полезности. Разрядный ток (I_g) проявляет незначительную статистическую значимость ($P = 0,051$). Интервал между импульсами (T_{off}) не является статистически значимым фактором ($P = 0,149$).

Анализ вклада факторов показывает, что напряжение в зазоре (V_g) оказывает доминирующее влияние на функцию полезности, объясняя 84,102 % общей вариативности. Вклад тока разряда (I_g) составляет 5,344 %, а вклад интервала между импульсами (T_{off}) – 3,089 %.

Остаточная ошибка, составляющая 7,465 %, объясняет необъяснимую вариативность в данных. Стандартное отклонение остаточной ошибки ($S = 0,6316$) характеризует адекватность модели, при этом более низкие значения указывают на лучшее соответствие. Коэффициент детерминации R^2 (R -Sq), равный 92,5 %, указывает на то, что модель объясняет значительную долю общей изменчивости данных. Скорректированный коэффициент детерминации R^2 (скорр.), или R -Sq(adj), равный 88,5 % и учитывающий количество предикторов в модели, незначительно ниже, но остается высоким, что свидетельствует о том, что выбранная модель хорошо подходит.

Наибольшее влияние на функцию полезности оказывает напряжение в зазоре (V_g), вклад которого составляет 84,102 %. Низкое P -значение ($< 0,001$) указывает на статистически значимое влияние V_g на уровне значимости $\alpha = 0,05$. Таким образом, оптимизация напряжения в межэлектродном зазоре является ключевым фактором для повышения производительности EDM. Разрядный ток (I_g) оказывает умеренное влияние, его вклад составляет 5,344 %. P -значение, равное 0,051, предполагает, что I_g оказывает незначительное влияние на уровне значимости $\alpha = 0,05$. Увеличение тока в межэлектродном зазоре может способствовать увеличению скорости удаления материала, однако следует принимать во внимание снижающееся при этом качество

поверхности. Вклад интервала между импульсами (T_{off}) в функцию полезности минимален и составляет всего 3,089 %. Его P -значение, равное 0,149, указывает на то, что он статистически не значим. Хотя настройки T_{off} менее важны, они все же могут влиять на эффективность и время обработки. Остаточная ошибка составляет 7,465 % вариативности, это может быть связано с шумом или неучтенными факторами в модели. Модель объясняет 92,5 % вариативности (R -Sq) с высоким Adj R -Sq 88,5 %. Это указывает на то, что функция полезности и параметры процесса хорошо представлены моделью.

С учетом того, что напряжение в зазоре (V_g) оказывает наибольшее влияние и является статистически значимым параметром, его оптимизация имеет решающее значение для повышения производительности EDM. Ток разряда (I_g) также влияет на эффективность, хотя и в меньшей степени. Интервал между импульсами (T_{off}) оказывает минимальное влияние и, возможно, не требует интенсивной оптимизации.

Для анализа влияния параметров процесса на объединенные показатели эффективности (MRR, SR и TWR) использовалась функция полезности, рассчитанная на основе данных S/N. В табл. 10 представлены средние значения функции полезности для различных значений параметров процесса: тока в межэлектродном зазоре (I_g), напряжения в межэлектродном зазоре (V_g) и интервала между импульсами (T_{off}). Каждая строка таблицы содержит среднее значение функции полезности, вычисленное для заданных уровней соответствующего фактора.

Анализ средних значений функции полезности для различных уровней тока в зазоре (I_g) показывает следующие результаты: 10,108 (уровень 1), 10,570 (уровень 2) и 11,130 (уровень 3). Диапазон изменений (Delta), равный 1,022, позволяет оценить чувствительность функции полезности к изменениям I_g . Ранг 2 указывает на умеренное влияние I_g на объединенные показатели эффективности.

Средние значения функции полезности для уровней напряжения в зазоре (V_g) составили 12,470 (уровень 1), 10,903 (уровень 2) и 8,444 (уровень 3). Максимальный диапазон изменений Delta для V_g составляет 4,026, что позволяет определить V_g как наиболее значимый параметр, определяющий функцию полезности (ранг 1).

Таблица откликов с функцией полезности ($U_{MRR, SR, TWR}$), относящейся к данным сигнал/шум
 Response table with utility function ($U_{MRR, SR, TWR}$) pertaining to SN data

Уровень / Level	I_g (сила тока в межэлектродном зазоре) / I_g	V_g (напряжение в межэлектродном зазоре) / V_g	T_{off} (длительность паузы между импульсами) / T_{off}
1	10,10	12,47	10,96
2	10,57	10,90	10,65
3	11,13	8,44	10,19
Разница / Delta	1,02	4,02	0,77
Ранг / Rank	2	1	3

Анализ влияния интервала между импульсами (T_{off}) показывает, что средние значения функции полезности для уровней 1, 2 и 3 составляют 10,969, 10,653 и 10,195 соответственно. Значение Delta, равное 0,774, является наименьшим среди всех рассматриваемых параметров, это указывает на минимальное влияние T_{off} на функцию полезности. Ранг 3 подтверждает, что T_{off} представляет собой наименее значимый фактор для объединенных показателей эффективности.

Таким образом, анализ функции полезности показывает, что напряжение в межэлектродном зазоре (V_g) является наиболее важным фактором, влияющим на объединенные отклики (MRR, TWR, SR). Наибольшее значение Delta (4,026) подтверждает доминирующее влияние V_g . Вторым по значимости фактором является ток в зазоре (I_g), для которого значение Delta составляет 1,022. Влияние интервала между импульсами (T_{off}) на функцию полезности минимально (Delta = 0,774).

На основании полученных результатов оптимизация напряжения в межэлектродном зазоре (V_g) должна быть приоритетной задачей для повышения общей эффективности процесса EDM. Далее следует оптимизация тока в зазоре (I_g), в то время как изменение интервала между импульсами (T_{off}) оказывает относительно небольшое влияние на общую эффективность. Напряжение является критически важным параметром, поскольку оно оказывает непосредственное влияние на скорость удаления материала (MRR), а также на показатели шероховатости поверхности (SR) и износа инструмента (TWR). Хотя

ток разряда (I_g) также влияет на производительность, его эффект менее выражен по сравнению с влиянием напряжения в межэлектродном зазоре (V_g). Изменение интервала между импульсами (T_{off}) оказывает незначительное влияние на общую работу системы.

Влияние параметров процесса на функцию полезности с необработанными данными

Анализ главных эффектов на основе средних значений функции полезности, полученных в эксперименте, позволяет оценить влияние технологических параметров на эффективность электроэрозионной обработки (EDM). График главных эффектов демонстрирует оптимальные диапазоны значений параметров (рис. 4).

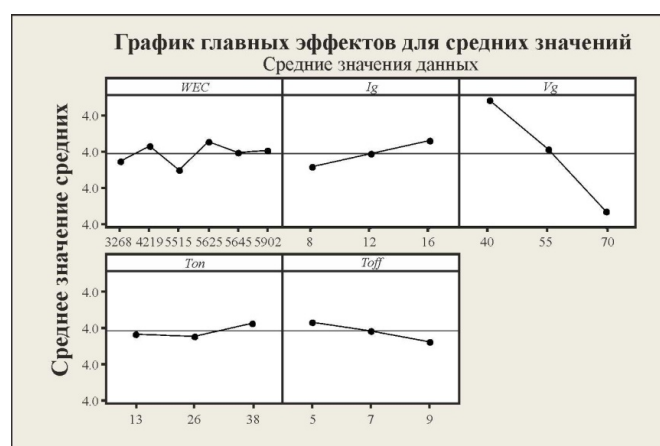


Рис. 4. Влияние технологических переменных на функцию полезности ($U_{MRR, SR, TWR}$) с использованием необработанных данных

Fig. 4. Impact of process variables for utility function ($U_{MRR, SR, TWR}$) with raw data

Состав проволоки (WEC) (уровни 3268, 4219, 5515, 5625, 5645, 5902): среднее значение полезности колеблется в зависимости от уровня WEC. Наивысшее среднее значение наблюдается на уровне 4219, т. е. этот состав является оптимальным для достижения наибольшей эффективности. Наименьшее среднее значение наблюдается на уровне 5515, что указывает на неоптимальный материал проволоки для эффективности обработки.

Ток в межэлектродном зазоре (I_g) (уровни 8, 12, 16): среднее значение полезности неуклонно возрастает с увеличением тока. Более высокий ток (16) приводит к лучшей производительности, вероятно, за счет более быстрого удаления материала и повышения эффективности. Более низкий ток (8) приводит к снижению производительности, возможно, из-за недостаточной энергии искры для эффективной обработки.

Напряжение в межэлектродном зазоре (V_g) (уровни 40, 55, 70): среднее значение полезности значительно снижается с увеличением напряжения. Более низкое напряжение (40) обеспечивает наивысшее среднее значение, вероятно, благодаря улучшенной стабильности искры и уменьшению дугообразования. Более высокие напряжения (70) снижают производительность, возможно, из-за нестабильных условий разряда и плохого управления обработкой.

Длительность импульса (T_{on}) (уровни 13, 26, 38): среднее значение полезности незначительно увеличивается с увеличением времени включения импульса. Более высокий уровень (38), как

и большая длительность импульса, может повысить эффективность удаления материала. Более низкие уровни (13) приводят к незначительному снижению производительности, потенциально из-за недостаточной длительности разряда.

Интервал между импульсами (T_{off}) (уровни: 5, 7, 9): среднее значение полезности уменьшается с увеличением интервала между импульсами. Более короткий интервал между импульсами (5) максимизирует значение полезности, вероятно, за счет сокращения времени простоя и повышения эффективности обработки. Более длинный интервал между импульсами (9) снижает производительность, возможно, из-за уменьшения частоты разрядов.

Параметры с наиболее заметным влиянием – это WEC, V_g и T_{off} , поскольку они демонстрируют наибольшие колебания функции полезности. I_g и T_{on} имеют относительно умеренное влияние со стабильным улучшением по мере увеличения их уровней. Оптимальная эффективность достигается при низких значениях V_g и T_{off} (обеспечивающих стабильность разряда) и высоких значениях I_g и T_{on} (обеспечивающих эффективное удаление материала).

Оптимальные параметры, основанные на максимальном значении функции полезности, представлены в табл. 11. Наиболее эффективным составом проволоки (WEC) является 4219. Критическим параметром служит напряжение в межэлектродном зазоре (V_g), низкие значения которого обеспечивают стабильность процесса. Оптимизация I_g и T_{on} позволяет повысить ско-

Таблица 11

Table 11

Оптимальные параметры настройки для необработанных данных

Optimal setting parameter for raw data

№ п/п / Sl. No	Параметр / Parameter	Описание / Description
1	WEC	Уровень 4219 (оптимальный состав проволоки) / Level 4219 (best wire composition)
2	I_g	Уровень 16 (более высокий ток разряда) / Level 16 (higher discharge current)
3	V_g	Уровень 40 (более низкое напряжение в межэлектродном зазоре) / Level 40 (lower gap voltage)
4	T_{on}	Уровень 38 (большая длительность импульса) / Level 38 (longer pulse-on time)
5	T_{off}	Уровень 5 (меньшая длительность паузы между импульсами) / Level 5 (shorter pulse OFF time)

рость удаления материала, а сокращение T_{off} увеличивает эффективность процесса. Подробные оптимальные параметры приведены в табл. 11.

В табл. 12 представлены сводные результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для функции полезности (U), которая объединяет множественные отклики по параметрам производительности – скорости удаления материала (U_{MRR}), шероховатости поверхности (SR) и скорости износа инструмента (TWR), полученным в экспериментах по электроэрозионной обработке (EDM). Независимыми переменными, влияющими на функцию полезности, являются ток в межэлектродном зазоре (I_g), напряжение в межэлектродном зазоре (V_g) и интервал между импульсами (T_{off}). DoF (степени свободы) представляет собой число независимых способов, которыми фактор может изменяться. Последовательная сумма квадратов (Seq SS) – это общая вариация, вносимая каждым фактором. Скорректированная сумма квадратов (Adj SS) скорректирована с учетом взаимодействий или других членов модели. Скорректированное среднее квадратическое отклонение (Adj MS) – это дисперсия каждого фактора, вычисляемая как

Adj SS / DoF. F -отношение (F -ratio) представляет собой отношение дисперсии фактора к остаточной дисперсии. Более высокие значения указывают на более сильное влияние. P -значение (P -value) указывает на статистическую значимость. Если $P < 0,05$, то фактор существенно влияет на отклик. Процентный вклад – это доля общей вариации, объясняемая каждым фактором.

Результаты ANOVA демонстрируют, что напряжение в межэлектродном зазоре (V_g) оказывает наиболее существенное влияние на функцию полезности ($F = 71,05$; $P < 0,001$; вклад = 85,98 %). Ток в межэлектродном зазоре (I_g) имеет умеренное влияние ($F = 3,94$; $P = 0,051$; вклад = 4,76 %). Влияние интервала между импульсами (T_{off}) статистически незначимо ($F = 2,14$; $P = 0,164$; вклад = 2,59 %).

Низкая остаточная ошибка (6,656 %) указывает на адекватность модели. Значение стандартного отклонения ($S = 0,2255$) свидетельствует о незначительной изменчивости данных и хорошем соответствии модели. Высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 93,3$ %) демонстрирует, что модель хорошо описывает вариацию функции полезности, а близость скорректированного

Таблица 12

Table 12

ANOVA для функции полезности ($U_{MRR, SR, TWR}$) для необработанных данных
ANOVA for utility function ($U_{MRR, SR, TWR}$) for raw data

Источник / Source	DoF (степени свободы) / DoF	Seq SS (последо- вательная сумма квадратов) / Seq SS	Adj SS (скоррек- тированная сумма квадратов) / Adj SS	Adj MS (скоррек- тированный средний квадрат) / Adj MS	F -отно- шение (отно- шение Фишера) / F -ratio	P -значение (вероят- ность ошибки первого рода) / P -values	Процент вклада / % cont- ribution
I_g (сила тока в межэлектродном зазоре) / I_g	2	0,4007	0,4007	0,20037	3,94	0,051	4,767
V_g (напряжение в межэлектродном зазоре) / V_g	2	7,2282	7,2282	3,61411	71,05	0,000	85,984
T_{off} (длительность паузы между импульсами) / T_{off}	2	0,2179	0,2179	0,10894	2,14	0,164	2,593
Остаточная ошибка / Residual error	11	0,5595	0,5595	0,05087	–	–	6,656
Total	17	8,4064	–	–	–	–	100
$S = 0,2255$; $R^2 = 93,3$ %; R^2 (скорр.) = 89,7 % / $S = 0.2255$; R -Sq = 93.3 %; R -Sq (adj) = 89.7 %							

коэффициента детерминации ($Adj R^2 = 89,7 \%$) к R^2 подтверждает отсутствие избыточных параметров в модели.

Таким образом, результаты ANOVA подчеркивают доминирующее влияние напряжения в межэлектродном зазоре (V_g) на функцию полезности. В то время как влияние тока в межэлектродном зазоре (I_g) является умеренным, его P -значение близко к уровню значимости, что указывает на его потенциальную важность. Интервал между импульсами (T_{off}) статистически незначим и оказывает минимальное влияние. Для оптимизации процессов EDM, направленных на максимизацию MRR и минимизацию SR и TWR, критически важным является точный контроль напряжения в межэлектродном зазоре (V_g). Влиянием T_{off} можно пренебречь, поскольку вариации этого параметра не оказывают существенного воздействия на эффективность обработки.

В табл. 13 представлено влияние параметров процесса I_g , V_g и T_{on} на объединенную функцию полезности, которая объединяет несколько откликов (MRR, SR и TWR) в один индекс. В табл. 13 отображены средние значения функции полезности для каждого уровня параметров.

Ток в межэлектродном зазоре (I_g). Функция полезности увеличивается с повышением уровня тока: 3,279 (уровень 1) $\rightarrow$ 3,464 (уровень 2) $\rightarrow$ 3,644 (уровень 3). Значение разницы (Delta = 0,365) указывает на умеренное влияние I_g на функцию полезности, что подтверждается его рангом (2).

Напряжение в межэлектродном зазоре (V_g). Функция полезности снижается с повышением

уровня напряжения: 4,207 (уровень 1) $\rightarrow$ 3,523 (уровень 2) $\rightarrow$ 2,658 (уровень 3). Значение разницы (Delta = 1,549) указывает на значительное влияние V_g на функцию полезности, что подтверждается его рангом (1).

Длительность импульса (T_{on}). Функция полезности незначительно снижается с повышением уровня времени: 3,593 (уровень 1) $\rightarrow$ 3,470 (уровень 2) $\rightarrow$ 3,324 (уровень 3). Минимальное значение разницы (Delta = 0,269) указывает на незначительное влияние T_{on} на функцию полезности, что подтверждается его рангом (3).

Таким образом, оптимизация напряжения в межэлектродном зазоре (V_g) является ключевым фактором для достижения оптимального сочетания MRR, SR и TWR. Оптимизация межэлектродного тока (I_g) также важна для повышения производительности. Изменения длительности импульса (T_{on}) оказывают незначительное влияние на общую производительность обработки.

Прогнозируемые оптимальные средние значения

На основе анализа главных эффектов для функции полезности ($U_{MRR, SR, TWR}$) были определены оптимальные значения технологических параметров. Прогнозируемое среднее значение функции полезности рассчитывается по уравнению

$$\mu_{MRR, TWR, SR} = \bar{B}_3 + \bar{C}_1 + \bar{E}_1 + 2\bar{T}, \quad (15)$$

где $\bar{T}$ (общее среднее значение функции полезности) = 3,462; $\bar{B}_3$ (среднее значение функции полезности для 3-го уровня тока в межэлект-

Таблица 13

Table 13

Таблица откликов с функцией полезности ($U_{MRR, SR, TWR}$), относящейся к необработанным данным
Response table with utility function ($U_{MRR, SR, TWR}$) pertaining to raw data

Уровень / Level	I_g (сила тока в межэлектродном зазоре) / I_g	V_g (напряжение в межэлектродном зазоре) / V_g	T_{off} (длительность паузы между импульсами) / T_{off}
1	3,27	4,20	3,59
2	3,46	3,52	3,47
3	3,64	2,65	3,32
Разница / Delta	0,36	1,54	0,26
Ранг / Rank	2	1	3



родном зазоре) = 3,644; $\bar{C}_1$ (среднее значение функции полезности для 1-го уровня напряжения в межэлектродном зазоре) = 4,207; $\bar{E}_1$ (среднее значение функции полезности для 1-го уровня интервала между импульсами) = 3,593.

Для оценки точности прогноза были рассчитаны 95%-е доверительные интервалы по уравнениям (9) и (10):

$$CI_{CE} = \pm 0,3376 \quad \text{и} \quad CI_{pop} = \pm 0,1787.$$

Оценочный доверительный интервал для валидационных экспериментов:

$$\begin{aligned} & \text{Mean}_{\mu_{MRR, TWR, SR}} - CI_{CE} < \\ & < \mu_{MRR, TWR, SR} < \text{Mean}_{\mu_{MRR, TWR, SR}} + CI_{CE}; \\ & 4,1824 < \mu_{MRR, TWR, SR} < 4,8575; \end{aligned}$$

95%-е доверительные интервалы для совокупностей:

$$\begin{aligned} & \text{Mean}_{\mu_{MRR, TWR, SR}} - CI_{pop} < \\ & < \mu_{MRR, TWR, SR} < \text{Mean}_{\mu_{MRR, TWR, SR}} + CI_{pop}; \\ & 4,3413 < \mu_{MRR, TWR, SR} < 4,6987. \end{aligned}$$

CI_{CE} отражает ожидаемый разброс результатов в процессе подтверждения. Интервалы CI_{CE} шире, чем CI_{pop} , потому что валидационные эксперименты основаны на уменьшенном размере выборки. Более широкий интервал указывает на большую вариативность экспериментальных данных. С вероятностью 95 % истинное среднее значение результатов подтверждающих экспериментов находится в диапазоне от 4,1824 до 4,8576.

CI_{pop} отражает естественную вариативность в генеральной совокупности. Более узкий интервал свидетельствует о более высокой точности и меньшей изменчивости данных. С вероятностью 95 % истинное среднее значение функции полезности для генеральной совокупности находится в диапазоне от 4,3413 до 4,6987.

Значительное перекрытие интервалов CI_{CE} и CI_{pop} указывает на статистическое соответствие экспериментальных результатов прогнозируемым значениям.

Валидационные эксперименты

Последним шагом является проверка идеальных уровней параметров процесса путем проведения валидационных экспериментов с оптимальными значениями переменных. Экспе-

рименты проводили три раза и получили следующие результаты: средняя скорость удаления материала (MRR) составила 8,852 мм³/мин, средняя шероховатость поверхности (SR) – 2,818 мкм, а средняя скорость износа инструмента (TWR) – 0,148 мм³/мин. Для вычисления значения полезности использовали следующее выражение:

$$U = P_{MRR} W_{MRR} P_{SR} W_{SR} P_{TWR} W_{TWR}; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} U &= 8,4434 \cdot 0,33 \cdot 4,7987 \cdot 0,33 \times \\ &\times 1,2352 \cdot 0,33 = 4,7775. \end{aligned}$$

Эмпирически полученное значение полезности находится в пределах 95 % доверительного интервала диапазона полезности, оцененного для функции полезности ($U_{MRR, SR, TWR}$).

Определенные результаты MRR, полученные в трех сериях экспериментов, демонстрируют высокую согласованность, что подтверждает стабильность выбранных параметров процесса (табл. 14). Полученные значения MRR свидетельствуют об эффективном удалении материала при стабильном управлении другими характеристиками производительности. Незначительные колебания MRR между сериями экспериментов обусловлены изменениями энергии разряда и неоднородностью свойств материала. Узкий диапазон значений шероховатости поверхности демонстрирует высокую стабильность процесса. Уменьшение шероховатости до 2,8 мкм указывает на улучшение качества поверхности, что важно для прецизионных деталей, требующих минимальной постобработки. Выбранные параметры обеспечивают эффективную оптимизацию качества поверхности, о чем свидетельствуют небольшие отклонения между сериями экспериментов. Низкое значение TWR (0,148 мм³/мин) положительно влияет на срок службы электрода и снижает стоимость обработки. Небольшие колебания TWR связаны с изменениями энергии разряда и распределением компонентов материала заготовки.

Валидационные эксперименты продемонстрировали, что оптимизированные параметры процесса обеспечивают ожидаемые результаты. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с прогнозируемыми значениями, это подтверждает надежность использованного метода оптимизации. Сочетание высоких значений MRR и низких значений SR и TWR свидетельствует о том, что выбранный режим EDM

Таблица 14

Table 14

Результаты верификационных экспериментов с использованием оптимальных значений технологических переменных

Findings of confirmation experiments using optimal values of process variables

Параметр отклика / Response parameter	Оптимальные значения технологических переменных / Optimal values of process variables	Полученное экспериментальное значение / Obtained experimental value			Среднее значение / Average value
		R1	R2	R3	
MRR, мм ³ /мин / MRR (mm ³ /min)	A ₂ B ₃ C ₁ D ₃ E ₁	8,825	8,898	8,832	8,852
SR, мкм / SR (μm)		2,812	2,829	2,813	2,818
TWR, мм ³ /мин / TWR (mm ³ /min)		0,143	0,154	0,147	0,148

обеспечивает эффективную и высококачественную обработку, подходящую для компонентов автомобильной и аэрокосмической промышленности, к которым предъявляются высокие требования.

Заключение

Исследование предоставило исчерпывающий анализ влияния параметров процесса на функцию полезности, сочетающую скорость удаления материала (MRR), шероховатость поверхности (SR) и скорость износа инструмента (TWR) при электроэрозионной обработке (EDM).

Анализ экспериментальных результатов показал, что наивысшие показатели MRR получены в ходе проведения экспериментов № 5 и 9 (9,076 и 8,995 мм³/мин соответственно) и соответствующие отношения сигнал/шум (S/N) – 19,1572 и 19,0883 дБ. Использование параметров процесса в экспериментах № 1 и 16 привело к наименьшим значениям MRR (2,096 и 2,805 мм³/мин), что указывает на неэффективное удаление материала. В ходе выполнения эксперимента № 1 было получено оптимальное качество поверхности (SR1 = 2,238 мкм, SR2 = 2,244 мкм, SR3 = 2,242 мкм) и максимальное отношение S/N (–7,0101 дБ). В то же время при реализации эксперимента № 3 было обнаружено низкое качество поверхности из-за высоких значений шероховатости (SR1 = 3,704 мкм, SR2 = 3,716 мкм и SR3 = 3,712 мкм), вызванных, вероятно, значительным износом инструмента

и высокой энергией разряда (S/N = –11,3890 дБ). Минимальная ширина зоны термического влияния (TWR) была достигнута в эксперименте № 10 (0,041 мм³/мин) при высоком значении отношения S/N (27,6633 дБ). Наихудшие показатели TWR были отмечены в эксперименте № 6 (0,239 мм³/мин) при низком отношении S/N (12,4555 дБ).

Результаты подтвердили эффективность метода оптимизации, основанного на подходе Тагути, в определении оптимальных условий обработки для достижения максимальной скорости удаления материала (MRR) при минимизации шероховатости поверхности (SR) и скорости износа инструмента (TWR). Статистический анализ ANOVA подтвердил значительное влияние длительности импульса и интервала между импульсами, а также величины тока на результаты обработки. Полученные данные подчеркивают необходимость точного контроля параметров EDS для достижения оптимальных результатов.

Результаты исследования выявили, что оптимальные значения параметров процесса для каждого критерия (MRR, SR и TWR) отличаются. Использование теории полезности позволило разработать компромиссный подход, обеспечивающий сбалансированную производительность по всем критериям. Повышение тока приводит к увеличению скорости удаления материала, но при этом незначительно увеличивает шероховатость поверхности и износ инструмента. Значение напряжения в межэлек-

тродном зазоре оказывает наибольшее влияние на производительность процесса (84,102 % от общей функции полезности), при этом снижение напряжения способствует повышению стабильности разряда и улучшению качества обработки поверхности. Интервал между импульсами оказывает наименьшее влияние на общую производительность (3,089 %), а оптимальное значение параметра WEC (4219) обеспечивает наилучшие характеристики процесса и отношение S/N.

В ходе исследования установлено, что напряжение в межэлектродном зазоре (V_g) является доминирующим фактором, определяющим производительность EDM, за ним следует ток разряда (I_g). Влияние интервала между импульсами (T_{off}) оказалось незначительным. Высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 92,5$ %) свидетельствует о высокой надежности разработанной модели для прогнозирования оптимальных режимов обработки. Наилучшее сочетание параметров процесса было определено в ходе проведения эксперимента № 17, обеспечившего максимальное отношение S/N (13,098 дБ), в то время как наихудшие результаты были получены в ходе проведения эксперимента № 16. Достижение более высокого качества обработки является прямым следствием увеличения отношения S/N, что подтверждает эффективность предложенной стратегии оптимизации.

Таким образом, оптимизация напряжения в межэлектродном зазоре является ключевым фактором для достижения оптимальной производительности EDM. Увеличение тока разряда ускоряет процесс удаления материала, однако требует тщательного контроля для предотвращения чрезмерного износа инструмента. Продолжительность интервала между импульсами оказывает незначительное влияние на эффективность процесса, хотя более короткие интервалы могут способствовать повышению производительности. Использование теории полезности позволило объединить различные критерии производительности для определения оптимального режима обработки, обеспечивающего максимальную эффективность и высокое качество. Значение дельты для напряжения в межэлектродном зазоре (V_g) составило 4,026 для данных S/N и 1,549 для исходных данных, что подчеркивает его доминирующее влияние на функцию полезности.

Статистический анализ ANOVA выявил статистически значимое влияние ($P < 0,001$) напря-

жения в межэлектродном зазоре (V_g) на функцию полезности с уровнем вклада 85,98 %. Значения разницы (Delta) для межэлектродного тока (I_g) (1,022 для данных S/N и 0,365 для исходных данных) указали на его умеренное влияние, что подтверждается его 4,76%-м вкладом согласно ANOVA. Интервал между импульсами (T_{off}) оказал минимальное влияние на функцию полезности, о чем свидетельствуют его наименьшие значения разницы (Delta) (0,774 для данных S/N и 0,269 для исходных данных). Анализ ANOVA подтвердил незначительный вклад T_{off} (2,59 %) и его статистическую незначимость ($P = 0,164$).

В результате исследования установлено, что комбинация параметров процесса – WEC уровня 4219, I_g уровня 16, T_{on} уровня 38, V_g уровня 40 и T_{off} уровня 5 – обеспечивает оптимальное сочетание показателей MRR, SR и TWR. Снижение значений V_g и T_{off} способствует повышению стабильности разряда и увеличению эффективности обработки, в то время как повышение значений I_g и T_{on} приводит к увеличению скорости удаления материала. Высокая степень корреляции между входными параметрами и функцией полезности подтверждается высокими значениями коэффициентов детерминации ($R^2 = 93,3$ %, скорректированный $R^2 = 89,7$ %) статистической модели. Низкое значение остаточной ошибки (6,656 %) подтверждает точность прогнозирования параметров отклика разработанной моделью.

Верификационные эксперименты с использованием оптимизированных параметров процесса продемонстрировали высокую скорость удаления материала ($MRR = 8,852$ мм³/мин) и хорошее качество поверхности ($SR = 2,818$ мкм и $TWR = 0,148$ мм³/мин). Экспериментальные результаты находились в пределах 95 % доверительного интервала, что свидетельствует о надежности и устойчивости оптимизированных параметров обработки. В результате оптимизации удалось достичь высокой скорости удаления материала, а также минимизировать шероховатость поверхности и скорость изнашивания инструмента, что делает данный подход перспективным для применений, требующих высокой точности обработки.

Список литературы

1. Electrical discharge machining of nickel-based superalloys: a comprehensive review / P. Sharma,

- K. Kishore, M.K. Sinha, V. Singh // International Journal of Materials Engineering Innovation. – 2022. – Vol. 13 (3). – P. 157–190. – DOI: 10.1504/IJMATEI.2022.125119.
2. Principles and characteristics of different EDM processes in machining tool and die steels / J.E.A. Qudeiri, A. Zaiout, A.H.I. Mourad, M.H. Abidi, A. Elkaseer // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10 (6). – P. 2082. – DOI: 10.3390/app10062082.
3. Philip J.T., Mathew J., Kuriachen B. Transition from EDM to PMEDM—impact of suspended particulates in the dielectric on Ti6Al4V and other distinct material surfaces: a review // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 64. – P. 1105–1142. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.056.
4. Wire electrical discharge machining – a review / L. Slătineanu, O. Dodun, M. Coteață, G. Nagîț, I.B. Băncescu, A. Hrițuc // Machines. – 2020. – Vol. 8 (4). – P. 69. – DOI: 10.3390/machines8040069.
5. Recent trends and developments in the electrical discharge machining industry: a review / A.A. Kamenskikh, K.R. Muratov, E.S. Shlykov, S.S. Sidhu, A. Mahajan, Y.S. Kuznetsova, T.R. Ablyaz // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7 (6). – P. 204. – DOI: 10.3390/jmmp7060204.
6. Electrical discharge machining parameters and dielectric fluid: a review / B. Gugulothu, N. Aravindan, G. Widjaja, S.A. Lakshmanan, M. Suresh // Handbook of Research on Advanced Functional Materials for Orthopedic Applications. – 2023. – Vol. 137–147. – DOI: 10.4018/978-1-6684-7412-9.ch008.
7. Reviewing performance measures of the die-sinking electrical discharge machining process: challenges and future scopes / R.K. Shastri, C.P. Mohanty, S. Dash, K.M.P. Gopal, A.R. Annamalai, C.-P. Jen // Nanomaterials. – 2022. – Vol. 12 (3). – P. 384. – DOI: 10.3390/nano12030384.
8. Goyal A., Pandey A., Rahman H.U. Present and future prospective of shape memory alloys during machining by EDM/wire EDM process: a review // Sādhanā. – 2022. – Vol. 47 (4). – P. 217. – DOI: 10.1007/s12046-022-01999-9.
9. Jatti V.S. Multi-characteristics optimization in EDM of NiTi alloy, NiCu alloy and BeCu alloy using Taguchi's approach and utility concept // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – Vol. 57 (4). – P. 2807–2817. – DOI: 10.1016/j.aej.2017.11.004.
10. Effects of process parameters on the machining process in die-sinking EDM of alloyed tool steel / M.M. Bahgat, A.Y. Shash, M. Abd-Rabou, I.S. El-Mahallawi // Engineering Design Applications III: Structures, Materials and Processes. – Springer, 2020. – P. 215–233. – DOI: 10.1007/978-3-030-39062-4_19.
11. Multi-objective optimization for electric discharge drilling of waspaloy: a comparative analysis of NSGA-II, MOGA, MOGWO, and MOPSO / P.P. Harane, D.R. Unune, R. Ahmed, S. Wojciechowski // Alexandria Engineering Journal. – 2024. – Vol. 99. – P. 1–16. – DOI: 10.1016/j.aej.2024.04.049.
12. Surface integrity in metal machining – Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms / Z. Liao, A. la Monaca, J. Murray, A. Speidel, D. Ushmaev, A. Clare, D. Axinte, R. M'Saoubi // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2021. – Vol. 162. – P. 103687. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103687.
13. Ishfaq K., Farooq M.U., Pruncu C.I. Reducing the geometrical machining errors incurred during die repair and maintenance through electric discharge machining (EDM) // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 117 (9). – P. 3153–3168. – DOI: 10.1007/s00170-021-07846-1.
14. The versatility of the Taguchi method: Optimizing experiments across diverse disciplines / M.W. Hisam, A.A. Dar, M.O. Elrasheed, M.S. Khan, R. Gera, I. Azad // Journal of Statistical Theory and Applications. – 2024. – Vol. 23 (4). – P. 365–389. – DOI: 10.1007/s44199-024-00093-9.
15. Optimization of PMEDM process parameters for B₄C and B₄C+SiC reinforced AA7075 composites / G. Keskin, S. Salunkhe, G. Küçüktürk, M. Pul, H. Gürün, V. Baydaroğlu // Journal of Engineering Research. – 2025. – Vol. 13 (1). – P. 47–56. – DOI: 10.1016/j.jer.2023.09.012.
16. Multi-performance optimization in electrical discharge machining of Al₂O₃ ceramics using Taguchi base AHP weighted TOPSIS method / Y.-P. Zeng, C.-L. Lin, H.-M. Dai, Y.-C. Lin, J.-C. Hung // Processes. – 2021. – Vol. 9 (9). – P. 1647. – DOI: 10.3390/pr9091647.
17. Sahoo S.K., Thirupathi N., Saraswathamma K. Experimental investigation and multi-objective optimization of die sink EDM process parameters on Inconel-625 alloy by using utility function approach // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 24. – P. 995–1005. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.412.
18. Experimental analysis and optimization of EDM parameters on HcHcr steel in context with different electrodes and dielectric fluids using hybrid Taguchi-based PCA-utility and CRITIC-utility approaches / M. Patel Gowdru Chandrashekarappa, S. Kumar, J. Jagadish, D.Y. Pimenov, K. Giasin // Metals. – 2021. – Vol. 11 (3). – P. 419. – DOI: 10.3390/met11030419.
19. Machining of shape-memory alloys using electrical discharge machining with an elaborate study of optimization approaches: a review / S. Dutta, A.K. Singh, B. Paul, M.K. Paswan // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2022. – Vol. 44 (11). – P. 557. – DOI: 10.1007/s40430-022-03826-y.
20. Singh R., Singh R.P., Trehan R. Machine learning algorithms based advanced optimization of EDM parameters: an experimental investigation into

shape memory alloys // *Sensors International*. – 2022. – Vol. 3. – P. 100179. – DOI: 10.1016/j.sintl.2022.100179.

21. Machinability assessment of shape memory alloy nitinol during WEDM operation: application potential of Taguchi based AHP–DFA technique / H. Majumder, A. Khan, D.K. Naik, C.S. Kumar // *Surface Review and Letters*. – 2022. – Vol. 29 (01). – P. 2250002. – DOI: 10.1142/S0218625X22500020.

22. Gupta D.K., Dubey A.K. Multi process parameters optimization of Wire-EDM on shape memory alloy (Ni_{54.1}Ti) using Taguchi approach // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 44. – P. 1423–1427. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.628.

23. Gangele A., Mishra A. Surface roughness optimization during machining of NiTi shape memory alloy by EDM through Taguchi's technique // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 29. – P. 343–347. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.287.

24. Multi-objective optimization of electrical discharge machining process during machining of NiTi alloy using Taguchi and utility concept / V.S. Gaikwad, V.S. Jatti, P.J. Pawar, K.N. Nandurkar // *Techno-Societal 2018: Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Technologies for Societal Applications*. – Springer International Publishing, 2020. – Vol. 2. – P. 479–489. – DOI: 10.1007/978-3-030-16962-6_49.

25. Determination of the optimum conditions for machining NiTi shape memory alloys by electrical discharge machining / S. Güven, M. Yilmaz, H. Gökaya, E. Nas // *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*. – 2024. – Vol. 105 (5). – P. 1035–1046. – DOI: 10.1007/s40032-024-01099-z.

26. Analysis of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of NiTi shape memory alloy with uncoated tools / E. Altas, H. Gokkaya, M. Karatas, D. Ozkan // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10 (12). – P. 1259. – DOI: 10.3390/coatings10121259.

27. Singh R., Singh R.P., Trehan R. State of the art in processing of shape memory alloys with electrical discharge machining: a review // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2021. – Vol. 235 (3). – P. 333–366. – DOI: 10.1177/0954405420958771.

28. Saoud F.B., Korkmaz M.E. A review on machinability of shape memory alloys through traditional and non-traditional machining processes: a review // *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*. – 2022. – Vol. 3 (1). – P. 14–32. – DOI: 10.52795/mateca.1080941.

29. Al-Mousawi M.A., Al-Shafaie S.H., Khulief Z.T. Modeling and analysis of process parameters in EDM of Ni₃₅Ti₃₅Zr₁₅Cu₁₀Sn₅ high-temperature high entropy shape memory alloy by RSM approach // *Manufacturing Review*. – 2024. – Vol. 11. – P. 4. – DOI: 10.1051/mfreview/2024002.

30. Gaikwad V., Jatti V.S. Optimization of material removal rate during electrical discharge machining of cryo-treated NiTi alloys using Taguchi's method // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. – 2018. – Vol. 30 (3). – P. 266–272. – DOI: 10.1016/j.jksues.2016.04.003.

31. Surface roughness and surface crack length prediction using supervised machine learning-based approach of electrical discharge machining of deep cryogenically treated NiTi, NiCu, and BeCu alloys / D.A. Sawant, V.S. Jatti, A. Mishra, E.M. Sefene, A.V. Jatti // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 128 (11–12). – P. 5595–5612. – DOI: 10.1007/s00170-023-12269-1.

32. Jatti V.S., Singh T.P. Optimization of tool wear rate during electrical discharge machining of advanced materials using Taguchi analysis // *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. – 2016. – Vol. 11. – P. 44–53.

33. Исследование электроэрозионной обработки криогенно обработанных бериллиево-медных сплавов (BeCu) / Д. Савант, Р. Булах, В. Джатти, С. Чинчаникар, А. Мишра, Э.М. Сефене // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2024. – Т. 26, № 1. – С. 175–193. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-175-193.

34. Bagane S., Jatti V.S., Singh T.P. Machinability study of beryllium copper by powder mixed electric discharge machining // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 787. – P. 376–380. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.787.376.

35. Sankar V., Arravind R., Manikandan D. Material synthesis, characterization, and machining performance of stir cast beryllium copper alloy composites // *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 43 (2). – P. 143–152. – DOI: 10.1139/tcsme-2018-0103.

36. Investigating the effect of cryogenic treatment of workpieces and tools on electrical discharge machining performance / V.S. Jatti, N.K. Khedkar, V.S. Jatti, P. Dhall // *AIMS Materials Science*. – 2022. – Vol. 9 (6). – DOI: 10.3934/matrscl.2022051.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Enhancement of EDM performance for NiTi, NiCu, and BeCu alloys using a multi-criteria approach based on utility function

Vijaykumar Jatti ^{1, a}, Vijayan Singarajan ^{2, b}, A. Saiyathibrahim ^{3, c},
 Vinaykumar Jatti ^{4, d}, Murali Krishnan ^{2, e, *}, Savita Jatti ^{5, f}

¹ School of Engineering and Applied Sciences, Bennett University, Noida, 201310, India

² Karpagam Institute of Technology, Coimbatore - 641105, Tamil Nadu, India

³ University Centre for Research and Development, Chandigarh University, 140413, Punjab, India

⁴ Symbiosis Institute of Technology, Symbiosis International (Deemed) University, Pune, 412115, Maharashtra, India

⁵ D Y Patil College of Engineering, Savitribai Phule Pune University, Pune, India

^a <https://orcid.org/0000-0001-7949-2551>, vijaykjatti@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0002-3636-7731>, s.n.vijayan@gmail.com;

^c <https://orcid.org/0000-0002-1968-0937>, imsaiyath@gmail.com; ^d <https://orcid.org/0000-0001-6016-0709>, vinay.jatti89@gmail.com;

^e <https://orcid.org/0009-0004-0107-0753>, murali15091990@gmail.com; ^f <https://orcid.org/0000-0001-5514-8078>, savitabirajdardyp@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 February 2025

Revised: 25 March 2025

Accepted: 27 March 2025

Available online: 15 June 2025

Keywords:

Boron carbide

EDM

Shape memory alloy

Multi-objective optimization

Taguchi

ANOVA and Utility concept

ABSTRACT

Introduction: Machining hard materials and shape memory alloys (SMAs), such as NiTi, NiCu, and BeCu, using conventional techniques is challenging due to excessive tool wear and poor surface finish. Non-conventional machining methods, particularly electrical discharge machining (EDM), offer improved precision and surface quality. However, the effectiveness of EDM is contingent upon the optimization of process parameters. The purpose of this study is to optimize EDM parameters to enhance the machining performance of SMAs by considering factors such as pulse-on time, pulse-off time, discharge current, gap voltage, and workpiece electrical conductivity. **Methods.** In this study, the Taguchi experimental design approach was employed to analyze the influence of key process parameters on the material removal rate (MRR), surface roughness (SR), and tool wear rate (TWR). Analysis of variance (ANOVA) was then applied to identify the most statistically significant factors affecting machining performance. A multi-objective optimization method, based on utility theory, was utilized to determine the optimal EDM settings that balance MRR, SR, and TWR. The results were validated through experimental trials. **Results and Discussion.** The experimental results indicated that Trial 15 achieved the highest MRR of 9.076 mm³/min, while Trial 1 produced the lowest SR of 2.238 µm. The minimum TWR of 0.041 mm³/min was observed in Trial 10, which contributes to increased tool lifespan. ANOVA revealed that gap voltage was the most influential factor, accounting for 85.98 % of the variation in machining performance, followed by discharge current (4.76 %) and pulse-off time (2.59 %). The multi-objective optimization process successfully identified parameter configurations that optimize MRR while minimizing SR and TWR. The prediction model developed in this study demonstrated high accuracy, with an R² value of 93.3% and an adjusted R² of 89.7%. Validation experiments confirmed the effectiveness of the optimized parameters, resulting in an average MRR of 8.852 mm³/min, SR of 2.818 µm, and TWR of 0.148 mm³/min. The findings presented herein confirm that careful optimization of EDM parameters significantly enhances the machining performance of SMAs, considerably improving machining efficiency and tool longevity.

For citation: Jatti V.S., Singarajan V., Saiyathibrahim A., Jatti V.S., Krishnan M.R., Jatti S.V. Enhancement of EDM performance for NiTi, NiCu, and BeCu alloys using a multi-criteria approach based on utility function. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 57–88. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-57-88. (In Russian).

References

1. Sharma P., Kishore K., Sinha M.K., Singh V. Electrical discharge machining of nickel-based superalloys: a comprehensive review. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 2022, vol. 13 (3), pp. 157–190. DOI: 10.1504/IJMATEI.2022.125119.

* Corresponding author

Krishnan Murali R., D.Sc. (Engineering), Assistant Professor
 Karpagam Institute of Technology,
 Coimbatore – 641105, Tamil Nadu, India
 Tel.: +91 9789339171, e-mail: murali15091990@gmail.com

2. Qudeiri J.E.A., Zaiout A., Mourad A.H.I., Abidi M.H., Elkaseer A. Principles and characteristics of different EDM processes in machining tool and die steels. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10 (6), p. 2082. DOI: 10.3390/app10062082.
3. Philip J.T., Mathew J., Kuriachen B. Transition from EDM to PMEDM—impact of suspended particulates in the dielectric on Ti6Al4V and other distinct material surfaces: a review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 64, pp. 1105–1142. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.056.
4. Slătineanu L., Dodun O., Coteață M., Nagiț G., Băncescu I.B., Hrițuc A. Wire electrical discharge machining – a review. *Machines*, 2020, vol. 8 (4), p. 69. DOI: 10.3390/machines8040069.
5. Kamenskikh A.A., Muratov K.R., Shlykov E.S., Sidhu S.S., Mahajan A., Kuznetsova Y.S., Ablyaz T.R. Recent trends and developments in the electrical discharge machining industry: a review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7 (6), p. 204. DOI: 10.3390/jmmp7060204.
6. Gugulothu B., Aravindan N., Widjaja G., Lakshmanan S.A., Suresh M. Electrical discharge machining parameters and dielectric fluid: a review. *Handbook of Research on Advanced Functional Materials for Orthopedic Applications*, 2023, vol. 137–147. DOI: 10.4018/978-1-6684-7412-9.ch008.
7. Shastri R.K., Mohanty C.P., Dash S., Gopal K.M.P., Annamalai A.R., Jen C.P. Reviewing performance measures of the die-sinking electrical discharge machining process: challenges and future scopes. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12 (3), p. 384. DOI: 10.3390/nano12030384.
8. Goyal A., Pandey A., Rahman H.U. Present and future prospective of shape memory alloys during machining by EDM/wire EDM process: a review. *Sādhanā*, 2022, vol. 47 (4), p. 217. DOI: 10.1007/s12046-022-01999-9.
9. Jatti V.S. Multi-characteristics optimization in EDM of NiTi alloy, NiCu alloy and BeCu alloy using Taguchi's approach and utility concept. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57 (4), pp. 2807–2817. DOI: 10.1016/j.aej.2017.11.004.
10. Bahgat M.M., Shash A.Y., Abd-Rabou M., El-Mahallawi I.S. Effects of process parameters on the machining process in die-sinking EDM of alloyed tool steel. *Engineering Design Applications III: Structures, Materials and Processes*. Springer, 2020, pp. 215–233. DOI: 10.1007/978-3-030-39062-4_19.
11. Harane P.P., Unune D.R., Ahmed R., Wojciechowski S. Multi-objective optimization for electric discharge drilling of waspaloy: a comparative analysis of NSGA-II, MOGA, MOGWO, and MOPSO. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, vol. 99, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.aej.2024.04.049.
12. Liao Z., la Monaca A., Murray J., Speidel A., Ushmaev D., Clare A., Axinte D., M'Saoubi R. Surface integrity in metal machining – Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, vol. 162, p. 103687. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103687.
13. Ishfaq K., Farooq M.U., Pruncu C.I. Reducing the geometrical machining errors incurred during die repair and maintenance through electric discharge machining (EDM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 117 (9), pp. 3153–3168. DOI: 10.1007/s00170-021-07846-1.
14. Hisam M.W., Dar A.A., Elrasheed M.O., Khan M.S., Gera R., Azad I. The versatility of the Taguchi method: Optimizing experiments across diverse disciplines. *Journal of Statistical Theory and Applications*, 2024, vol. 23 (4), pp. 365–389. DOI: 10.1007/s44199-024-00093-9.
15. Keskin G., Salunkhe S., Küçüktürk G., Pul M., Gürün H., Baydaroğlu V. Optimization of PMEDM process parameters for B₄C and B₄C+SiC reinforced AA7075 composites. *Journal of Engineering Research*, 2025, vol. 13 (1), pp. 47–56. DOI: 10.1016/j.jer.2023.09.012.
16. Zeng Y.P., Lin C.L., Dai H.M., Lin Y.C., Hung J.C. Multi-performance optimization in electrical discharge machining of Al₂O₃ ceramics using Taguchi base AHP weighted TOPSIS method. *Processes*, 2021, vol. 9 (9), p. 1647. DOI: 10.3390/pr9091647.
17. Sahoo S.K., Thirupathi N., Saraswathamma K. Experimental investigation and multi-objective optimization of die sink EDM process parameters on Inconel-625 alloy by using utility function approach. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 24, pp. 995–1005. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.412.
18. Patel Gowdru Chandrashekarappa M., Kumar S., Pimenov D.Y., Giasin K. Experimental analysis and optimization of EDM parameters on HcHcr steel in context with different electrodes and dielectric fluids using hybrid Taguchi-based PCA-utility and CRITIC-utility approaches. *Metals*, 2021, vol. 11 (3), p. 419. DOI: 10.3390/met11030419.
19. Dutta S., Singh A.K., Paul B., Paswan M.K. Machining of shape-memory alloys using electrical discharge machining with an elaborate study of optimization approaches: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, vol. 44 (11), p. 557. DOI: 10.1007/s40430-022-03826-y.
20. Singh R., Singh R.P., Trehan R. Machine learning algorithms based advanced optimization of EDM parameters: an experimental investigation into shape memory alloys. *Sensors International*, 2022, vol. 3, p. 100179. DOI: 10.1016/j.sintl.2022.100179.

21. Majumder H., Khan A., Naik D.K., Kumar C.S. Machinability assessment of shape memory alloy nitinol during WEDM operation: application potential of Taguchi based AHP–DFA technique. *Surface Review and Letters*, 2022, vol. 29 (01), p. 2250002. DOI: 10.1142/S0218625X22500020.
22. Gupta D.K., Dubey A.K. Multi process parameters optimization of Wire-EDM on shape memory alloy (Ni_{54.1}Ti) using Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 1423–1427. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.628.
23. Gangele A., Mishra A. Surface roughness optimization during machining of NiTi shape memory alloy by EDM through Taguchi's technique. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 29, pp. 343–347. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.287.
24. Gaikwad V.S., Jatti V.S., Pawar P.J., Nandurkar K.N. Multi-objective optimization of electrical discharge machining process during machining of NiTi alloy using Taguchi and utility concept. *Techno-Societal 2018: Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Technologies for Societal Applications*. Springer International Publishing, 2020, vol. 2, pp. 479–489. DOI: 10.1007/978-3-030-16962-6_49.
25. Güven S., Yilmaz M., Gökkaya H., Nas E. Determination of the optimum conditions for machining NiTi shape memory alloys by electrical discharge machining. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2024, vol. 105 (5), pp. 1035–1046. DOI: 10.1007/s40032-024-01099-z.
26. Altas E., Gokkaya H., Karatas M.A., Ozkan D. Analysis of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of NiTi shape memory alloy with uncoated tools. *Coatings*, 2020, vol. 10 (12), p. 1259. DOI: 10.3390/coatings10121259.
27. Singh R., Singh R.P., Trehan R. State of the art in processing of shape memory alloys with electrical discharge machining: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2021, vol. 235 (3), pp. 333–366. DOI: 10.1177/0954405420958771.
28. Saoud F.B., Korkmaz M.E. A review on machinability of shape memory alloys through traditional and non-traditional machining processes: a review. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2022, vol. 3 (1), pp. 14–32. DOI: 10.52795/mateca.1080941.
29. Al-Mousawi M.A., Al-Shafaie S.H., Khulief Z.T. Modeling and analysis of process parameters in EDM of Ni₃₅Ti₃₅Zr₁₅Cu₁₀Sn₅ high-temperature high entropy shape memory alloy by RSM approach. *Manufacturing Review*, 2024, vol. 11, p. 4. DOI: 10.1051/mfreview/2024002.
30. Gaikwad V., Jatti V.S. Optimization of material removal rate during electrical discharge machining of cryo-treated NiTi alloys using Taguchi's method. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2018, vol. 30 (3), pp. 266–272. DOI: 10.1016/j.jksues.2016.04.003.
31. Sawant D.A., Jatti V.S., Mishra A., Sefene E.M., Jatti A.V. Surface roughness and surface crack length prediction using supervised machine learning-based approach of electrical discharge machining of deep cryogenically treated NiTi, NiCu, and BeCu alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 128 (11–12), pp. 5595–5612. DOI: 10.1007/s00170-023-12269-1.
32. Jatti V.S., Singh T.P. Optimization of tool wear rate during electrical discharge machining of advanced materials using Taguchi analysis. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2016, vol. 11, pp. 44–53.
33. Sawant D., Bulakh R., Jatti V., Chinchani S., Mishra A., Sefene E.M. Issledovanie elektroerozionnoi obrabotki kriogenno obrabotannykh berillievo-mednykh splavov (BeCu) [Investigation on the electrical discharge machining of cryogenic treated beryllium copper (BeCu) alloys]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 1, pp. 175–193. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-175-193.
34. Bagane S., Jatti V.S., Singh T.P. Machinability study of beryllium copper by powder mixed electric discharge machining. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 787, pp. 376–380. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.787.376.
35. Sankar V., Arravind R., Manikandan D. Material synthesis, characterization, and machining performance of stir cast beryllium copper alloy composites. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2018, vol. 43 (2), pp. 143–152. DOI: 10.1139/tcsme-2018-0103.
36. Jatti V.S., Khedkar N.K., Jatti V.S., Dhall P. Investigating the effect of cryogenic treatment of workpieces and tools on electrical discharge machining performance. *AIMS Materials Science*, 2022, vol. 9 (6). DOI: 10.3934/mat.2022051.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.