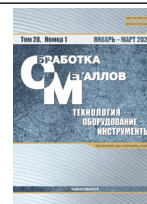




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Оценка устойчивости с использованием экои́декса для электроэрозионной обработки сплава Inconel 718 с применением гибридной Al_2O_3 -графеновой нанодиэлектрической жидкости

Пареш Кулкарни^{1, а}, Сатиш Чинчаникар^{2, в, *}

¹ Кафедра машиностроения, Международный университет имени Д.И. Патила, Акурди, Пуна, Махараштра, 411044, Индия

² Кафедра машиностроения, Технологический институт Вишвакарма, филиал Университета Савитрибай Пхуле Пуны, Пуна – 411037, Махараштра, Индия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-2761-8754>,  paresh2410@gmail.com; ^в  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchaniakar@vit.edu

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4:502.174:621.892.8

История статьи:

Поступила: 01 января 2026

Рецензирование: 14 января 2026

Принята к печати: 19 января 2026

Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Электроэрозионная обработка (ЭЭО)

Inconel 718

Устойчивое развитие

Нанодиэлектрическая жидкость

Экои́декс

АННОТАЦИЯ

Введение. Экологически устойчивая механическая обработка крайне важна для повышения экономической эффективности и ресурсоэффективности производственного сектора при одновременном снижении его негативного воздействия на окружающую среду. «Экои́декс» – это многокритериальный показатель, оценивающий устойчивость процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО) сплава Inconel 718 путем количественного определения его общего экологического и экономического воздействия с использованием нормализованного и взвешенного подхода. **Целью данной работы** является описание экои́декса для ЭЭО сплава Inconel 718. Экои́декс оценивает устойчивость через такие экологические показатели, как потребление энергии и материалов, образование отходов, выбросы и токсичность, а также экономические показатели, включая эксплуатационные и утилизационные затраты наряду с показателями производительности. Однако существует ограниченное количество исследований по оценке устойчивости с использованием экои́декса для ЭЭО сплава Inconel 718, обработанного с применением гибридной нанодиэлектрической жидкости. **Методика исследования.** В данном исследовании изучаются эксплуатационные характеристики обработки и экологическая устойчивость процесса ЭЭО сплава Inconel 718 при использовании гибридной диэлектрической жидкости с добавлением наночастиц. Гибридная нанодиэлектрическая жидкость была приготовлена методом диспергирования наночастиц Al_2O_3 и графена в равной пропорции (общая концентрация 0,1 %) в масле для ЭЭО согласно двухстадийному методу, включающему применение ПАВ (додецилсульфата натрия), магнитное перемешивание и ультразвуковую обработку для обеспечения стабильности суспензии. Эксперименты проводились на станке для ЭЭО с медным электродом при варьировании длительности импульса (50...150 мкс), пикового тока (3...10 А) и напряжения разряда (40...50 В). Ключевые выходные характеристики, включая скорость съема материала (MMR), шероховатость поверхности (Ra), интенсивность износа инструмента (TW), цилиндричность отверстия (ρ), потребление энергии (E) и взвешенный экои́декс (EI), были оценены для количественного определения совокупной производительности, качества и показателей устойчивости. **Результаты и обсуждение.** Результаты демонстрируют, что гибридная нанодиэлектрическая жидкость повышает общую эффективность ЭЭО по сравнению со стандартным маслом для ЭЭО за счет обеспечения более стабильного разряда, улучшенного теплоотвода и эффективного удаления продуктов эрозии. Это приводит к увеличению MRR, улучшению чистоты поверхности, снижению износа инструмента, уменьшению отклонения от цилиндричности обработанного отверстия и сокращению энергопотребления, что для большинства режимов обработки ведет к более высокому значению экои́декса. Анализ целостности поверхности с помощью СЭМ выявил существенное уменьшение толщины повторно затвердевшего слоя, которая сократилась с 17,05 мкм (стандартное масло) до 3,91 мкм (гибридная нанодиэлектрическая жидкость), что свидетельствует о снижении термического повреждения и вторичного оплавления. EDX-анализ дополнительно подтвердил наличие наночастиц по обогащенному углеродному сигналу (осаждение графена) и наличию пиков Al-O (вклад оксида алюминия), что подтверждает предложенные механизмы улучшения стабильности плазмы и снижения металлического переосаждения. В целом гибридная диэлектрическая жидкость на основе наночастиц Al_2O_3 и графена обеспечивает эффективный и экологически устойчивый метод электроэрозионной обработки сплава Inconel 718, при этом достигается оптимальный баланс между точностью обработки, производительностью и экологической эффективностью процесса.

Для цитирования: Кулкарни П., Чинчаникар С. Оценка устойчивости с использованием экои́декса для электроэрозионной обработки сплава Inconel 718 с применением гибридной Al_2O_3 -графеновой нанодиэлектрической жидкости // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 81–100. – DOI:10.17212/1994-6309-2026-28-1-81-100.

Введение

Жаропрочные сплавы, такие как Inconel 718, широко применяются в химической промышленности, аэрокосмической и судостроительной отраслях благодаря исключительной прочности, стойкости к ползучести и коррозионной

*Адрес для переписки

Чинчаникар Сатиш, д.т.н., профессор
Кафедра машиностроения,
Технологический институт Вишвакарма,
филиал Университета Савитрибай Пхуле Пуны,
Пуна – 411037, Махараштра, Индия
Тел.: +91-2026950401, e-mail: satish.chinchaniakar@vit.edu

долговечности при повышенных температурах. Однако обработка этих сплавов традиционными методами затруднена из-за их низкой теплопроводности и высокой твердости, что приводит к чрезмерному износу инструмента, низкому качеству поверхности и малой скорости съема материала. Целостность обработанной поверхности критически важна для деталей из сплава Inconel 718, поскольку дефекты, возникшие в процессе механической обработки, могут инициировать усталостные трещины при эксплуатации [1].

Электроэрозионная обработка (ЭЭО, electrical discharge machining, EDM) – широко применяемый нетрадиционный процесс для получения прецизионных и сложных элементов в труднообрабатываемых материалах. Последние исследования показывают, что добавление порошка графена в деионизированную воду, используемую в качестве диэлектрика для ЭЭО, может значительно улучшить обрабатываемость титановых сплавов. Наличие графена способствует образованию пузырьков, что модифицирует характеристики разряда, тем самым облегчая съем материала, улучшая чистоту поверхности и снижая износ электрода [2]. Помимо точных работ ЭЭО все чаще применяется для съема значительных объемов материала, особенно в случае жаропрочных сплавов, которые сложно обрабатывать традиционными методами. Например, установлено, что ЭЭО сплава Inconel 825 с диэлектрическими жидкостями, содержащими многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), графен или их смеси, повышает производительность. Эти нанодобавки улучшают скорость съема материала, качество поверхности и приводят к формированию более тонкого и менее дефектного повторно затвердевшего слоя благодаря отличной дисперсности и высокой теплопроводности графена [3].

Показано, что добавление оксида графена (GO) в стандартную диэлектрическую жидкость улучшает характеристики ЭЭО для сплавов группы нимоников. Использование наноусиленной диэлектрической среды с медным электродом существенно увеличивает скорость съема материала (MRR), снижает износ инструмента (TW) и улучшает качество поверхности, что указывает на повышение эффективности обработки и стабильности процесса [4]. Аналогично применение графенсодержащей наножидкости

в качестве диэлектрика для ЭЭО сплава Inconel 718 привело к увеличению скорости съема материала, снижению износа электрода и получению более качественной поверхности, что объясняется высокой теплопроводностью графена и стабильными характеристиками искрообразования. СЭМ-анализ выявил меньшее количество микротрещин и более гладкие поверхности по сравнению с результатами, полученными при использовании обычного диэлектрика [5].

Добавление нанопорошка графена также оказалось эффективным при микро-ЭЭО вращающимся электродом сплава Hastelloy C276, обеспечивая более однородную поверхность, ускоряя удаление эрозионных продуктов и увеличивая срок службы инструмента. Диэлектрик, обогащенный графеном, также способствовал повышению поверхностной твердости и общей стабильности процесса [6].

Электроэрозионная обработка в режиме, близком к сухому (near-dry EDM), никелевых жаропрочных сплавов с использованием диэлектриков, усиленных углеродными нанотрубками (УНТ), демонстрирует схожие тенденции, обеспечивая более высокую скорость съема материала, меньший износ инструмента и улучшенное качество поверхности [7]. При микро-ЭЭО вращающимся электродом сплава Ti-6Al-4V диэлектрики с нанопорошками на основе УНТ или карбида кремния (SiC) способствовали съему материала, снижали износ электрода и обеспечивали получение более чистых поверхностей. УНТ превзошли SiC по эффективности, что выразилось в меньшем количестве микротрещин и наилучшем качестве поверхности [8]. Кроме того, гибридная наножидкость $Al_2O_3-SiO_2$ в деионизированной воде повысила производительность ЭЭО при обработке Ti-6Al-4V. Оптимальная концентрация этой гибридной наножидкости привела к увеличению скорости съема материала, снижению износа инструмента, уменьшению количества трещин и формированию более тонкого повторно затвердевшего слоя, тем самым улучшив качество поверхности благодаря синергетическому эффекту Al_2O_3 и SiO_2 [9].

В ходе микро-ЭЭО вращающимся электродом сплава Inconel 718 добавление порошка MoS_2 размером 50 нм в концентрации 5 г/л в диэлектрик повысило скорость съема материала и улучшило качество поверхности. Порошок

предотвращал зажигание дуги сбоку и короткие замыкания, что позволило получать микроотверстия более правильной формы с меньшим количеством дефектов. Таким образом, использование порошковых диэлектриков существенно расширяет технологические возможности микро-ЭЭО вращающимся электродом для обработки труднообрабатываемых никелевых сплавов [10].

Электроэрозионная обработка с добавлением порошков в диэлектрик (powder mixed electric discharge machining, PMEDM) сплава Inconel 718 в оптимальном режиме (концентрация порошка 4 г/л, сила тока 40 А, длительность импульса 200 мкс) позволяет повысить скорость съема материала (MRR) почти на 50 % при одновременном значительном снижении износа электрода (TW), что в совокупности улучшает производительность и качество поверхности [11].

Аналогичный эффект наблюдается при добавлении 0,4 масс. % графена в диэлектрик для ЭЭО сплава Inconel 625: скорость съема материала существенно возрастает, достигая максимума при силе тока 12 А и длительности импульса 50 мкс. Высокая степень соответствия между экспериментальными и прогнозными данными подтверждает, что метод PMEDM с использованием графена является эффективным и воспроизводимым подходом к обработке никелевых сплавов [12].

Процесс электроэрозионной обработки характеризуется генерацией экстремально высоких локальных температур (обычно 8000...12 000 °С). Для смягчения этого термического воздействия применяются стратегии оптимизации режимов, рационального выбора материала электрода и гибридные технологические решения. Интенсивное искрообразование приводит к модификации микроструктуры и механических свойств обрабатываемой поверхности за счет трансформации поверхностного и подповерхностного слоев [13].

Показано, что наножидкости на основе наночастиц, особенно гибридные композиции Al_2O_3 и многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), существенно улучшают смазочно-охлаждающие свойства при механической обработке сплава Inconel 718. Их использование способствует увеличению стойкости инструмента, повышению качества поверхности и снижению

сил резания, что определяет потенциал наножидкостей для прецизионного точения труднообрабатываемых материалов [14].

Последующие работы продемонстрировали, что применение композитных электродов Cu-МУНТ при ЭЭО низкоуглеродистой стали позволяет повысить поверхностную твердость на 163 % и уменьшить плотность микротрещин, что указывает на значительный потенциал наночастиц для целенаправленной модификации поверхностного слоя [15]. В целом введение проводящих частиц в диэлектрик стабилизирует процесс искрообразования, интенсифицирует съем материала и улучшает состояние поверхности, тем самым повышая общую технологическую и экологическую эффективность ЭЭО [16].

Методология расчета на основе поверхности отклика (response surface methodology, RSM) и нечеткой логики подтвердило, что применение ЭЭО с титановым порошком для обработки Inconel 718 улучшает производительность и качество поверхности; высокая точность прогнозных моделей свидетельствует об эффективности данной добавки [17].

Исследование ЭЭО сплава Inconel 800 с диэлектриками на основе порошков карбида вольфрама (WC) и карбида бора (B_4C) также показало существенное увеличение скорости съема материала и улучшение характеристик поверхности. Авторы отмечают определяющее влияние типа порошковой добавки и материала электрода на результат обработки [18].

Пеллегрини и Равасио (Pellegrini and Ravasio) [19] разработали интегральный индекс устойчивости для оценки энергопотребления, расхода диэлектрика, износа электрода и экологического воздействия. Использование такого подхода при применении нанодиэлектриков для обработки никелевых сплавов позволяет одновременно повысить технологическую эффективность и снизить нагрузку на окружающую среду. Например, диэлектрик на основе деионизированной воды с добавкой порошка SiC-PEF показал лучшие эксплуатационные и экологические характеристики по сравнению с традиционными масляными диэлектриками [20].

Современные обзорные работы обращают внимание на проблему вредных выбросов и побочных продуктов процессов обработки, подчеркивая настоятельную необходимость повы-

шения экологической безопасности ЭЭО путем снижения энергозатрат и расхода диэлектрика [21]. Биологические масла (например, масло яatroфы) демонстрируют сравнимую с традиционными жидкостями эффективность съема материала и лучшее качество поверхности при существенно более низком уровне загрязнения, что делает их перспективной устойчивой альтернативой [22].

Добавление керамических порошков, таких как SiC и B₄C, повышает скорость съема материала и улучшает качество поверхности, тогда как металлические порошки, например молибдена и хрома, увеличивают поверхностную твердость. Углеродные нанотрубки и графен способствуют более стабильному искрообразованию и более высоким скоростям съема материала, однако они могут приводить к агломерации частиц, что способно вызывать незначительные поверхностные дефекты [23, 24].

Анализ экологической составляющей микро-ЭЭО вращающимся электродом выявил, что ключевыми факторами воздействия являются расход диэлектрика и деградация электрода. Среди изученных вариантов наиболее предпочтительной с экологической точки зрения признана комбинация латунного электрода с водным диэлектриком [25].

Для комплексной минимизации экологического ущерба, энергопотребления и износа инструмента необходим интегральный подход. Экоиндекс (Eco-Index), объединяющий в единую метрику показатели производительности, энергоэффективности и качества поверхности, позволяет проводить такую оценку. Результаты исследований указывают на важность применения методов нормализации данных для обеспечения корректного сравнения различных технологических параметров в рамках итогового расчета индекса устойчивости [26].

В более широком контексте для мониторинга экологического состояния – например, в районах добычи полезных ископаемых – успешно применяется индекс дистанционного экологического зондирования (remote sensing ecological index, RSEI), который служит надежным инструментом оценки изменений и управления восстановительными процессами [27]. Аналогично в промышленности (на примере металлургии) метод взвешенной агрегации позволяет формировать

составной индекс устойчивости, объединяющий экономические, экологические и социальные критерии для комплексной оценки эффективности [28].

Установлено, что совместное применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) и проводящих порошков в ЭЭО стабилизирует искрообразование. Например, при обработке твердой стали AISI D2 диэлектриком с порошком хрома и ПАВ SPAN-20 достигаются повышенный съем материала и улучшенное качество поверхности [29]. Несмотря на перспективность гибридных подходов (например, сочетания криогенной обработки с PMEDM для повышения экологичности), они требуют дальнейшего совершенствования [30]. Данные моделирования сил резания подтверждают, что гибридные наножидкости улучшают обрабатываемость сплава Inconel 718 [31]. Для достижения оптимальных показателей (качества поверхности, стойкости инструмента, скорости съема материала) диэлектрики часто модифицируют микро- и нанопорошками, что позволяет целенаправленно влиять на свойства поверхностного слоя [32].

Наночастицы размером < 10 нм, обладающие выдающимися теплофизическими характеристиками, обеспечивают более эффективное искрообразование в микро-ЭЭО вращающимся электродом [33]. Добавление в диэлектрик наночастиц Al₂O₃, графена или SiC при обработке никелевых сплавов повышает стабильность разряда, улучшает охлаждение и удаление продуктов эрозии, что снижает износ электрода и улучшает качество поверхности. Ключевой проблемой PMEDM является возможная дестабилизация процесса из-за неоднородной дисперсии частиц, что решается постоянным перемешиванием для поддержания стабильной суспензии и высокой теплопроводности. В настоящей работе выбрана гибридная нанодиэлектрическая жидкость Al₂O₃-графен благодаря ее превосходной дисперсионной стабильности и теплопередающим свойствам.

Несмотря на очевидные технологические преимущества, комплексная оценка устойчивости (экоиндекс) процесса ЭЭО сплава Inconel 718 с применением гибридных нанодиэлектриков практически не исследована. Поэтому настоящая работа сосредоточена на улучшении обрабатываемости сплава Inconel 718 за счет до-

стижения стабильной и равномерной дисперсии наночастиц в диэлектрике с целью повышения эффективности ЭЗО, стабильности процесса и общей производительности. В исследовании используется диэлектрическая жидкость на основе наночастиц Al_2O_3 и графена, и изучаются ключевые результаты ЭЗО – скорость съема материала (MRR); шероховатость поверхности (Ra); износ инструмента (TW); геометрическая погрешность формы, такая как цилиндричность (ρ); потребление энергии (E). Повышение технологической эффективности вносит вклад в экологическую устойчивость процесса, что количественно оценивается с помощью расчета экоиндекса (схема оценки представлена на рис. 1).



Рис. 1. Методология оценки экологической устойчивости

Fig. 1. Framework for environmental sustainability assessment

Методы

Все опыты по электроэрозионной обработке выполнены на станке Eltech D300 ZNC с генератором ZNZ на 40 А и рабочим объемом $X = 300$ мм, $Y = 200$ мм, $Z = 250$ мм; привод оси Z – серводвигатель переменного тока. Стандартная система циркуляции диэлектрика была модифицирована для работы с наножидкостями.

Модернизированный контур состоял из двух ванн (рабочей и дренажной, размером $250 \times 150 \times 75$ мм), соединенных погружным насосом (24 Вт), что обеспечивало непрерывную подачу жидкости. Для очистки рабочей среды от эрозионных продуктов установлен магнитный фильтр; для предотвращения седиментации наночастиц в эрозионном масле применялась механическая мешалка.

В качестве обрабатываемого материала использовались цилиндрические заготовки из сплава Inconel 718 ($\varnothing 25 \times 20$ мм), его химический состав приведен в табл. 1. Электрод-инструмент – медный (электролитическая медь) диаметром 13 мм, глубина прошиваемых отверстий составляла 3 мм. Предварительные испытания позволили скорректировать и окончательно установить рабочие параметры, которые с учетом данных литературы и технических возможностей оборудования сведены в табл. 2. Общая схема эксперимента представлена на рис. 2.

В настоящей работе наножидкость была приготовлена путем смешивания наночастиц оксида алюминия (Al_2O_3) и графена (Gr) со стандартным синтетическим углеводородным эрозионным маслом. Концентрация наночастиц была выбрана таким образом, чтобы обеспечить баланс между стабильностью дисперсии и трибологическими свойствами. Для обеспечения равномерного диспергирования наночастиц в базовой жидкости применялся двухстадийный метод, схема которого показана на рис. 3. Общая массовая концентрация наночастиц поддерживалась на уровне 0,1 % при равном массовом соотношении Al_2O_3 и графена (50:50) для приготовления гибридной нанодиэлектрической жидкости. Для повышения стабильности наножидкости в нее было добавлено поверхностно-активное вещество (ПАВ) додецилсульфат натрия (SDS) в массовом соотношении 1:10 к общей массе наночастиц [3]. Сначала смесь перемешивали на магнитной мешалке в течение 30 минут, а затем

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава Inconel 718 (масс. %)

Chemical composition of Inconel 718 alloy (wt %)

C	Cr	Al	Ti	Si	Ni	Mo	Mn	Nb + Ta	Cu	Fe
0,026	17,42	0,48	0,84	0,35	54,06	2,88	0,32	5,10	0,23	Остальное

Экспериментальные параметры ЭЭО (электроэрозионной обработки)

Experimental parameters for EDM

Полярность	Обычная прямая
Диэлектрическая жидкость	Стандартное масло для ЭЭО; масло для ЭЭО, модифицированное наночастицами
Давление прокачки (обдува)	0,1 кг/см ²
Напряжение в межэлектродном зазоре, В	40 и 50
$T_{оп}$ (мкс)	50 и 150
I_p (А)	3 и 10
Глубина сверления	3 мм (постоянная)
Величина отвода (R_d)	2 мм (постоянная)

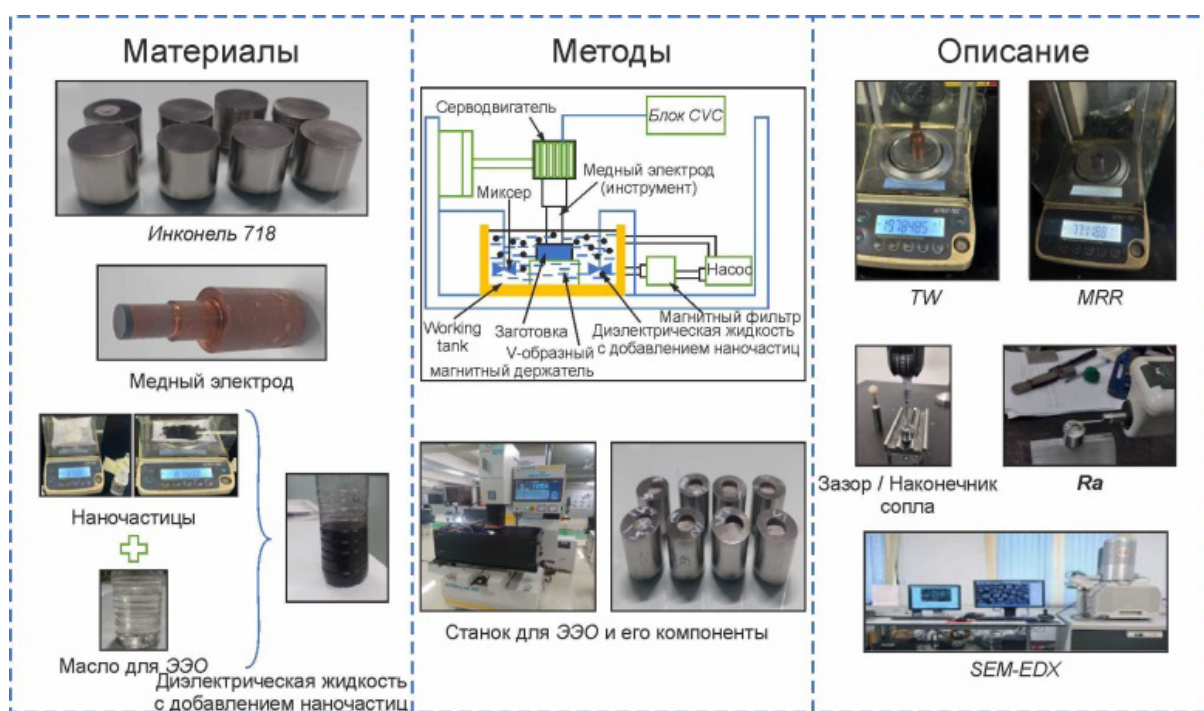


Рис. 2. Схема методологии исследования

Fig. 2. Research methodology chart



Рис. 3. Двухстадийный метод приготовления наножидакости

Fig. 3. Two-step method for nanofluid preparation

обрабатывали ультразвуком в течение 20 минут при температуре около 30 °С для достижения однородной дисперсии. Ультразвуковая обработка проводилась посредством погружного ультразвукового диспергатора PKS 500F. Характеристики использованных наночастиц приведены в табл. 3.

Скорость съема материала (MRR) определялась гравиметрическим методом по потере

массы заготовки после обработки, измерения проводились на аналитических весах SCALE-TEC. MRR рассчитывалась как разность начальной и конечной массы, деленная на произведение времени обработки и плотности материала:

$$MRR = \Delta m_w / (\rho_w t),$$

где Δm_w – изменение массы заготовки; ρ_w – плотность материала заготовки; t – время обработки.

Таблица 3

Table 3

Характеристики наночастиц Attributes of nanoparticles

Свойство	Al ₂ O ₃	Графен
Чистота, %	99,9	99
Средний размер частиц, нм	20...50	5...10
Насыпная плотность, г/см ³	0,5	0,1
Морфология (форма частиц)	Сферическая	Сферическая
Цвет	Белый	Черный

Шероховатость поверхности (Ra) контролировалась контактным профилографом Mahr MarSurf M300 (Германия) в соответствии со стандартом ISO 4287. Параметры измерения: базовая длина 0,25 мм, длина трассы ощупывания 1,75 мм. Итоговое значение Ra получено как среднее из пяти замеров, выполненных в трех различных зонах обработанной поверхности.

Износ электрода-инструмента (TW) оценивался аналогично MRR по изменению массы электрода, измеренной на тех же весах, с учетом плотности меди. Он рассчитывался как разность начальной и конечной массы инструмента, деленная на произведение плотности материала инструмента и времени обработки:

$$TW = \Delta m_t / (\rho_{Cu} t),$$

где Δm_t – разность начальной и конечной массы инструмента; ρ_{Cu} – плотность материала инструмента; t – время обработки.

Геометрическая точность (цилиндричность ρ) измерялась на координатно-измерительной машине (КИМ) для оценки отклонения формы прошитых отверстий. Потребление энергии (E) оценивалось как произведение среднего напряжения, среднего тока и времени обработки:

$$E = V_{avg} I_{p,avg} t,$$

где V_{avg} – среднее значение напряжения процесса; $I_{p,avg}$ – среднее значения тока процесса; t – общее время обработки.

Анализ повторно затвердевшего слоя (recast layer, RL) является ключевым для оценки поверхностной целостности. В процессе подготовки микрошлифов образцы разрезали на проволочно-вырезном электроэрозионном станке с водным диэлектриком, что минимизировало дополнительное термическое воздействие и сохранило исходную структуру RL для последующей металлографической характеристики.

Результаты и их обсуждение

В разделе представлен анализ устойчивости процесса ЭЭО, основанный на оценке экои́ндкса для деталей, обработанных в различных режимах с применением двух типов диэлектриков. Режимы испытаний приведены в табл. 4. Все прочие технологические параметры (расстояние отвода электрода R_d , скважность τ , чувствительность к дуговому разряду A_{sen}) поддерживались постоянными.

Экоиндекс является комплексным показателем, который количественно оценивает устойчивость процесса ЭЭО, интегрируя экологические

Таблица 4

Table 4

Матрица эксперимента (полный факторный план)

Experimental test matrix (full factorial design)

№ эксперимента	T_{on} , мкс	I_p , А	Напряжение на зазоре, В
1	150	10	50
2	50	3	50
3	50	10	50
4	150	3	40
5	150	10	40
6	50	10	40
7	150	3	50
8	50	3	40

(вредные выбросы, расход ресурсов), экономические (производительность, износ) и технологические (точность, качество) аспекты для определения общей эффективности. При его расчете учитываются такие ключевые отклики, как скорость съема материала (MRR), износ инструмента (TW), шероховатость поверхности (Ra), энергопотребление (E) и геометрическая точность.

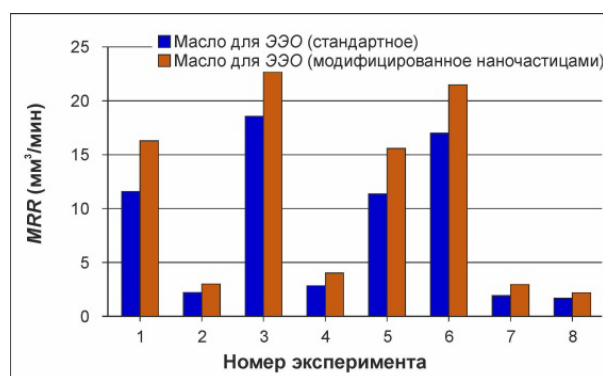
MRR и шероховатость поверхности (Ra)

Для процесса ЭЗО характерен конфликт целей: высокая скорость съема материала (MRR) повышает производительность, а низкая шероховатость поверхности (Ra) необходима для обеспечения функциональных свойств детали. По-

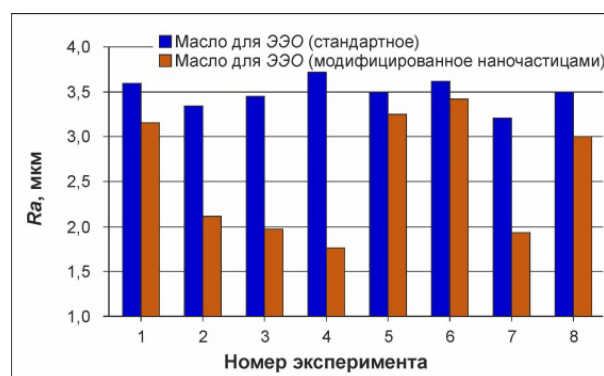
этому достижение оптимального компромисса между ними служит индикатором общей эффективности процесса [34, 35].

Сравнительные данные по MRR и Ra , полученные при использовании стандартного диэлектрика и нанодиэлектрика, представлены на рис. 4. Результаты демонстрируют четкий рост MRR и существенное снижение Ra при переходе к диэлектрику на основе наночастиц.

На рис. 4 четко виден рост MRR и значительное снижение Ra при использовании диэлектрической жидкости на основе наночастиц. Это улучшение обусловлено улучшенными теплофизическими свойствами, которые придают наночастицы. В данном исследовании при-



а



б

Рис. 4. Изменение скорости съема материала MRR (а) и шероховатости поверхности Ra (б) в зависимости от номера экспериментального прогона для стандартного масла ЭЗО и диэлектрической жидкости, модифицированной наночастицами

Fig. 4. Variation of (a) material removal rate (MRR) and (б) surface roughness (Ra) with experimental run number for conventional EDM oil and nanoparticle-enhanced dielectric fluid

менялся гибридный диэлектрик, содержащий Al_2O_3 и графен, при этом проявляется сильный синергетический эффект. Частицы Al_2O_3 увеличивают межэлектродный зазор, способствуя множественным разрядам на большей эффективной площади. Графен обеспечивает проводящие пути внутри диэлектрика, облегчая пробой диэлектрика при более низких напряжениях и обеспечивая более однородные разряды, что в конечном итоге улучшает MRR [36].

Кроме того, высокая теплопроводность графена позволяет теплу быстро отводиться из зоны разряда, способствуя эффективному локальному плавлению и съему материала. Это свойство помогает регулировать температурные колебания в зоне разряда и предотвращает чрезмерный нагрев, тем самым уменьшая термические повреждения и изменения микроструктуры. Улучшенный теплоотвод также снижает остаточные напряжения, способствуя более однородному качеству поверхности [37].

Таким образом, отличная дисперсность, а также высокая теплопроводность и электропроводность графена создают стабильную проводящую сеть, обеспечивая эффективное искрообразование и повышенную производительность обработки. Добавление Al_2O_3 дополнительно увеличивает межэлектродный зазор, способствуя множественным разрядам на увеличенной эффективной площади.

Износ инструмента (TW), цилиндричность (ρ) и потребление энергии (E)

Включение наночастиц в диэлектрик принципиально улучшает ключевые аспекты процесса ЭЭО – повышает стабильность разряда и интенсивность теплоотвода. Это комплексно снижает износ электрода-инструмента (TW), повышает геометрическую точность (цилиндричность ρ) и уменьшает энергопотребление (E) за счет оптимизации распределения энергии и эффективного удаления продуктов износа [38]. Как показано в предыдущих исследованиях, даже небольшая, но оптимальная концентрация наночастиц (например, графена при обработке Hastelloy C-276) способна существенно улучшить основные выходные параметры (MRR, Ra , TW) [39].

На рис. 5 видно, что износ инструмента, отклонение от цилиндричности и потребление энергии ниже при использовании диэлектрика

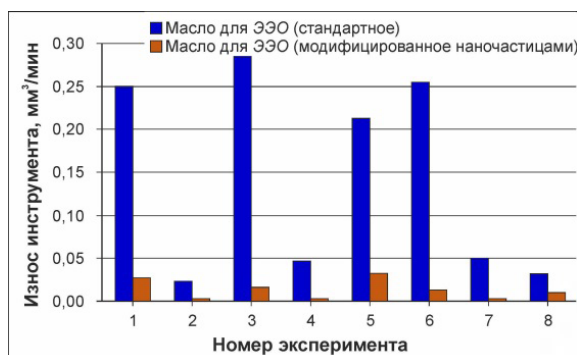
на основе наночастиц по сравнению с традиционным диэлектриком без наночастиц. Это объясняется ролью наночастиц в повышении стабильности разряда и улучшении теплоотвода. Более стабильное искрообразование снижает конусность и эксцентриситет, что приводит к улучшению цилиндричности. Кроме того, более высокая эффективная проводимость и более эффективный перенос энергии в данных условиях минимизируют эрозию электрода, тем самым снижая износ инструмента. Дополнительно защитный слой, формируемый наночастицами между инструментом и плазмой, экранирует электрод от прямого воздействия высоких температур, что тоже способствует снижению износа. Совокупный эффект стабилизированного искрообразования и улучшенного охлаждения также снижает удельное энергопотребление, способствуя устойчивости процесса.

Исследование ЭЭО сплава Inconel 718 с графенсодержащим диэлектриком подтверждает эти выводы. Результаты показали улучшение MRR на 13,88 % и цилиндричности на 25,76 % по сравнению с чистым диэлектриком [40]. Наночастицы изменяют характеристики пробоя диэлектрика, обеспечивая более стабильные и однородные разряды. Это помогает предотвратить случайные дуги и нерегулярное плавление, что уменьшает конусность и эксцентриситет в обработанных отверстиях [5].

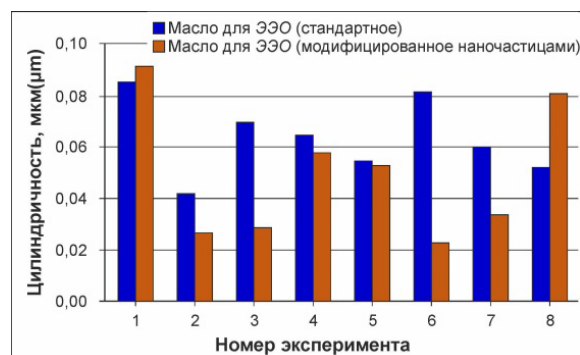
Экоиндекс

Экоиндекс является ключевой метрикой для оценки устойчивости процесса ЭЭО, предоставляя комплексную перспективу по сравнению с традиционными показателями технологической эффективности и объединяя в единую оценку экологические аспекты (потребление ресурсов, отходы), энергоэффективность и технологическую результативность. Более высокое значение индекса соответствует более сбалансированному и устойчивому процессу, что делает экоиндекс эффективным инструментом для выбора оптимальных режимов, минимизирующих совокупное воздействие на окружающую среду при сохранении требуемого качества [25].

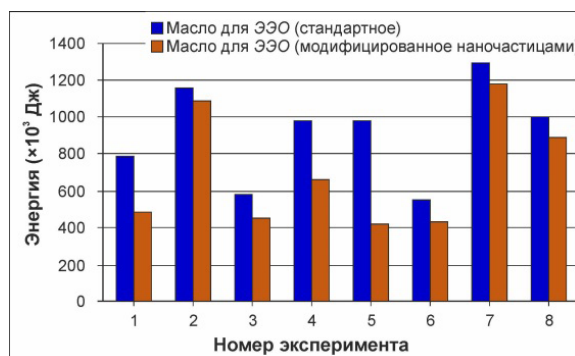
В данном исследовании учитывалось несколько параметров ЭЭО, влияющих как на экологические, так и на технологические показатели. Ключевые факторы, такие как потребление



а



б



в

Рис. 5. Изменение скорости износа инструмента (а), цилиндричности отверстия ρ (б) и энергопотребления E (в) в зависимости от номера эксперимента для стандартного масла ЭЗО и диэлектрической жидкости, модифицированной наночастицами

Fig. 5. Variation of (а) tool wear rate (TWR), (б) hole cylindricity (ρ), and (в) energy consumption (E) with experimental run number for conventional EDM oil and nanoparticle-enhanced dielectric fluid

энергии (E), износ инструмента (TW), скорость съема материала (MRR), цилиндричность (ρ) и шероховатость поверхности (R_a), были сведены в одно числовое значение. Каждому параметру на основе экспертного анализа был присвоен весовой коэффициент, отражающий его относительную важность в общей оценке устойчивости (табл. 5).

После назначения весов были рассчитаны нормализованные баллы для каждого параметра по всем экспериментальным прогонам путем масштабирования данных между их максималь-

ными и минимальными наблюдаемыми значениями. Исходные данные по каждому параметру для всех восьми экспериментов масштабировались в диапазон от 0 до 1 по следующим формулам:

Нормализация для критерия-максимума

$$(\text{чем больше, тем лучше}) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}; \quad (1)$$

Нормализация для критерия-минимума

$$(\text{чем меньше, тем лучше}) = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (2)$$

Таблица 5

Table 5

Весовые коэффициенты (w_i) для расчета индекса экологичности

Weighting factors (w_i) for eco-index calculation

Скорость съема материала, MRR, мм³/мин	Энергопотребление, E , Дж	Шероховатость поверхности, R_a , мкм	Цилиндричность отверстия, ρ , мкм	Скорость износа инструмента, TWR, мм³/мин
0,40	0,20	0,20	0,10	0,10

где x – измеренное значение параметра, $x_{\max}$ и $x_{\min}$ – его максимальное и минимальное значения, зафиксированные в ходе восьми экспериментов.

После нормализации итоговый экоиндекс рассчитывался согласно методу взвешенного суммирования с соответствующими весовыми коэффициентами из табл. 5.

На рис. 6 представлены рассчитанные значения экоиндекса для всех экспериментов в сравнительном аспекте: стандартный диэлектрик и нанодиэлектрик. Результаты демонстрируют устойчивое и статистически значимое превосходство нанодиэлектрика – его использование обеспечивает более высокий индекс практически во всех исследованных условиях обработки.

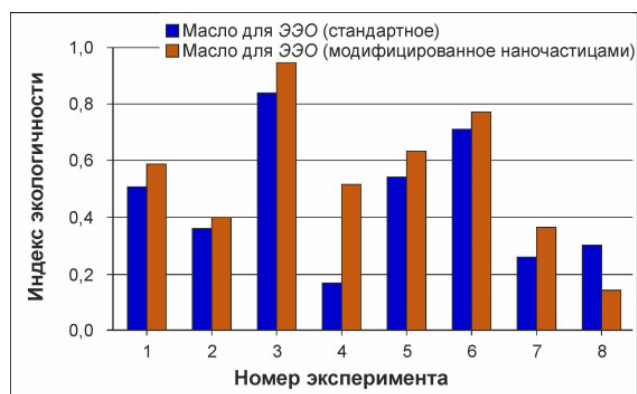


Рис. 6. Сравнение общего индекса экологичности (экоиндекса) для стандартного масла ЭЭО и диэлектрической жидкости, модифицированной наночастицами, по экспериментам

Fig. 6. Comparison of the overall eco-index for conventional EDM oil and nanoparticle-enhanced dielectric fluid across experimental runs

Оценка толщины повторно затвердевшего слоя

Толщина повторно затвердевшего слоя (RLT) является ключевым результатом электроэрозионной обработки (ЭЭО), напрямую влияющим на характеристики поверхности и эксплуатационные свойства обработанных деталей. Минимизация RLT наиболее важна для достижения высокой точности размеров и соблюдения жестких допусков. В данном исследовании применение гибридной диэлектрической среды (50:50 Al_2O_3 и графен) позволило значительно уменьшить формирование повторно затвердевшего слоя. Проведено сравнение образцов, обработанных

с использованием стандартного масла для ЭЭО и масла, содержащего 0,1 % наночастиц.

Для анализа образцы, обработанные методом ЭЭО, были разрезаны на кубики размером $5 \times 5 \times 5$ мм с помощью проволоочно-вырезного электроэрозионного станка. Затем они были залиты в холодную смолу для предотвращения термических повреждений, далее последовали алмазная полировка и кислотное травление. Измерение RLT проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа (FEI Nova NanoSEM 450) и программного обеспечения ImageJ для определения средней толщины на основе измерений в пяти различных местах.

На рис. 7 представлены СЭМ-микрофотографии и средняя RLT для деталей, обработанных с использованием базового масла для ЭЭО и гибридного нанодиэлектрика. Результаты показывают, что детали, обработанные с гибридной нанодиэлектрической жидкостью, имеют значительно меньшую среднюю RLT, составляющую 3,91 мкм по сравнению с 17,05 мкм для деталей, обработанных базовым маслом. Это снижение объясняется тем, что обычное масло для ЭЭО способствует высокой локализованной энергии искрового разряда, плохому рассеиванию тепла и неэффективному удалению продуктов эрозии. В то же время диэлектрик, содержащий наночастицы, смягчает эти проблемы. В частности, гибридная нанодиэлектрическая жидкость снижает RLT благодаря тому, что Al_2O_3 обладает высокой температурой плавления и термической стабильностью, что способствует более равномерному распределению энергии разряда, снижает пиковую температуру искры и действует как микроизолирующий барьер.

Добавим, что графен, хорошо диспергированный в базовой жидкости, формирует проводящую сеть. Его однослойная структура из sp^2 -гибридизированных атомов углерода в гексагональной решетке обеспечивает большую площадь поверхности, что способствует быстрому и равномерному переносу тепла [42]. Более того, высокая электропроводность и площадь поверхности графена обеспечивают эффективный отвод тепла из зоны обработки, предотвращая чрезмерное проникновение тепла и повышая стабильность плазменного канала. Это снижает термические повреждения и размер зоны термического влияния, тем самым дополнительно

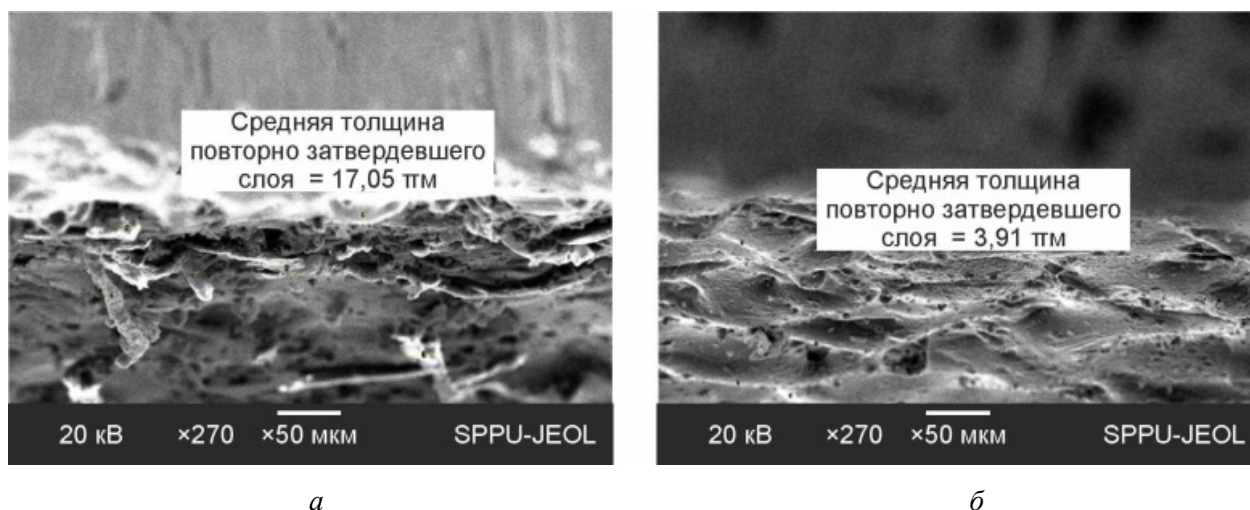


Рис. 7. Толщина повторно затвердевшего слоя (ПЗС) на поверхностях, обработанных электроэрозионным методом, с использованием базовой диэлектрической жидкости (а), гибридной нанодиэлектрической жидкости (б)

Fig. 7. Recast layer thickness (RLT) on ED-machined surfaces using (a) base dielectric fluid and (б) hybrid nano-dielectric fluid

минимизируя толщину повторно затвердевшего слоя. Синергетический эффект Al_2O_3 и графена повышает стабильность плазмы, улучшает удаление продуктов эрозии и подавляет чрезмерное повторное затвердевание расплавленного материала, что явно видно на рис. 7.

Анализ методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии

Элементный состав поверхностей, обработанных электроэрозионным методом, исследовали с помощью энергодисперсионной рентге-

новской спектроскопии (EDS, EDX). На рис. 8 и 9 представлены соответствующие спектры EDS для поверхностей, полученных с использованием гибридного нанодиэлектрика и базового масла соответственно.

Данные анализа свидетельствуют о существенно более высокой степени карбонизации поверхности, обработанной базовым маслом, по сравнению с образцом, полученным в гибридной среде. Количественное содержание углерода составило 20,9 масс. % для нанодиэлектрика и 31,09 масс. % для базового масла.

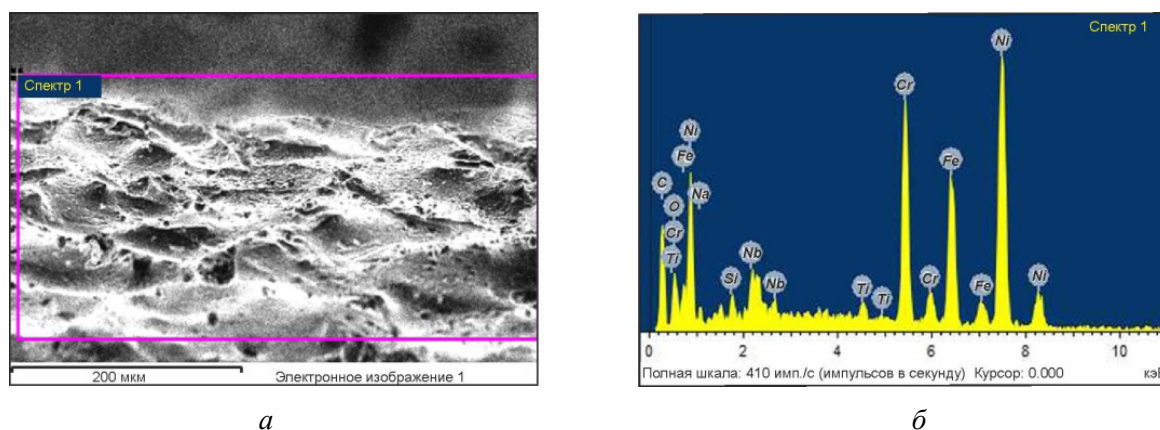


Рис. 8. Спектр EDX и соответствующее ему электронное изображение поверхности, обработанной электроэрозионным методом с использованием гибридной нанодиэлектрической жидкости Al_2O_3 -графен

Fig. 8. EDX spectrum and corresponding electron image of the ED-machined surface machined with the hybrid Al_2O_3 -graphene nano-dielectric fluid

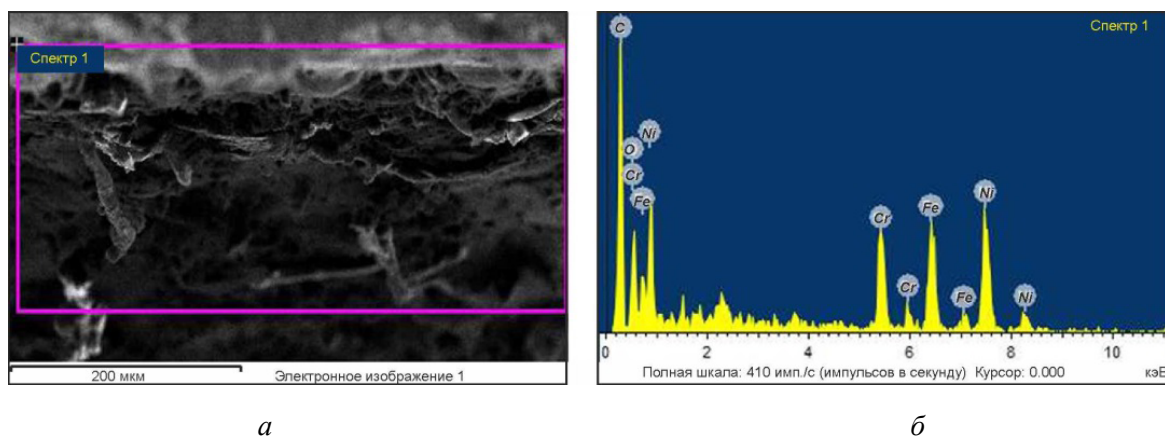


Рис. 9. Спектр EDX и соответствующее ему электронное изображение поверхности, обработанной электроэрозионным методом со стандартным маслом для ЭЭО

Fig. 9. EDX spectrum and corresponding electron image of the ED-machined surface machined with base EDM oil

Равномерное распределение наночастиц в графенсодержащей жидкости предотвращает локальный перегрев, снижает термические повреждения и минимизирует дефектность поверхности [43]. Результаты EDX-анализа дополнительно указывают на значимое влияние гибридного нанодиэлектрика на химический состав приповерхностного слоя. Фиксация пиков алюминия и кислорода подтверждает присутствие оксида алюминия (Al_2O_3), а повышенное содержание углерода – осаждение графена. Совместное действие наночастиц обеспечивает стабилизацию плазменного канала, интенсифицирует теплоотвод и подавляет повторное осаждение материала электрода-заготовки. В результате формируется более тонкий и химически однородный повторно затвердевший слой.

Напротив, при использовании традиционного диэлектрического масла в спектрах EDS доминируют пики основного материала заготовки, что является признаком неконтролируемых процессов плавления и повторной кристаллизации. Эти данные хорошо согласуются с наблюдаемым увеличением толщины повторно затвердевшего слоя и ростом поверхностных дефектов, что подтверждает сделанные ранее выводы.

Закключение

В работе исследовано влияние гибридной нанодиэлектрической жидкости на процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) жаропрочного

никелевого сплава Inconel 718. Сравнительный анализ с традиционным диэлектрическим маслом проведен для оценки улучшения обрабатываемости и общего показателя экологической эффективности (Eco-Index).

На основе полученных результатов сформулированы следующие выводы.

1. Разработан стабильный гибридный нанодиэлектрик (0,1 масс. % смеси Al_2O_3 -графен 50:50 в эрозионном масле, стабилизированный ПАВ SDS), пригодный для электроэрозионной обработки Inconel 718 на станке ZNC-ЭЭО в широком диапазоне длительности импульса (50...150 мкс), пикового тока (3...10 А) и напряжения (40...50 В).

2. Применение нанодиэлектрика обеспечило значительный прирост технологической эффективности и экологической устойчивости процесса. Зафиксировано повышение скорости съема материала (MRR), снижение шероховатости (Ra) и износа инструмента, улучшение геометрии отверстий (цилиндричности) и снижение энергопотребления. Совокупный положительный эффект количественно выражен в росте значения интегрального критерия Eco-Index.

3. Установленный синергетический механизм действия наночастиц заключается в следующем: термически стабильные наночастицы Al_2O_3 распределяют энергию разряда и снижают пиковые температуры, а высокопроводящий графен формирует проводящую сеть, стабилизирует пробой и обеспечивает интенсивный теплоотвод. Это приводит к стабилизации плазменного

канала, повышению эффективности энергопереноса и лучшему удалению продуктов эрозии.

4. Металлографический и элементный анализ подтвердили существенное улучшение целостности поверхности. Толщина дефектного повторно затвердевшего слоя (RLT) снижена более чем в четыре раза (с 17,05 до 3,91 мкм). Результаты EDX/EDS-анализа выявили модификацию поверхностного состава (обогащение углеродом от графена и присутствие Al-O от оксида алюминия), что коррелирует с гипотезой о контролируемом плавлении и подавлении повторного осаждения материала.

5. Комплексная оценка по критерию Eco-Index для большинства исследованных режимов обработки однозначно продемонстрировала преимущество нанодиэлектрика, подтвердив возможность достижения оптимального баланса между точностью, производительностью и ресурсной эффективностью электроэрозионной технологии.

6. Таким образом, исследование доказывает целесообразность и перспективность применения гибридных нанодиэлектриков, содержащих Al_2O_3 и графен, для электроэрозионной обработки сплава Inconel 718. Данный подход является технологически и экологически устойчивым, особенно в тех приложениях, где критически важны высокое качество поверхности (в частности, контроль толщины повторно затвердевшего слоя), энергоэффективность и увеличение стойкости инструмента.

Список литературы

1. Multiscale characterization of surface integrity of machined Inconel 718 / O. Schenk, M.V. Doost, P.B. genannt Wäcken, M. Meurer, T. Bergs, C. Broeckmann // *Materials Letters*. – 2026. – Vol. 403. – P. 139507. – DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139507.
2. Erosion characteristics of electrical discharge machining using graphene powder in deionized water as dielectric / X. Wang, S. Yi, H. Guo, C. Li, S. Ding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 108 (1). – P. 357–368. – DOI: 10.1007/s00170-020-05405-8.
3. Sharma P., Singh V., Sinha M.K. An in-depth analysis of MWCNTs and graphene nanofluids-based EDM: Investigating surface integrity in Inconel 825 superalloy // *Precision Engineering*. – 2024. – Vol. 91. – P. 546–558. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2024.10.018.

4. Behera A., Saho A.K., Mahapatra S.S. Experimental investigation of plain and nano-graphene oxide mixed dielectric for sustainable EDM of Nimonic alloy using Cu and Brass electrode: A comparative study // *Measurement*. – 2025. – Vol. 241. – P. 115659. – DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115659.

5. Paswan K., Pramanik A., Chattopadhyaya S. Machining performance of Inconel 718 using graphene nanofluid in EDM // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 35 (1). – P. 33–42. – DOI: 10.1080/10426914.2020.1711924.

6. Dutta S., Sarma D.K., Dutta H. Investigation of performance characteristics amid nano powder mixed electrical discharge micro-milling on Hastelloy C 276 // *Machining Science and Technology*. – 2023. – Vol. 27 (6). – P. 610–652. – DOI: 10.1080/10910344.2023.2263776.

7. NDEDM of Hastelloy using CNT-incorporated dielectric medium utilizing composite electrodes / R. Sambasivam, R. Ranjith, S. Verma, V.K. Verma // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2025. – Vol. 40 (14). – P. 1839–1854. – DOI: 10.1080/10426914.2025.2549762.

8. Pillai K.A., Hariharan P. Experimental investigation on surface and machining characteristics of micro ED milling of Ti-6Al-4 V with different nano powder mixed dielectrics // *Silicon*. – 2022. – Vol. 14 (6). – P. 2871–2894. – DOI: 10.1007/s12633-021-01041-3.

9. Oskueyan S., Abedini V., Hajialimohammadi A. Effects of hybrid Al_2O_3 - SiO_2 nanoparticles in deionized water on the removal rate and surface roughness during electrical discharge machining of Ti-6Al-4V // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2022. – Vol. 236 (3). – P. 1122–1133. – DOI: 10.1177/09544089211059311.

10. Application of powder suspended in dielectric fluid for fine finish micro-EDM of Inconel 718 / G.S. Prihandana, T. Sriani, M. Mahardika, M. Hamdi, N. Miki, Y.S. Wong, K. Mitsui // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 75 (10). – P. 599–613. – DOI: 10.1007/s00170-014-6145-4.

11. Powder mixed dielectric in electrical discharge machining of Inconel 718 / S. Ahmad, E. Abd Rahim, M.A. Lajis, M.R. Ibrahim // *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*. – 2017. – Vol. 4 (3). – P. 110–127.

12. Majumdar S., Bhoi N.K., Singh H. Graphene nano-powder mixed electric discharge machining of Inconel 625 alloy: optimization of process parameters for material removal rate // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. – 2023. – Vol. 17 (5). – P. 2341–2347. – DOI: 10.1007/s12008-022-00996-w.



13. Electro-discharge machining of Inconel 825 super alloy: effects of tool material and dielectric flushing / S. Kumari, S. Datta, M. Masanta, G. Nandi, P.K. Pal // *Silicon*. – 2018. – Vol. 10 (5). – P. 2079–2099. – DOI: 10.1007/s12633-017-9728-5.

14. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2024. – Vol. 11 (1). – P. 421–449. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.

15. Mandal P., Mondal S.C. Surface characteristics of mild steel using EDM with Cu-MWCNT composite electrode // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 34 (12). – P. 1326–1332. – DOI: 10.1080/10426914.2019.1605179.

16. Joshi A.Y., Joshi A.N. A systematic review on powder mixed electrical discharge machining // *Heliyon*. – 2019. – Vol. 5 (12). – DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02963.

17. Parametric optimization and prediction of MRR and surface roughness of titanium mixed EDM for Inconel 718 using RSM and fuzzy logic / S. Bhowmick, R. Mondal, S. Sarkar, N. Biswas, J. De, G. Majumdar // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2023. – Vol. 40. – P. 10–28. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.11.002.

18. Kumar S., Dhingra A.K., Kumar S. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining for nickel-based superalloy inconel-800 using response surface methodology // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. – 2017. – Vol. 3 (1). – P. 7. – DOI: 10.1186/s40759-017-0022-4.

19. Pellegrini G., Ravasio C. A sustainability index for the micro-EDM drilling process // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 247. – P. 119136. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119136.

20. Tiwari T., Singh A.K., Rakurty C.S. Assessing process and environmental performance of SiC-PEG dielectric EDM: A comparative study // *Manufacturing Letters*. – 2025. – Vol. 44. – P. 1772–1778. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2025.06.197.

21. Viswanth V.S., Ramanujam R., Rajyalakshmi G. A review of research scope on sustainable and eco-friendly electrical discharge machining (E-EDM) // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5 (5). – P. 12525–12533. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.234.

22. Sustainability of vegetable oil based bio-diesel as dielectric fluid during EDM process – A review / A. Yadav, Y. Singh, S. Singh, P. Negi // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 46. – P. 11155–11158. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.967.

23. State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications / H. Marashi, D.M. Jafarlou, A.A.D. Sarhan, M. Hamdi // *Precision Engineering*. – 2016. – Vol. 46. – P. 11–33. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.05.010.

24. 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.

25. Pellegrini G., Ravasio C. Evaluation of the sustainability of the micro-electrical discharge milling process // *Advances in Production Engineering & Management*. – 2019. – Vol. 14 (3). – P. 343–354. – DOI: 10.14743/apem2019.3.332.

26. Pollesch N.L., Dale V.H. Normalization in sustainability assessment: Methods and implications // *Ecological Economics*. – 2016. – Vol. 130. – P. 195–208. – DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.06.018.

27. A remote-sensing ecological index approach for restoration assessment of rare-earth elements mining / H. Hao, Z. Lian, J. Zhao, H. Wang, Z. He // *Computational Intelligence and Neuroscience*. – 2022. – P. 5335419. – DOI: 10.1155/2022/5335419.

28. Development of composite sustainability performance index for steel industry / R.K. Singh, H.R. Murty, S.K. Gupta, A.K. Dikshit // *Ecological Indicators*. – 2007. – Vol. 7 (3). – P. 565–588. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2006.06.004.

29. Hosni N.A.J., Lajis M.A. Experimental investigation and economic analysis of surfactant (Span-20) in powder mixed electrical discharge machining (PMEDM) of AISI D2 hardened steel // *Machining Science and Technology*. – 2020. – Vol. 24 (3). – P. 398–424. – DOI: 10.1080/10910344.2019.1698609.

30. Alrubaye I.D.K., Fantoni G. Toward green electrical discharge machining (EDM): state of art and outlook // *Machining Science and Technology*. – 2023. – Vol. 27 (1). – P. 63–105. – DOI: 10.1080/10910344.2023.2194961.

31. Kulkarni P., Chinchani S. Cutting force modeling during turning Inconel 718 using unitary Al_2O_3 and hybrid MWCNT + Al_2O_3 nanofluids under minimum quantity lubrication // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. – 2025. – Vol. 19 (7). – P. 5185–5202. – DOI: 10.1007/s12008-024-02120-6.

32. Philip J.T., Kuriachen B. Powder mixed electrical discharge machining (PMEDM) // *Electric Discharge Hybrid-Machining Processes*. CRC Press, 2022. – P. 239–282. – DOI: 10.1201/9781003202301.

33. Sahu R.K., Hiremath S.S. Electrical discharge machining (EDM): Nanoparticle generation // *Encyclopedia of Plasma Technology*. Vol. 1. – CRC Press, 2016. – P. 432–442.

34. Developments in powder mixed EDM and its perspective application for targeted surface modification / A. Schubert, V.D. Bui, I. Schaarschmidt, T. Berger,

A. Martin // *Procedia CIRP*. – 2022. – Vol. 113. – P. 100–119. – DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.134.

35. Optimization of process parameters for better surface morphology of electrical discharge machining-processed Inconel 825 using hybrid response surface methodology-desirability function and multi-objective genetic algorithm approaches / P. Sharma, K. Kishore, V. Singh, M.K. Sinha // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2024. – Vol. 33 (20). – P. 11321–11337. – DOI: 10.1007/s11665-023-08751-2.

36. Experimental investigations of using aluminum oxide (Al_2O_3) and nano-graphene powder in the electrical discharge machining of titanium alloy / R. Chaudhari, S. Khanna, V.K. Patel, J. Vora, S. Plaza, L.N.L. de Lacall // *Micromachines*. – 2023. – Vol. 14 (12). – P. 2247. – DOI: 10.3390/mi14122247.

37. A review on nanofluid stability: preparation and application / J. Wang, X. Yang, J.J. Klemeš, K. Tian, T. Ma, B. Sunden // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2023. – Vol. 188. – P. 113854. – DOI: 10.1016/j.rser.2023.113854.

38. *Behera A., Sahoo A.K., Mahapatra S.S.* Experimental investigation of plain and nano-graphene oxide mixed dielectric for sustainable EDM of Nimonic alloy using Cu and Brass electrode: A comparative study // *Measurement*. – 2025. – Vol. 241. – P. 115659. – DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115659.

39. *Dutta S., Sarma D.K.* Application of graphene nano powder in the dielectric oil to optimize the machining variables during μ -EDM of Hastelloy C 276 // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.521.

40. Multi-objective optimization and characterization of cylindricity and material removal rate in nanographene mixed dielectric EDM using ANFIS and MOSOA / A. Goyal, D. Sharma, A. Bhowmick, V.K. Pathak // *Sādhanā*. – 2022. – Vol. 47 (3). – P. 139. – DOI: 10.1007/s12046-022-01914-2.

41. Performance measurement and analysis of coffee supply chain with SCOR method (case study of north Sumatera coffee) / W. Prasetya, C. Natalia, S. Dias, B. Elnath, A. Silalahi, K. Monique // *IJRDO Journal of Business Management*. – 2017. – Vol. 3 (11). – P. 1–17.

42. Machining parameter optimization and experimental investigations of nano-graphene mixed electrical discharge machining of nitinol shape memory alloy / J. Vora, S. Khanna, R. Chaudhari, V.K. Patel, S. Paneliya, D.Y. Pimenov, K. Giasin, C. Prakash // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 19. – P. 653–668. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.076.

43. *Singh K., Agarwal A.K., Yadav R.* Effect of dielectric fluids used on EDM performance: A review // *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*. – 2017. – Vol. 5 (10). – P. 10–16.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

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



Sustainability evaluation using an eco-index for Inconel 718 EDM with a hybrid Al_2O_3 -graphene nano-dielectric fluid

Paresh Kulkarni^{1, a}, Satish Chinchani^{2, b, *}

¹ Mechanical Department, D.Y. Patil International University, Akurdi, Pune, Maharashtra, 411044, India

² Department of Mechanical Engineering, Vishwakarma Institute of Technology, Affiliated to Savitribai Phule Pune University, Pune - 411037, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-2761-8754>,  paresh2410@gmail.com; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>,  satish.chinchani@vit.edu

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 January 2026

Revised: 14 January 2026

Accepted: 19 January 2026

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Electrical Discharge Machining (EDM)

Inconel 718

Sustainability

Nano-dielectric fluid

Eco-index

ABSTRACT

Introduction. Environmentally sustainable machining is crucial to improve the manufacturing sector's cost-effectiveness and resource efficiency while mitigating its negative environmental impact. The “eco-index” is a multi-criteria metric that assesses the sustainability of the electrical discharge machining (EDM) of *Inconel 718* by quantifying its total environmental and economic impact using a normalized and weighted approach. **The purpose of this work** is to describe the eco-index for *Inconel 718* EDM, which assesses sustainability through environmental indicators such as energy and material consumption, waste generation, emissions, and toxicity, as well as economic indicators including operating and disposal costs along with productivity metrics. However, there are limited studies on sustainability evaluation using the eco-index for *Inconel 718* EDM processed with a hybrid nano-dielectric fluid. **The methods of investigation.** This study investigates the machining performance and environmental sustainability of the EDM process of *Inconel 718* using a hybrid nanoparticle-mixed dielectric fluid. A hybrid nano-dielectric fluid was prepared by dispersing Al_2O_3 and graphene nanoparticles in an equal proportion (total concentration of 0.1%) in EDM oil using a two-step method involving SDS as a surfactant, magnetic stirring, and ultrasonication to ensure a stable suspension. Experiments were conducted on an EDM machine with a copper electrode by varying the pulse on-time (50–150 μ s), peak current (3–10 A), and discharge voltage (40–50 V). Key performance responses, including material removal rate (MRR), surface roughness (R_a), tool wear rate (TW), hole cylindricity (ρ), energy consumption (E), and a weighted eco-index (EI), were evaluated to quantify the combined productivity, quality, and sustainability performance. **Results and Discussion.** The results demonstrate that the hybrid nano-dielectric fluid improves overall EDM efficiency compared to conventional EDM oil by promoting stable discharge behaviour, enhanced heat transfer, and efficient debris flushing, which increases MRR, improves surface finish, reduces tool wear, enhances the cylindricity of the machined hole, and lowers energy consumption, leading to a higher eco-index across most machining conditions. Surface integrity analysis using SEM revealed a substantial reduction in recast layer thickness, which decreased from 17.05 μ m (base oil) to 3.91 μ m (hybrid nano-dielectric fluid), indicating reduced thermal damage and resolidification. EDX further confirmed nanoparticle involvement through carbon enrichment (graphene deposition) and Al–O signatures (alumina contribution), supporting the proposed mechanisms for improved plasma stability and reduced metallic redeposition. Overall, the hybrid Al_2O_3 -graphene nano-dielectric fluid provides an effective and sustainable approach for the EDM of *Inconel 718* by balancing precision, productivity, and environmental efficiency.

For citation: Kulkarni P., Chinchani S. Sustainability evaluation using an eco-index for Inconel 718 EDM with a hybrid Al_2O_3 -graphene nano-dielectric fluid. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 81–100. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-81-100. (In Russian).

References

1. Schenk O., Doost M.V., genannt Wäcken P.B., Meurer M., Bergs T., Broeckmann C. Multiscale characterization of surface integrity of machined Inconel 718. *Materials Letters*, 2026, vol. 403, p. 139507. DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139507.

* Corresponding author

Satish Chinchani, Ph.D. (Engineering), Professor

Department of Mechanical Engineering,

Vishwakarma Institute of Technology,

Affiliated to Savitribai Phule Pune University,

Pune – 411037, India

Tel.: 91-2026950401, e-mail: satish.chinchani@vit.edu

2. Wang X., Yi S., Guo H., Li C., Ding S. Erosion characteristics of electrical discharge machining using graphene powder in deionized water as dielectric. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108 (1), pp. 357–368. DOI: 10.1007/s00170-020-05405-8.
3. Sharma P., Singh V., Sinha M.K. An in-depth analysis of MWCNTs and graphene nanofluids-based EDM: Investigating surface integrity in Inconel 825 superalloy. *Precision Engineering*, 2024, vol. 91, pp. 546–558. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2024.10.018.
4. Behera A., Saho A.K., Mahapatra S.S. Experimental investigation of plain and nano-graphene oxide mixed dielectric for sustainable EDM of Nimonic alloy using Cu and Brass electrode: A comparative study. *Measurement*, 2025, vol. 241, p. 115659. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115659.
5. Paswan K., Pramanik A., Chattopadhyaya S. Machining performance of Inconel 718 using graphene nanofluid in EDM. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, vol. 35 (1), pp. 33–42. DOI: 10.1080/10426914.2020.1711924.
6. Dutta S., Sarma D.K., Dutta H. Investigation of performance characteristics amid nano powder mixed electrical discharge micro-milling on Hastelloy C 276. *Machining Science and Technology*, 2023, vol. 27 (6), pp. 610–652. DOI: 10.1080/10910344.2023.2263776.
7. Sambasivam R., Ranjith R., Verma S., Verma V.K. NDEDM of Hastelloy using CNT-incorporated dielectric medium utilizing composite electrodes. *Materials and Manufacturing Processes*, 2025, vol. 40 (14), pp. 1839–1854. DOI: 10.1080/10426914.2025.2549762.
8. Pillai K.A., Hariharan P. Experimental investigation on surface and machining characteristics of micro EDM milling of Ti-6Al-4 V with different nano powder mixed dielectrics. *Silicon*, 2022, vol. 14 (6), pp. 2871–2894. DOI: 10.1007/s12633-021-01041-3.
9. Oskueyan S., Abedini V., Hajialimohammadi A. Effects of hybrid Al_2O_3 - SiO_2 nanoparticles in deionized water on the removal rate and surface roughness during electrical discharge machining of Ti-6Al-4V. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, vol. 236 (3), pp. 1122–1133. DOI: 10.1177/09544089211059311.
10. Prihandana G.S., Sriani T., Mahardika M., Hamdi M., Miki N., Wong Y.S., Mitsui K. Application of powder suspended in dielectric fluid for fine finish micro-EDM of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75 (1), pp. 599–613. DOI: 10.1007/s00170-014-6145-4.
11. Ahmad S., Abd Rahim E., Lajis M.A., Ibrahim M.R. Powder mixed dielectric in electrical discharge machining of Inconel 718. *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*, 2017, vol. 4 (3), pp. 110–127.
12. Majumdar S., Bhoi N.K., Singh H. Graphene nano-powder mixed electric discharge machining of Inconel 625 alloy: optimization of process parameters for material removal rate. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2023, vol. 17 (5), pp. 2341–2347. DOI: 10.1007/s12008-022-00996-w.
13. Kumari S., Datta S., Masanta M., Nandi G., Pal P.K. Electro-discharge machining of Inconel 825 super alloy: effects of tool material and dielectric flushing. *Silicon*, 2018, vol. 10 (5), pp. 2079–2099. DOI: 10.1007/s12633-017-9728-5.
14. Kulkarni P., Chinchani S. Machinability of Inconel 718 using unitary and hybrid nanofluids under minimum quantity lubrication. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2024, vol. 11 (1), pp. 421–449. DOI: 10.1080/2374068X.2024.2307103.
15. Mandal P., Mondal S.C. Surface characteristics of mild steel using EDM with Cu-MWCNT composite electrode. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, vol. 34 (12), pp. 1326–1332. DOI: 10.1080/10426914.2019.1605179.
16. Joshi A.Y., Joshi A.N. A systematic review on powder mixed electrical discharge machining. *Heliyon*, 2019, vol. 5 (12). DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02963.
17. Bhowmick S., Mondal R., Sarkar S., Biswas N., De J., Majumdar G. Parametric optimization and prediction of MRR and surface roughness of titanium mixed EDM for Inconel 718 using RSM and fuzzy logic. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, vol. 40, pp. 10–28. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.11.002.
18. Kumar S., Dhingra A.K., Kumar S. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining for nickel-based superalloy inconel-800 using response surface methodology. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, vol. 3 (1), p. 7. DOI: 10.1186/s40759-017-0022-4.
19. Pellegrini G., Ravasio C. A sustainability index for the micro-EDM drilling process. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 247, p. 119136. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119136.
20. Tiwari T., Singh A.K., Rakurty C.S. Assessing process and environmental performance of SiC-PEG dielectric EDM: A comparative study. *Manufacturing Letters*, 2025, vol. 44, pp. 1772–1778. DOI: 10.1016/j.mfglet.2025.06.197.

21. Viswanth V.S., Ramanujam R., Rajyalakshmi G. A review of research scope on sustainable and eco-friendly electrical discharge machining (E-EDM). *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5 (5), pp. 12525–12533. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.02.234.
22. Yadav A., Singh Y., Singh S., Negi P. Sustainability of vegetable oil based bio-diesel as dielectric fluid during EDM process – A review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, pp. 11155–11158. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.967.
23. Marashi H., Jafarlou D.M., Sarhan A.A.D., Hamdi M. State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications. *Precision Engineering*, 2016, vol. 46, pp. 11–33. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.05.010.
24. 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.
25. Pellegrini G., Ravasio C. Evaluation of the sustainability of the micro-electrical discharge milling process. *Advances in Production Engineering & Management*, 2019, vol. 14 (3), pp. 343–354. DOI: 10.14743/apem2019.3.332.
26. Pollesch N.L., Dale V.H. Normalization in sustainability assessment: Methods and implications. *Ecological Economics*, 2016, vol. 130, pp. 195–208. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.06.018.
27. Hao H., Lian Z., Zhao J., Wang H., He Z. A remote-sensing ecological index approach for restoration assessment of rare-earth elements mining. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, p. 5335419. DOI: 10.1155/2022/5335419.
28. Singh R.K., Murty H.R., Gupta S.K., Dikshit A.K. Development of composite sustainability performance index for steel industry. *Ecological Indicators*, 2007, vol. 7 (3), pp. 565–588. DOI: 10.1016/j.ecolind.2006.06.004.
29. Hosni N.A.J., Lajis M.A. Experimental investigation and economic analysis of surfactant (Span-20) in powder mixed electrical discharge machining (PMEDM) of AISI D2 hardened steel. *Machining Science and Technology*, 2020, vol. 24 (3), pp. 398–424. DOI: 10.1080/10910344.2019.1698609.
30. Alrubaye I.D.K., Fantoni G. Toward green electrical discharge machining (EDM): state of art and outlook. *Machining Science and Technology*, 2023, vol. 27 (1), pp. 63–105. DOI: 10.1080/10910344.2023.2194961.
31. Kulkarni P., Chinchani S. Cutting force modeling during turning Inconel 718 using unitary Al_2O_3 and hybrid MWCNT + Al_2O_3 nanofluids under minimum quantity lubrication. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2025, vol. 19 (7), pp. 5185–5202. DOI: 10.1007/s12008-024-02120-6.
32. Philip J.T., Kuriachen B. Powder mixed electrical discharge machining (PMEDM). *Electric Discharge Hybrid-Machining Processes*. CRC Press, 2022, pp. 239–282. DOI: 10.1201/9781003202301.
33. Sahu R.K., Hiremath S.S. Electrical discharge machining (EDM): Nanoparticle generation. *Encyclopedia of Plasma Technology*. Vol. 1. CRC Press, 2016, pp. 432–442.
34. Schubert A., Bui V.D., Schaarschmidt I., Berger T., Martin A. Developments in powder mixed EDM and its perspective application for targeted surface modification. *Procedia CIRP*, 2022, vol. 113, pp. 100–119. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.134.
35. Sharma P., Kishore K., Singh V., Sinha M.K. Optimization of process parameters for better surface morphology of electrical discharge machining-processed Inconel 825 using hybrid response surface methodology-desirability function and multi-objective genetic algorithm approaches. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, vol. 33 (20), pp. 11321–11337. DOI: 10.1007/s11665-023-08751-2.
36. Chaudhari R., Khanna S., Patel V.K., Vora J., Plaza S., Lacalle L.N.L. de. Experimental investigations of using aluminum oxide (Al_2O_3) and nano-graphene powder in the electrical discharge machining of titanium alloy. *Micromachines*, 2023, vol. 14 (12), p. 2247. DOI: 10.3390/mi14122247.
37. Wang J., Yang X., Klemeš J.J., Tian K., Ma T., Sunden B. A review on nanofluid stability: preparation and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, vol. 188, p. 113854. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113854.
38. Behera A., Sahoo A.K., Mahapatra S.S. Experimental investigation of plain and nano-graphene oxide mixed dielectric for sustainable EDM of Nimonic alloy using Cu and Brass electrode: A comparative study. *Measurement*, 2025, vol. 241, p. 115659. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115659.
39. Dutta S., Sarma D.K. Application of graphene nano powder in the dielectric oil to optimize the machining variables during μ -EDM of Hastelloy C 276. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.521.
40. Goyal A., Sharma D., Bhowmic A., Pathak V.K. Multi-objective optimization and characterization of cylindricity and material removal rate in nanographene mixed dielectric EDM using ANFIS and MOSOA. *Sādhanā*, 2022, vol. 47 (3), p. 139. DOI: 10.1007/s12046-022-01914-2.

41. Prasetya W., Natalia C., Dias S., Elnath B., Silalahi A., Monique K. Performance measurement and analysis of coffee supply chain with SCOR method (case study of north Sumatera coffee). *IJRDO Journal of Business Management*, 2017, vol. 3 (11), pp. 1–17.

42. Vora J., Khanna S., Chaudhari R., Patel V.K., Paneliya S., Pimenov D.Y., Giasin K., Prakash C. Machining parameter optimization and experimental investigations of nano-graphene mixed electrical discharge machining of nitinol shape memory alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 19, pp. 653–668. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.076.

43. Singh K., Agarwal A.K., Yadav R. Effect of dielectric fluids used on EDM performance: A review. *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, 2017, vol. 5 (10), pp. 10–16.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).