



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Исследование электроэрозионной обработки криогенно обработанных бериллиево-медных сплавов (BeCu)

Дхрув Савант<sup>1, a</sup>, Руджута Булах<sup>1, b</sup>, Виджайкумар Джатти<sup>1, c, \*</sup>, Сатиш Чинчаникар<sup>2, d</sup>,  
 Акшани Мишра<sup>3, e</sup>, Эйоб Месселе Сефене<sup>4, 5, f</sup>

<sup>1</sup> Технологический институт симбиоза, Пуне – 412115, штат Махараштра, Индия

<sup>2</sup> Институт информационных технологий Вишвакармы, Кондва (Бадрек), Пуне – 411039, Махараштра, Индия

<sup>3</sup> Школа промышленной и информационной инженерии, Миланский политехнический университет, ул. Леонарда, 22, г. Милан, 20127, Италия

<sup>4</sup> Национальный Тайваньский университет науки и технологий, 43 Килунг Роуд, г. Тайбэй, 106335, Тайвань

<sup>5</sup> Технологический институт Бахир Дар, г. Бахир Дар, штат Амхара, Эфиопия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0009-9543-690X>, [✉ dhruv.sawant.btech2022@sitpune.edu.in](mailto:dhruv.sawant.btech2022@sitpune.edu.in);

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0000-4594-3385>, [✉ rujuta.bulakh.btech2022@sitpune.edu.in](mailto:rujuta.bulakh.btech2022@sitpune.edu.in);

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7949-2551>, [✉ vijaykumar.jatti@sitpune.edu.in](mailto:vijaykumar.jatti@sitpune.edu.in);

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, [✉ satish.chinchaniкар@viit.ac.in](mailto:satish.chinchaniкар@viit.ac.in);

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4939-359X>, [✉ akshansh.mishra@mail.polimi.it](mailto:akshansh.mishra@mail.polimi.it);

<sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4660-6262>, [✉ eyobsmart27@gmail.com](mailto:eyobsmart27@gmail.com)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

#### История статьи:

Поступила: 18 ноября 2023

Рецензирование: 08 января 2024

Принята к печати: 22 января 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2024

#### Ключевые слова:

Бериллиевая медь

Криогенная обработка

Скорость съема материала

Толщина белого слоя

Образование поверхностных трещин

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В современном производственном мире отрасли промышленности должны внедрять технологические достижения для прецизионной обработки труднообрабатываемых металлов, особенно для бериллиево-медных сплавов (BeCu). Электроэрозионная обработка сплавов доказала свою жизнеспособность. **Цель работы.** Обзор литературы показал, что исследование электроэрозионной обработки BeCu-сплавов все еще находится в зачаточном состоянии. Кроме того, криогенная обработка заготовок и электродов при электроэрозионной обработке не привлекла особого внимания исследователей. Более того, в исследованиях очень мало внимания уделено влиянию магнитной индукции на целостность поверхности и производительность во время электроэрозионной обработки. **Методы исследования.** В данной статье описывается использование электролитической меди с различными значениями тока в межэлектродном зазоре, периодами импульса и величиной магнитной индукции при электроэрозионной обработке BeCu-сплавов. В статье рассматривается, как криогенная обработка заготовки и инструмента, время импульса, ток в межэлектродном зазоре и величина магнитной индукции влияют на скорость съема материала, толщину белого слоя и образование поверхностных трещин. **Результаты и обсуждение.** Комбинация криогенно обработанной детали из BeCu-сплава и необработанного медного электрода имела самую высокую скорость съема материала среди всех комбинаций деталей и инструментов, использованных в этом исследовании. Время импульса и величина магнитной индукции мало влияли на скорость съема материала, тогда как наибольший эффект имел ток в межэлектродном зазоре. Максимально достигнутая скорость съема материала составила 11,807 мм<sup>3</sup>/мин. При высокой скорости съема материала наблюдаемая толщина белого слоя на горизонтальной поверхности колебалась в диапазоне 12,92–14,24 мкм. Таким же образом были определены максимальное и минимальное значения для вертикальной поверхности, равные 15,58 и 11,67 мкм соответственно. По данным сканирующей электронной микроскопии толщина слоя составляла менее 20 мкм, а в образцах с низкой, средней и высокой скоростью съема материала наблюдались едва заметные поверхностные трещины. Очевидно, что из-за криогенной обработки заготовки и внешнего магнитного поля наблюдалось незначительное растрескивание поверхности и образование белого слоя.

**Для цитирования:** 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.

#### \*Адрес для переписки

Джатти Виджайкумар, к.т.н., профессор

Технологический институт симбиоза,

Пуне – 412115, штат Махараштра, Индия

Тел.: 91-2028116300, e-mail: vijaykumar.jatti@sitpune.edu.in

## Введение

BeCu-сплавы (бериллиево-медные сплавы) – это очень надежные материалы с высокой усталостной прочностью, твердостью, износостойкостью и немагнитными характеристиками, которые используются в различных отраслях промышленности. Консистентный однородный жидкий раствор получается за счет сочетания бериллия и меди, что является отличительной чертой микроструктуры. Медь часто сохраняет свою гранецентрированную кубическую форму, а бериллий становится важной частью медных кристаллов. Когда атомы меди замещаются атомами бериллия, образуется твердый раствор замещения. BeCu-сплавы использовались для создания язычков прерывателей, диафрагм, регулирующих клапанов, компонентов распределительных устройств, а также всех разновидностей плоских и винтовых пружин. Высокая электропроводность и ударная вязкость также использовались в головках для экструзии пластика и специальной технологической оснастке. Однако при использовании традиционных методов механической обработки BeCu-сплавов возникает ряд проблем. Из-за высокой прочности BeCu-сплавов проблематично сохранить целостность поверхности готового изделия, а также в процессе обработки происходит повышенный износ инструмента. BeCu-сплавы обладают хорошими термическими и электротехническими свойствами, что делает электроэрозионную обработку безопасной и эффективной.

Для резки твердых материалов практичным методом является электроэрозионная обработка (ЭЭО) [1–6]. Из-за сложности процесса были проведены многочисленные исследования электроэрозионной обработки для определения оптимальных параметров [7–10]. Основная цель данного исследования – разработать продуктивную систему, повышающую скорость съема материала (ССМ). Используя методы машинного обучения (МО), группа исследователей создала модели прогнозирования производительности ЭЭО, включая ССМ [11–13].

Разработка моделирования процессов ЭЭО подробно обсуждалась Мингом и др. (Ming et al.) [14]. Шастри и др. (Shastri et al.) [15] оценили влияние охлаждения, ультразвуковой обработки, обработки порошковыми смесями и криогенной

обработки на такие показатели производительности, как ССМ, интенсивность износа инструмента (ИИИ), целостность поверхности и оплавленный слой. Бупати (Boopathi) [16] предложил всесторонний анализ литературы о различных диэлектрических жидкостях, ранее неизвестных и устойчивых инновациях, параметрах процесса, характеристиках обработки и стратегиях оптимизации, используемых при сухой или почти сухой электроэрозионной обработке. Целью объединения исследований по сухой и почти сухой электроэрозионной обработке была поддержка экологически чистых исследовательских проектов по электроэрозионной обработке. Влияние настроек электроэрозионной обработки выемок пространственно сложной формы на ССМ BeCu-сплавов исследовалось Али и др. (Ali et al.) [17].

Влияние настроек электроэрозионной обработки на ССМ, износ инструмента, относительный износ электродов и шероховатость поверхности NiTi-сплавов было исследовано Данешмандом с соавторами (Daneshmand et al.) [18]. К числу таких параметров относятся напряжение, ток разряда, время включения и время выключения импульса. Испытания были разработаны с использованием ортогональной матрицы L18 по методологии Тагучи. Влияние тока, напряжения, вращения инструмента, порошка  $Al_2O_3$ , ССМ, ИИИ и шероховатости поверхности также исследовали Данешманд с соавторами (Daneshmand et al.) [19]. Результаты показывают, что ССМ можно увеличить, используя порошок  $Al_2O_3$ , вращая инструмент и повышая напряжение, силу тока и ширину импульса. Влияние электроэрозионной обработки на окружающую среду, здоровье и безопасность человека было исследовано Бароем с соавторами (Baroi et al.) [20]. Влияние криогенной обработки на рабочий материал Inconel 718 исследовали Каннан с соавторами (Kannan et al.) [21]. Охлаждающий эффект медных электродов во время электроэрозионной обработки выемок пространственно сложной формы в титановом сплаве (Ti-6Al-4V) был исследован Абдулкаримом и др. (Abdulkareem et al.) [22]. Изучено влияние охлаждения на шероховатость поверхности детали и износ электродов. Чтобы выяснить, как глубокая криогенная обработка влияет на обрабатываемость сплава Ti 6246, Гилл (Gill) и Сингх (Singh) [23] использовали инструмент из электролитической меди

для сверления глухих отверстий диаметром 10 мм. Кроме того, было проведено сравнение необработанного сплава Ti 6246 и сплава Ti 6246 после глубокой криогенной обработки с точки зрения шероховатости поверхности и зарезания отверстий. Охлаждение медного электрода при электроэрозионной обработке (ЭЭО) заготовки из быстрорежущей стали марки M2 исследовали Шривастава (Srivastava) и Панди (Pandey) [24]. Обрабатываемость оценивали по относительному износу электрода (ОИЭ) и шероховатости поверхности (ШП). В исследовании Йылдыза и др. (Yildiz et al.) [25] изучалось влияние криогенной обработки и обработки холодом на обрабатываемость заготовок из BeCu-сплава электроэрозионным способом. В этом исследовании BeCu-сплав обрабатывался при температуре около  $-150\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для обработки холодом и  $-300\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для криогенной обработки.

Обрабатываемость электроэрозионным резанием титана была изучена Сингхом (Singh) и Сингхом (Singh) [26] как до, так и после криогенной обработки инструмента и заготовки. Выходные показатели исследования включали точность размеров, шероховатость поверхности, ИИИ и ССМ. Теплопроводность меди была значительно повышена за счет криогенной обработки в экспериментальном исследовании, проведенном Надигом и др. (Nadig et al.) [27]. Теплопроводность была лишь незначительно увеличена при отпуске по сравнению с криогенной обработкой. Результаты открывают путь для дальнейших исследований по оптимизации температуры и продолжительности криогенной обработки, а также других параметров отпуска. Во время электроэрозионной обработки быстрорежущей стали M2 Шривастава (Srivastava) и Панди (Pandey) [28] оценивали шероховатость поверхности (ШП), интенсивность износа металла (ИИИ) и относительный износ электрода (ОИЭ), используя медный электрод с криогенным охлаждением совместно с ультразвуком. Ток разряда, рабочий цикл, напряжение в межэлектродном зазоре и время включения были переменными, их можно было регулировать. В процессе электроэрозионной обработки сравнивали три типа электродов: обычные, криогенно охлажденные и криогенно охлажденные совместно с ультразвуком. Были измерены ССМ, ОИЭ и ШП. По словам Лицина

(Liqing) и Инцзе (Yingjie) [29], повторное приращение частиц к обработанной поверхности вызвало серьезные трудности при сухой электроэрозионной обработке. В ходе их исследований были предложены два метода увеличения ССМ при сухой электроэрозионной обработке: первый предполагает использование криогенно охлажденных заготовок, а второй – использование сухой электроэрозионной обработки в сочетании с газообразным кислородом. Джафферсон (Jafferson) и Харихаран (Hariharan) [30] определили электросопротивление, размер кристаллитов, микротвердость и провели микроскопические исследования, а также сравнили параметры обработки криогенно обработанных и необработанных микроэлектродов при микроэлектроэрозионной обработке (МЭЭО). Влияние криогенно обработанных электродов-инструментов на процессы электроэрозионной обработки (EDM) изучали Матай с соавторами (Mathai et al.) [31]. Когда обработка выполняется с использованием электродов, подвергнутых криогенной обработке различной продолжительности, эффективность процесса оценивается путем изучения изменения критических характеристик отклика, таких как ССМ, ИИИ и шероховатость поверхности, в зависимости от тока и времени включения импульса.

Сингх с соавторами (Singh et al.) в своем исследовании [32] стремились оценить эффективность медного электрода, изготовленного с помощью нового быстрого производственного процесса в электроэрозионной обработке стали D2. С другой стороны, Пракаш и др. (Prakash et al.) [33] сосредоточились на сравнении характеристик необработанных и криогенно обработанных электродов-инструментов в процессе микроэрозионной обработки магниевых сплавов AZ31B. Электроды-инструменты подвергались криогенной обработке для улучшения их механических характеристик, таких как твердость и износостойкость, что в свою очередь улучшало качество обрабатываемых деталей. Группа исследователей оптимизировала параметры процесса с помощью многокритериального принятия решений (МКПР) при электроэрозионной обработке SiC-композитов AA6061-T6 (15 масс.% SiC) [34]. Были предприняты попытки с использованием контролируемого машинного обучения предсказать шероховатость

поверхности электроэрозионной обработки глубоко криогенно обработанных NiTi-, NiCu- и BeCu-сплавов [35].

Обзор литературы показал, что исследование электроэрозионной обработки BeCu-сплавов все еще находится в зачаточном состоянии. Кроме того, криогенная обработка заготовок и электродов при электроэрозионной обработке не получила большого внимания исследователей. Более того, в исследованиях уделялось очень мало внимания влиянию магнитной индукции на целостность поверхности и производительность во время электроэрозионной обработки. Поэтому *цель данного исследования* – выяснить, как криогенная обработка заготовки и электрода, напряженность магнитного поля, ток в межэлектродном зазоре и время включения импульса влияют на удельный съем материала, толщину белого слоя и образование поверхностных трещин. Кроме того, в этом исследовании используются алгоритмы регрессии машинного обучения для оценки ССМ. Оставшуюся часть работы составляют разделы, посвященные материалам и методам, результатам и их обсуждению, а также выводам.

## Материалы и методы исследования

В этом исследовании для испытаний использовался электроэрозионный копировально-прошивочный станок Electronica Machine Tools Limited, модель C400×250. В качестве заготовки в данном исследовании взяли брусок размером 100×100×50 мм, который был затем разделен на блоки размером 30×20×20 мм для проведения экспериментов. В качестве материала электрода-инструмента в экспериментах использовали медь с высокой теплопроводностью. Инструмент имел квадратную форму размером 6×90 мм соответственно. С помощью индексированной системы и фрезерного станка ему придали квадратную форму 3×25 мм.

В ходе эксперимента прикладывалось внешнее магнитное поле с помощью неодимового магнита, окружающего зону резания. Перед экспериментом заготовку и электроды-инструменты подвергали криогенной подготовке. Чтобы выяснить, как криогенная обработка повлияла на материалы, были проведены испытания на электрическое сопротивление/проводимость. Вес заготовок и электродов-инструментов изме-

рялся с помощью компьютеризированных весов с точностью 0,001 г как до, так и после обработки. Удельный съем материала рассчитывали по формуле

$$УСМ = \left( \frac{M_1 - M_2}{\rho T} \right), \quad (1)$$

где  $M_1$  – масса заготовки перед механической обработкой, г;  $M_2$  – масса заготовки после механической обработки, г;  $\rho$  – плотность заготовки, г/см<sup>3</sup>;  $T$  – длительность цикла, мин.

Толщину белого слоя каждого образца исследовали при 850-кратном увеличении с помощью сканирующего электронного микроскопа. Далее обработанные поверхности образцов исследовали при 1000-кратном увеличении и измеряли поверхностные трещины на дне и стенках отверстий. С помощью электродов-инструментов из электролитической меди на необработанных деталях из BeCu-сплава были созданы квадратные отверстия глубиной 5 мм от поверхности.

На рис. 1 представлена экспериментальная установка, состоящая из BeCu-заготовки, медного электрода-инструмента и магнитов. Были проведены эксперименты для оценки влияния криогенной обработки заготовки и электродов-инструментов, а также тока в межэлектродном зазоре и магнитной индукции на удельный съем материала. Таким образом, эксперименты проводили в два этапа: поисковые и основные эксперименты по статистическому плану Бокса – Бенкена. Расчетные переменные, использованные для изучения влияния параметров процесса на эксплуатационные характеристики, приведены в табл. 1.

С целью принятия решения о диапазоне и уровне тока в межэлектродном зазоре и величине магнитной индукции для получения оптимальных значений удельного съема материала проводили поисковые исследования. Ток в межэлектродном зазоре и величину магнитной индукции варьировали на пяти уровнях, на каждом уровне выполняли один проход. Рассматривали различные комбинации заготовки и инструмента:

- BeCu необработанный и Cu необработанный;
- BeCu необработанный и Cu криогенно обработанный;
- BeCu криогенно обработанный и Cu необработанный;

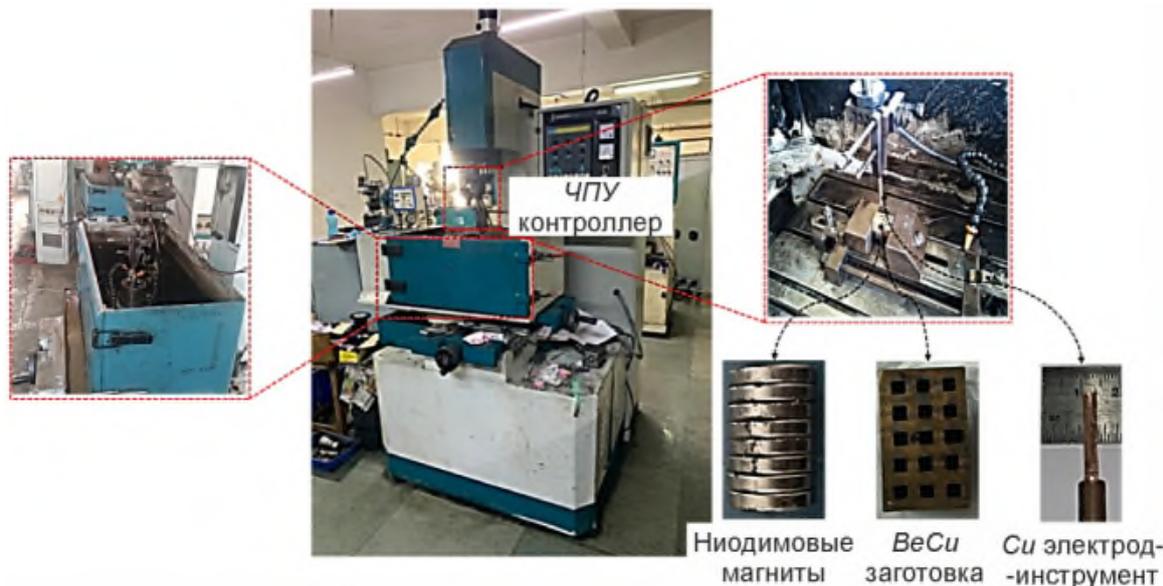


Рис. 1. Экспериментальная установка  
 Fig. 1. Experimental set-up

Таблица 1  
 Table 1

**Расчетные параметры**  
**Design variables**

Параметр	Рабочие характеристики
Ток в межэлектродном зазоре, А: 8; 10; 12; 14; 16	Удельный съем материала, толщина белого слоя, длина трещины
Величина магнитной индукции, Тл: 0; 0,124; 0,248; 0,372; 0,496	
Время включения импульса: 38 мкс	
Напряжение в межэлектродном зазоре: 55 В	
Время выключения импульса: 7 мкс	
Диэлектрик: промышленное масло для электроискровой обработки	
Давление прокачки: 0,5 кг/см <sup>2</sup>	
Полярность: заготовка (-); электрод-инструмент (+)	

– BeCu криогенно обработанный и Cu криогенно обработанный.

На основании результатов поисковых исследований были спроектированы основные эксперименты с использованием трехпараметрического статистического плана Бокса – Бенкена.

**Результаты и их обсуждение**

В этом разделе иллюстрируются экспериментальные результаты по ССМ и их анализ, толщина белого слоя и образование трещин,

а также прогнозирование ССМ с использованием регрессий машинного обучения.

**Экспериментальные результаты и их анализ**

Экспериментальные исследования проводили в два этапа. Во-первых, одна переменная варьировалась на выбранных уровнях при фиксированных средних значениях остальных переменных. Эти эксперименты проводились с целью изучения и нормирования настроек электроэрозионного станка и реакции процесса

в целом. Было установлено, что 5 мм – достаточная глубина фрезерования для достижения стабильности во время процесса. В этом исследовании были изменены две переменные: ток в межэлектродном зазоре и величина магнитной индукции. Оставшаяся переменная распределялась через равные интервалы по всему диапазону, в то время как остальные переменные фиксировались на соответствующих средних значениях для всего диапазона опций, доступных в станке. В первых пяти испытаниях ме-

нялся только ток в межэлектродном зазоре, как показано в табл. 2.

Подобное изменение величины магнитной индукции наблюдалось в пяти экспериментах, как показано в табл. 3. Ток в межэлектродном зазоре и магнитная индукция варьировались для четырех комбинаций деталей и инструментов.

В данной работе варьировались только ток в межэлектродном зазоре и внешнее магнитное поле. Известно, что параметром, сильнее всего влияющим на ССМ, является энергия искры.

Таблица 2

Table 2

**Матрица эксперимента: варьирование тока в межэлектродном зазоре**
**Experimental matrix: Varying gap current**

Величина магнитной индукции, Тл	Напряжение в межэлектродном зазоре, В	Ток в межэлектродном зазоре, А	Время включения импульса, мкс	Время выключения импульса, мкс	Комбинации заготовок и инструментов (НО:НО; О:НО; НО:О; О:О)
0,248	55	8	38	7	НО:НО (ВеСи необработанный и Си обработанный), О:НО (ВеСи обработанный и Си необработанный), НО:О (ВеСи необработанный и Си обработанный), О:О (ВеСи обработанный и Си обработанный)
0,248	55	10	38	7	
0,248	55	12	38	7	
0,248	55	14	38	7	
0,248	55	16	38	7	

Таблица 3

Table 3

**Матрица эксперимента: варьирование величины магнитной индукции**
**Experimental matrix: Varying magnetic strength**

Величина магнитной индукции, Тл	Напряжение в межэлектродном зазоре, В	Ток в межэлектродном зазоре, А	Время включения импульса, мкс	Время выключения импульса, мкс	Комбинации заготовок и инструментов (НО:НО; О:НО; НО:О; О:О)
0	55	12	38	7	НО:НО (ВеСи необработанный и Си обработанный), О:НО (ВеСи обработанный и Си необработанный), НО:О (ВеСи необработанный и Си обработанный), О:О (ВеСи обработанный и Си обработанный)
0,124	55	12	38	7	
0,248	55	12	38	7	
0,372	55	12	38	7	
0,496	55	12	38	7	

При криогенной обработке тепловые колебания атомов металлов уменьшаются за счет понижения температуры. Это приводит к уменьшению удельного электрического сопротивления и улучшению электропроводности. Благодаря криогенной обработке повышается однородность кристаллической структуры и растворяются дислокации, что улучшает структурную компактность и электропроводность. Согласно закону Видмана – Франца – Лоренца увеличение электропроводности приведет к увеличению теплопроводности.

На рис. 2 показано изменение ССМ в зависимости от тока в межэлектродном зазоре для обработанных и необработанных ВеСи-сплавов с обработанными и необработанными медными электродами-инструментами (четыре комбинации деталей и инструментов – **НО:НО**; **О:НО**; **НО:О**; **О:О**). Температура поверхности заготовки имеет тенденцию повышаться в результате увеличения энергии искры, вызванной током в межэлектродном зазоре. В результате вещество плавится, а расплавленный металл впоследствии вымывается диэлектрической жидкостью. Из-за повышенной электропроводности заготовки после криогенной обработки ССМ повышается. В процессе электроэрозионной обработки в зоне обработки образуются остатки нежелательного материала, удаленного с заготовки. Эффективность обработки снижается, поскольку вместо искрения возникает дуга, если остатки нежелательного материала не удалить из зоны резания.

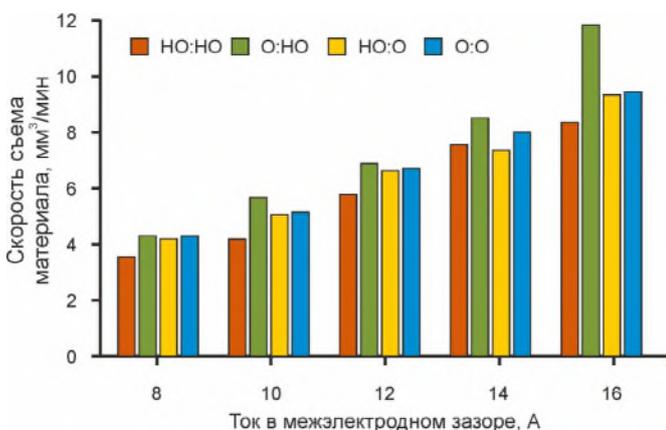


Рис. 2. Скорость съема металла в зависимости от тока в межэлектродном зазоре для четырех комбинаций заготовок и инструментов

Fig. 2. MRR varying with gap current for four combinations of workpieces and tools

Удалению мусора из зоны резания способствует сила внешнего магнитного поля. Кроме того, это предотвращает скопление частиц в зоне резки. В результате стабильность процесса электроэрозионной обработки повышается. На рис. 3 показано изменение ССМ в зависимости от магнитной индукции для обработанных и необработанных ВеСи-сплавов с обработанными и необработанными медными электродами-инструментами (четыре комбинации деталей и инструментов – **НО:НО**; **О:НО**; **НО:О**; **О:О**). С увеличением тока в межэлектродном зазоре энергия искры увеличивается, повышая температуру поверхности детали, тем самым плавя и испаряя материал с поверхности детали и увеличивая ССМ.

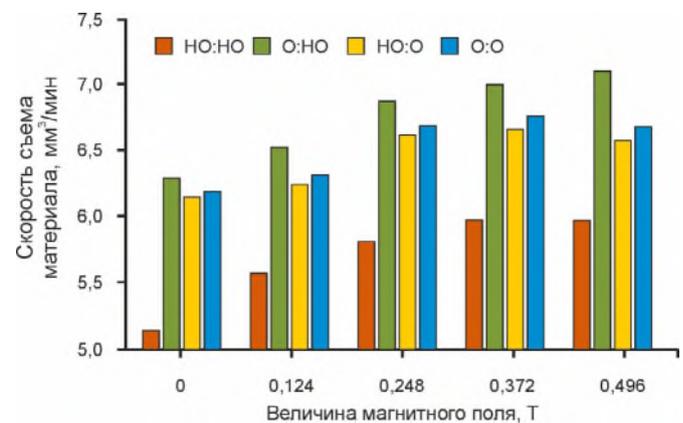


Рис. 3. Скорость съема материала в зависимости от величины магнитной индукции для четырех комбинаций заготовок и инструментов

Fig. 3. MRR varying with magnetic strength for combinations of workpieces and tools

Для оценки влияния входных переменных, а именно тока в межэлектродном зазоре ( $I_g$ ), величины внешнего магнитного поля (магнитной индукции) ( $B$ ) и времени включения импульса ( $T_{on}$ ), на скорость удаления материала (ССМ) была исследована пара, состоящая из криообработанной ВеСи-заготовки и необработанного медного электрода-инструмента. Эта комбинация заготовки и инструмента выбрана, поскольку она обеспечивает более высокую ССМ среди других комбинаций заготовки и инструмента, изучавшихся в настоящем исследовании. В табл. 4 представлена матрица эксперимента с ССМ, варьирующейся в зависимости от  $I_g$ ,  $B$  и  $T_{on}$ .

**План Бокса – Бенкена с наблюдаемыми значениями скорости съема материала**  
**Box–Behnken Design with observed values of MRR**

Номер эксперимента	Ток в межэлектродном зазоре $I_g$ , А	Величина магнитной индукции $B$ , Тл	Время включения импульса $T_{on}$ , мкс	Скорость съема материала, мм <sup>3</sup> /мин
1	8	NO	26	2,32
2	8	0,496	26	2,22
3	16	NO	26	6,00
4	16	0,496	26	6,54
5	12	NO	13	1,93
6	12	0,496	13	2,04
7	12	NO	38	4,66
8	12	0,496	38	5,003
9	8	0,248	13	0,97
10	16	0,248	13	1,88
11	8	0,248	38	2,89
12	16	0,248	38	7,40
13	12	0,248	26	4,86
14	12	0,248	26	4,64
15	12	0,248	26	4,78

Для лучшего понимания характеристик электроэрозионной обработки была разработана экспериментально обоснованная математическая модель ССМ для комбинации **О:НО** (обработанная ВеСи-заготовка и необработанный Си-инструмент):

$$SSM = 0,004501(I_g)^{1,339} \times (B)^{0,00121} (T_{on})^{1,0508} \quad (2)$$

Значения коэффициентов, участвующих в уравнении (2), было рассчитано с использованием инструмента анализа данных Microsoft Advanced Excel. Значения  $R$ -квадрата ( $R^2$ ), которые измеряют долю вариаций в точках данных, близки к 0,912. Таким образом, разработанная модель надежно прогнозирует ССМ во время электроэрозионной обработки криогенно обработанной ВеСи-заготовки с необработанным медным электродом-инструментом. Кроме того, чтобы лучше понять влияние параметров процесса, ССМ (рис. 4) строится с использованием разработанной модели, варьирующейся в за-

висимости от параметров процесса для **О:НО** (комбинации обработанной ВеСи-заготовки и необработанного Си-инструмента). На рис. 4, а показано изменение ССМ в зависимости от тока в межэлектродном зазоре при величине магнитной индукции и длительности импульса 0,248 Тл и 26 с. Можно заметить, что ССМ увеличивается с увеличением тока в межэлектродном зазоре.

ССМ, меняющаяся в зависимости от магнитной индукции при токе в межэлектродном зазоре 12 А и длительности импульса 26 с, показана на рис. 4, б. Кроме того, ССМ колеблется в зависимости от времени импульса при токе в межэлектродном зазоре и магнитной индукции 12 А и 0,248 Тл, как показано на рис. 4, в. Небольшой рост ССМ наблюдается с увеличением напряженности магнитного поля. Однако, как показано на рис. 4, в, ССМ, похоже, растет вместе с временем включения импульса. Наибольшее влияние на ССМ оказывает ток в межэлектродном зазоре, за ним следуют импульсный интервал и магнитная индукция, которые оказывают незначительное влияние.

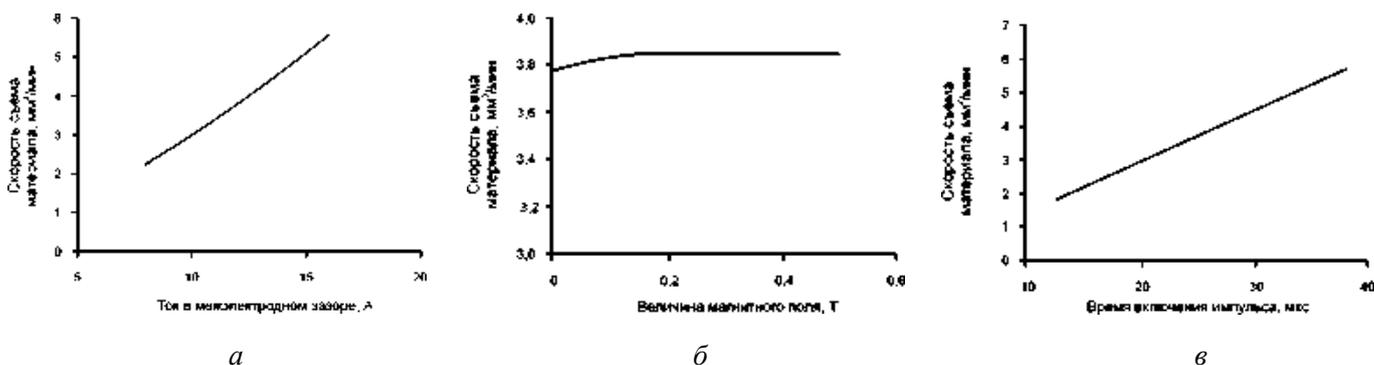


Рис. 4. Скорость съема материала в зависимости от тока в межэлектродном зазоре (а), величины магнитной индукции (б) и времени включения импульса (в)

Fig. 4. MRR varying with gap current (a), magnetic field (b) and pulse on-time (c)

Согласно рис. 4, значения ССМ уменьшаются с уменьшением значений магнитной индукции и тока в межэлектродном зазоре. По мере увеличения значений тока в межэлектродном зазоре и магнитной индукции ССМ также увеличивается. При магнитной индукции 0,4 Тл и токе в межэлектродном зазоре 16 А значение ССМ превышает  $7 \text{ мм}^3/\text{мин}$ . Более низкие значения магнитной индукции и времени включения импульса приводят к более низким показаниям ССМ. Значение ССМ увеличивается одновременно с увеличением магнитной индукции и импульсных интервалов. ССМ превышает  $7 \text{ мм}^3/\text{мин}$  при магнитной индукции 0,4 Тл и импульсном интервале 35 мкс. Значения ССМ ниже для меньших значений тока в межэлектродном зазоре и импульсного интервала. По мере роста тока в межэлектродном зазоре и импульсного интервала ССМ также увеличивается. При токе в межэлектродном зазоре 16 А и импульсном интервале 35 мкс значение ССМ превышает  $7 \text{ мм}^3/\text{мин}$ . При токе в межэлектродном зазоре 16 А, магнитной индукции 0,4709 Тл и импульсе 38 мкс оптимизатор, используя принцип комплексной желательности, вовремя спрогнозировал значение ССМ  $7,6453 \text{ мм}^3/\text{мин}$ .

### Толщина белого слоя (ТБС)

Что касается первичных испытаний, то для проверки толщины белого слоя (ТБС) были выбраны условия, обеспечивающие наибольшую скорость удаления материала. Толщина белого слоя отображается на двух отдельных краях квадратных отверстий на рис. 5, а, б для тока в межэлектродном зазоре 8 А, магнитной индукции 0,248 Тл, напряжения в межэлектродном зазоре

55 В, времени включения импульса 13 мкс и времени выключения импульса 7 мкс.

На рис. 5 показано, что низкая энергия искры при токе в межэлектродном зазоре 8 А и времени включения импульса 13 мкс привела к ограниченному образованию белого слоя. Следует отметить, что заготовка имеет очень низкое содержание углерода, а это означает, что образуется белый слой меньшей толщины.

Рис. 6, а, б иллюстрируют толщину белого слоя в двух различных углах квадратного отверстия при напряжении в межэлектродном зазоре 55 В, токе в межэлектродном зазоре 8 А, магнитной индукции 0,248 Тл, времени включения импульса 38 мкс, времени выключения импульса 7 мкс. Из-за более высокой энергии искры в этом пробном случае по сравнению с предыдущим случаем толщина белого слоя увеличена.

Толщина белого слоя на краях двух отдельных квадратных отверстий изображена на рис. 7, а, б с током в межэлектродном зазоре 16 А, магнитной индукцией 0,248 Тл, напряжением в межэлектродном зазоре 55 В, временем включения импульса 38 мкс и временем выключения импульса 7 мкс. В этом сценарии условия обработки выше: время включения импульса составляет 38 мкс и ток в межэлектродном зазоре 16 А. Таким образом, белый слой в этом случае толще, чем в первых двух. Однако толщина белого слоя обычно составляет менее 20 мкм, это указывает на то, что расплавленный металл эффективно удаляется с поверхности заготовки путем промывки диэлектриком.

Белый слой представляет собой тонкий слой переработанного материала, который образуется

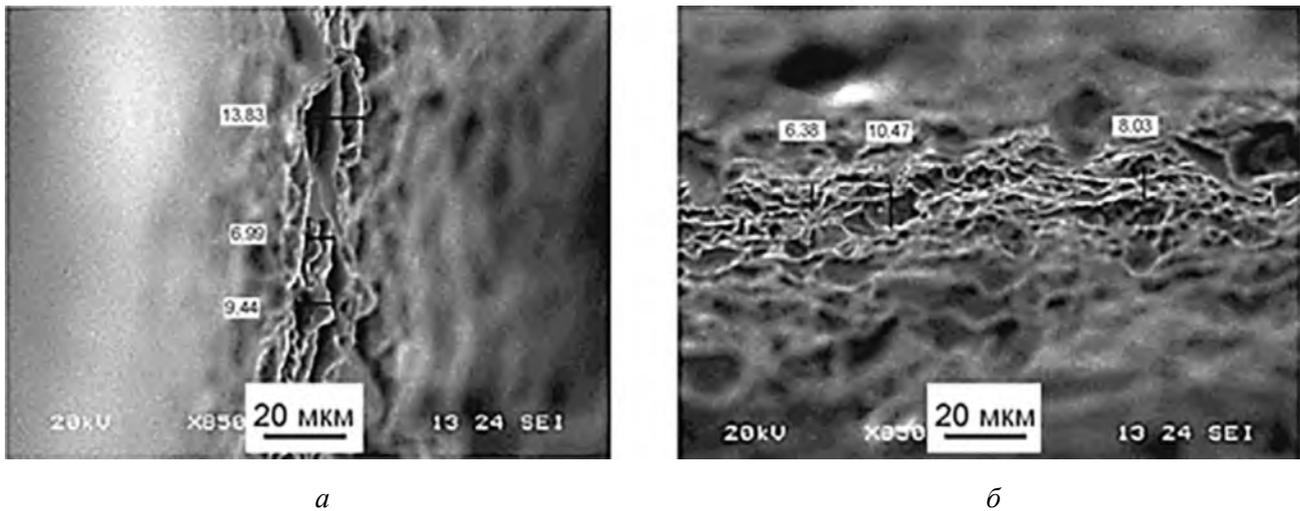


Рис. 5. Толщина белого слоя в эксперименте № 9 (табл. 4) при вертикальном поперечном сечении квадратного отверстия (а), горизонтальном поперечном сечении квадратного отверстия (б)  
 Fig. 5. White layer thickness in experiment No. 9 (Table 4) at the vertical cross-section of a square hole (a), the horizontal cross-section of the square hole (b)

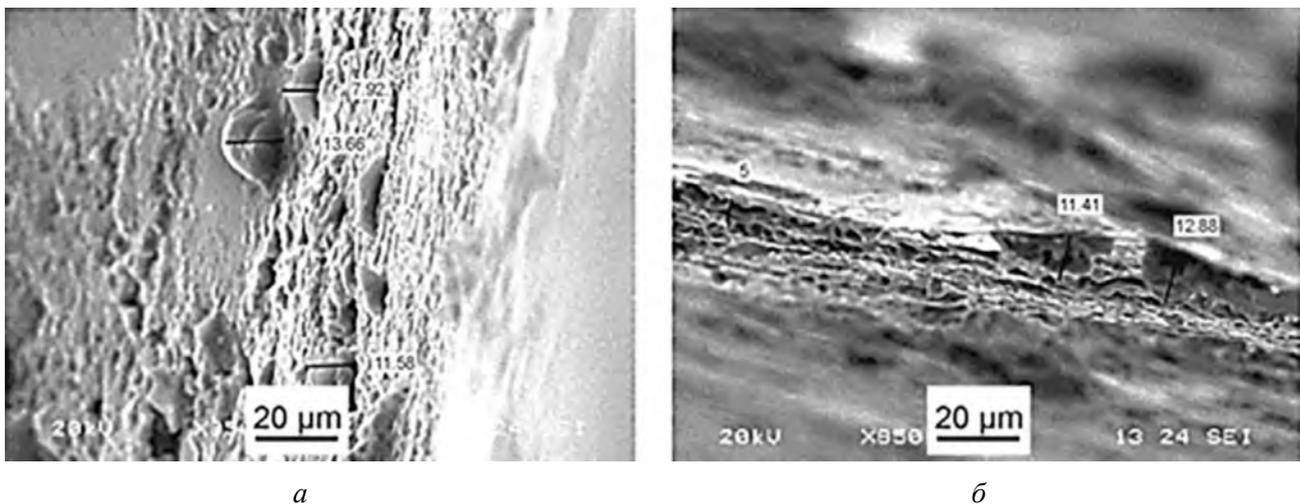


Рис. 6. Толщина белого слоя в эксперименте № 14 (табл. 4) при вертикальном поперечном сечении квадратного отверстия (а), горизонтальном поперечном сечении квадратного отверстия (б)  
 Fig. 6. White layer thickness in experiment No. 14 (Table 4) at the vertical cross-section of a square hole (a), the horizontal cross-section of the square hole (b)

на поверхности заготовки после электрического разряда. Этот слой имеет другие физические и химические свойства по сравнению с основным материалом. Толщина белого слоя зависит от различных факторов, в том числе от параметров электроэрозионного процесса и обрабатываемого материала. Более высокая энергия разряда увеличивает удаление материала, в результате чего получается более толстый белый слой. Более длительные импульсы обеспечивают большую передачу энергии и могут привести к образованию более толстого белого слоя. ВeCu-сплав обладает особыми свойствами

теплопроводности и электропроводности, которые могут повлиять на образование белого слоя. Состав и микроструктура сплава также могут играть роль. Правильная промывка зоны обработки помогает удалить мусор и контролировать выделение тепла во время процесса, которое может повлиять на образование белого слоя.

Наблюдаемая толщина белого слоя при низкой скорости съема материала для горизонтальной поверхности составляет минимум 6,38 мкм и максимум 10,47 мкм. Для вертикальных поверхностей максимум и минимум составляют 13,83 и 6,99 мкм соответственно. Наблюдаемая толщину

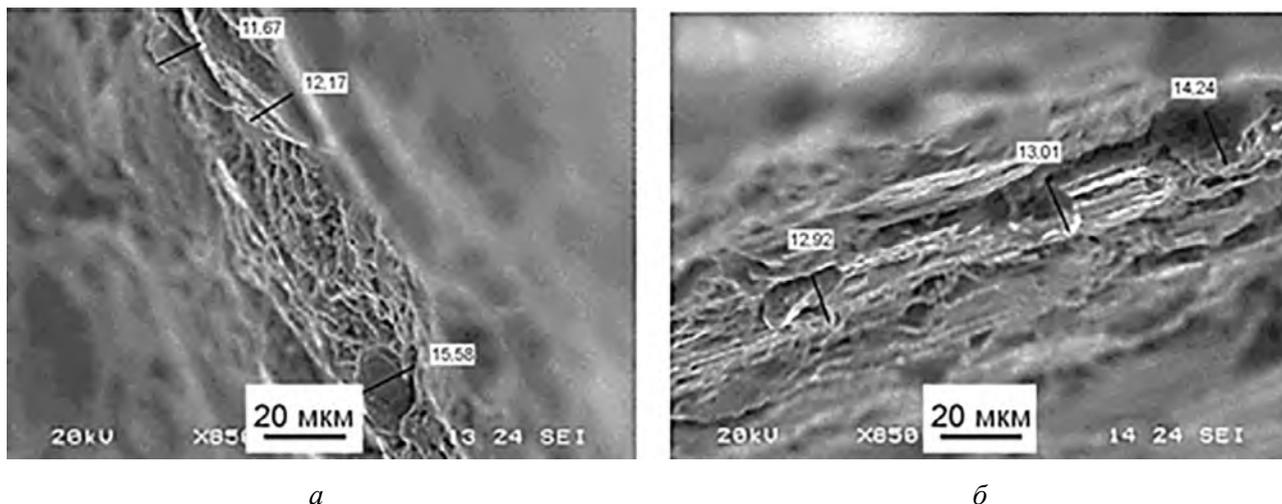


Рис. 7. Толщина белого слоя в эксперименте № 12 (табл. 4) при вертикальном поперечном сечении квадратного отверстия (а), горизонтальном поперечном сечении квадратного отверстия (б)

Fig. 7. White layer thickness in experiment No. 12 (Table 4) at the vertical cross-section of a square hole (a), the horizontal cross-section of the square hole (b)

на белого слоя при высокой скорости съема материала на горизонтальной поверхности составляет минимум 12,92 мкм и максимум 14,24 мкм. Для вертикальной поверхности максимум и минимум составляют 15,58 и 11,67 мкм соответственно.

#### Формирование трещин на обработанной поверхности

Процесс электроэрозионной обработки предполагает создание высоких температур на поверхности заготовки. Быстрый нагрев и последующие циклы охлаждения могут вызвать термические напряжения. Эти термические на-

пряжения могут привести к образованию трещин. Адекватное охлаждение и промывка зоны обработки имеют решающее значение в электроэрозионной обработке для контроля температуры и удаления мусора. Недостаточный поток или охлаждение диэлектрической жидкости может привести к чрезмерному нагреву и тепловым напряжениям, увеличивая вероятность образования трещин. На рис. 8, а, б, а также на рис. 9, а–г показаны трещина и литой слой на обработанной поверхности заготовки.

Вырезанную часть заготовки исследовали с помощью растровой электронной микроскопии.

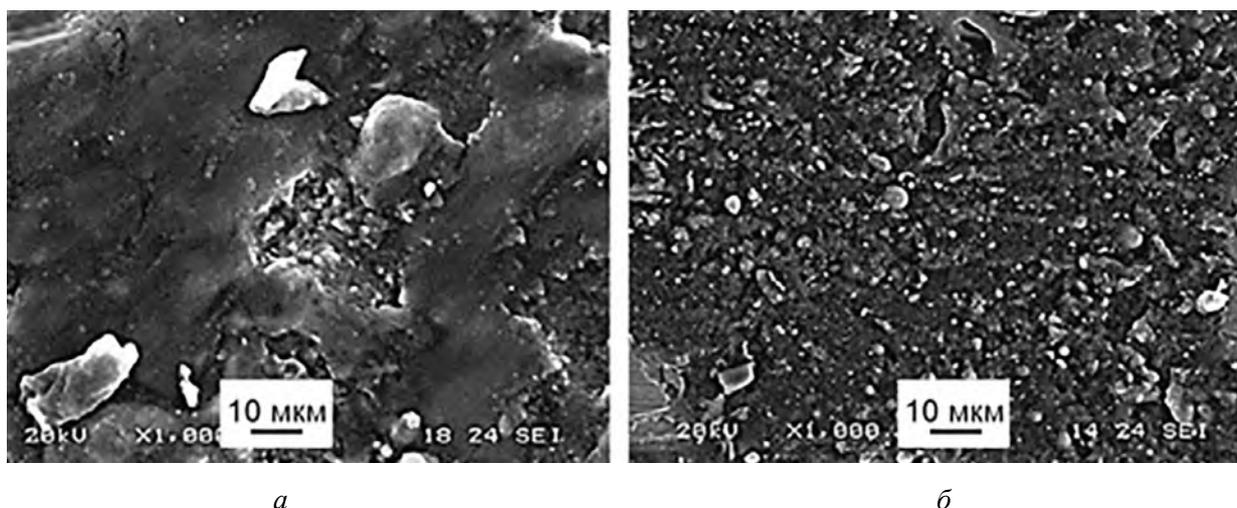
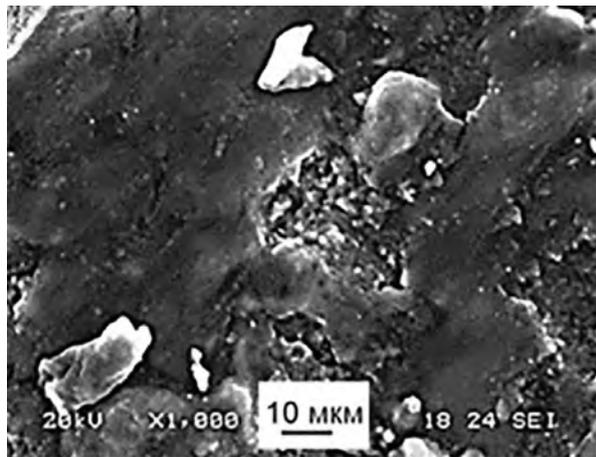
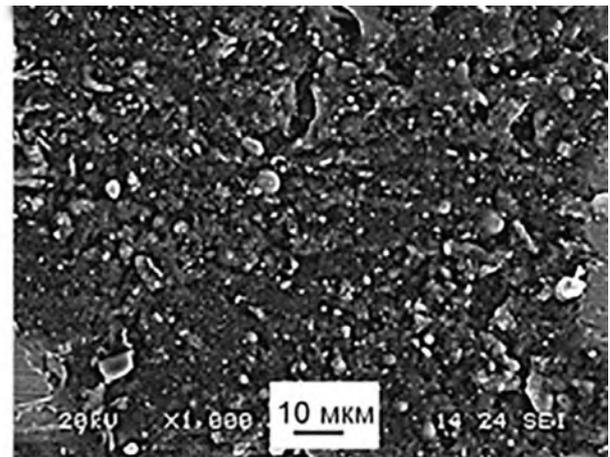
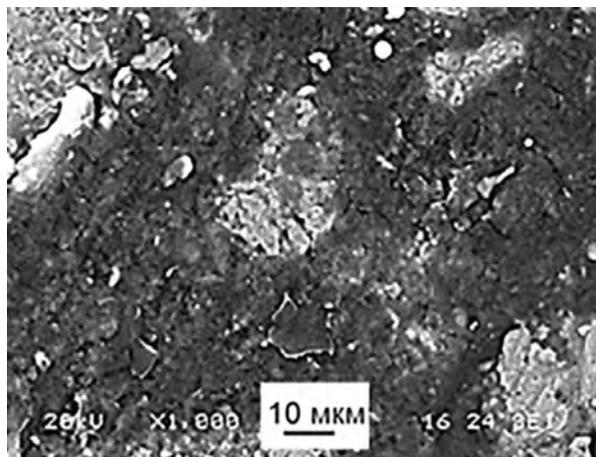
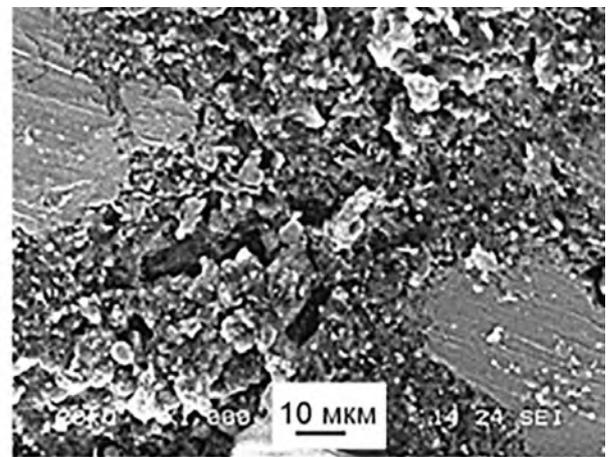
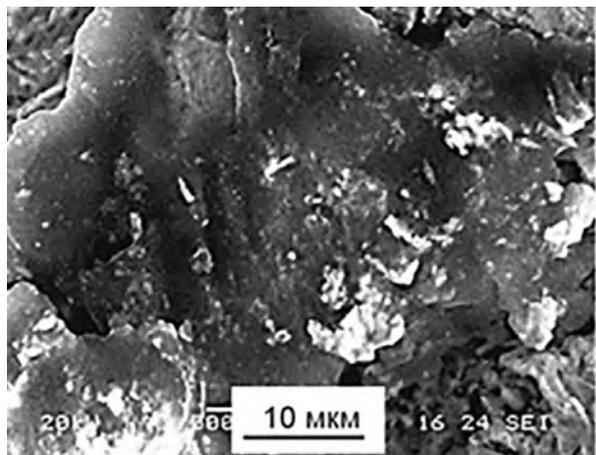
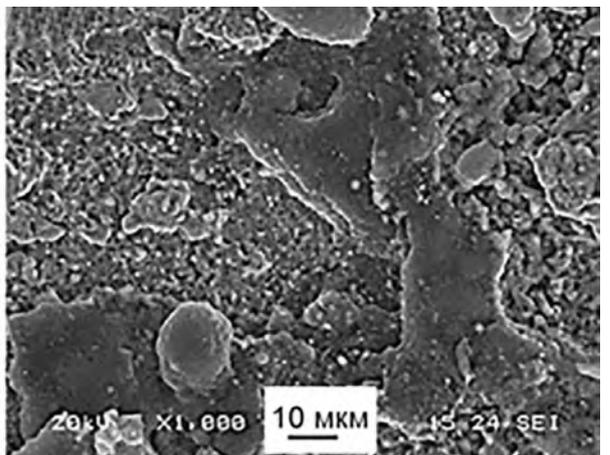


Рис. 8. Трещины в эксперименте № 9 на боковой поверхности квадратного отверстия (а), на нижней поверхности квадратного отверстия (б)

Fig. 8. Cracks in experiment No. 9 at the wall surface of square hole (a), the bottom surface of square hole (b)


*a*

*б*

*в*

*г*

*д*

*е*

*Рис. 9.* Трещины на боковой поверхности квадратного отверстия в эксперименте № 14 (*a*), на нижней поверхности квадратного отверстия в эксперименте № 14 (*б*), на боковой поверхности квадратного отверстия в эксперименте № 12 (*в*), на нижней поверхности квадратного отверстия в эксперименте № 12 (*г*)

*Fig. 9.* Cracks at The wall surface of square hole in experiment No. 14 (*a*), the bottom surface of square hole in experiment No. 14 (*б*), the wall surface of square hole in experiment No. 12 (*в*), the bottom surface of square hole in experiment No. 12 (*г*)

Были сделаны снимки нижней поверхности заготовки и поверхности стенки (рис. 9, *д*, *е*). Обрезец имеет очень мало поверхностных трещин при низких, средних и высоких скоростях съема материала, поскольку заготовка обладает превосходными тепловыми характеристиками и на поверхности образуется более тонкий белый слой. Криогенная обработка заготовки и внешняя магнитная сила предотвратили образование поверхностных трещин и образование белых слоев.

### Заключение

В настоящем исследовании скорость съема материала, толщина слоя и образование трещин на стенках и нижней поверхности квадратного отверстия, полученного электроэрозионной обработкой (ЭЭО), были исследованы с учетом влияния криогенно обработанных комбинаций заготовок из медно-бериллиевого сплава (BeCu) и медных (Cu) электродов. Были проведены эксперименты с изменением тока в межэлектродном зазоре, магнитной индукции и времени включения импульса. Время выключения импульса 7 мкс и напряжение в межэлектродном зазоре 55 В сохранялись постоянными для всех экспериментов. Были также исследованы толщина белого слоя и образование поверхностных трещин в зависимости от параметров процесса электроэрозионной обработки. Чтобы определить окончательные уровни входных параметров процесса для первичных экспериментов, сначала было проведено поисковое исследование. При планировании и проведении первичных исследований применялся план экспериментов Бокса – Бенкена. На основе экспериментов была создана математическая модель для прогнозирования и максимизации ССМ за счет оптимизации производительности ЭЭО. Настоящее исследование позволяет сделать следующие выводы.

- Комбинация криообработанной BeCu-заготовки и необработанного медного электрода обеспечила более высокую ССМ среди других комбинаций заготовок и инструментов, выбранных в настоящем исследовании.

- Наибольшее влияние на ССМ оказал ток в межэлектродном зазоре, за ним следовали импульсный интервал и магнитная индукция, которые оказали незначительное влияние. ССМ составила минимум 0,9 мм<sup>3</sup>/мин и максимум 11,807 мм<sup>3</sup>/мин.

- Наблюдаемая толщина белого слоя при низкой скорости съема материала для горизонтальной поверхности составляла минимум 6,38 мкм и максимум 10,47 мкм. Для вертикальных поверхностей максимум и минимум составили 13,83 и 6,99 мкм соответственно.

- Наблюдаемая толщина белого слоя при высокой скорости съема материала на горизонтальной поверхности составляла минимум 12,92 мкм и максимум 14,24 мкм. Для вертикальной поверхности максимум и минимум составили 15,58 и 11,67 мкм соответственно.

- РЭМ-изображения были получены на стенках и нижней поверхности заготовки. Незначительные поверхностные трещины наблюдались при низких, средних и высоких скоростях съема материала.

- Очевидно, что из-за криогенной обработки заготовки и внешней магнитной силы образование белого слоя и образование поверхностных трещин были низкими.

### Список литературы

1. 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.
2. *Akıncioğlu S.* Taguchi optimization of multiple performance characteristics in the electrical discharge machining of the TiGr2 // *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*. – 2022. – Vol. 20 (2). – P. 237–253. – DOI: 10.22190/FUME201230028A.
3. Optimization of hydroxyapatite powder mixed electric discharge machining process to improve modified surface features of 316L stainless steel / M. Danish, M. Al-Amin, A.M. Abdul-Rani, S. Rubaiee, A. Ahmed, F.T. Zohura, R. Ahmed, M.B. Yildirim // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 237 (3). – P. 881–895. – DOI: 10.1177/09544089221111584.
4. *Kam M., İpekçi A., Argun K.* Experimental investigation and optimization of machining parameters of deep cryogenically treated and tempered steels in electrical discharge machining process // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. – 2022. – Vol. 236 (5). – P. 1927–1935. – DOI: 10.1177/09544089221078133.
5. Study of various optimization techniques for electric discharge machining and electrochemical

- machining processes / N. Gautam, A. Goyal, S.S. Sharma, A.D. Oza, R. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 57. – P.615–621. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.005.
6. Shukla S.K., Priyadarshini A. Application of machine learning techniques for multi objective optimization of response variables in wire cut electro discharge machining operation // *Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 969. – P. 800–806. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.969.800.
7. Kumar Vin., Kumar Vik., Jangra K.K. An experimental analysis and optimization of machining rate and surface characteristics in WEDM of Monel-400 using RSM and desirability approach // *Journal of Industrial Engineering International*. – 2015. – Vol. 11 (3). – P. 297–307. – DOI: 10.1007/s40092-015-0103-0.
8. Kumar S.V., Kumar M.P. Optimization of cryogenic cooled EDM process parameters using grey relational analysis // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2014. – Vol. 28. – P. 3777–3784. – DOI: 10.1007/s12206-014-0840-9.
9. 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.
10. Machine learning for predictive modeling in management of operations of EDM equipment product / I. Ghosh, M. Sanyal, R. Jana, P.K. Dan // *2016 Second International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)*. – IEEE, 2016. – P. 169–174. – DOI: 10.1109/ICRCICN.2016.7813651.
11. Surface roughness prediction of machined aluminum alloy with wire electrical discharge machining by different machine learning algorithms / M. Ulas, O. Aydur, T. Gurgenc, C. Ozel // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9 (6). – P. 12512–12524. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.08.098.
12. Kumar N.A., Babu A.S. Influence of input parameters on the near-dry WEDM of Monel alloy // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 33 (1). – P. 85–92. – DOI: 10.1080/10426914.2017.1279297.
13. Shape memory effect and superelasticity of titanium nickelide alloys implanted with high ion doses / A. Pogrebnyak, S. Bratushka, V.M. Beresnev, N. Levintant-Zayonts // *Russian Chemical Reviews*. – 2013. – Vol. 82 (12). – P. 1135. – DOI: 10.1070/RC2013v082n12ABEH004344.
14. Progress in modeling of electrical discharge machining process / W. Ming, S. Zhang, G. Zhang, J. Du, J. Ma, W. He, C. Cao, K. Liu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2022. – Vol. 187. – P. 122563. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122563.
15. 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.
16. Boopathi S. An extensive review on sustainable developments of dry and near-dry electrical discharge machining processes // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 144 (5). – P. 050801. – DOI: 10.1115/1.4052527.
17. The effect of EDM die-sinking parameters on material removal rate of beryllium copper using full factorial method / M.A. Ali, M. Samsul, N.I. Hussein, M. Rizal, R. Izamshah, M. Hadzley, M.S. Kasim, M.A. Sulaiman, S. Sivarao // *Middle-East Journal of Scientific Research*. – 2013. – Vol. 16 (1). – P. 44–50. – DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.16.01.2249.
18. Influence of machining parameters on electro discharge machining of NiTi shape memory alloys / S. Daneshmand, E.F. Kahrizi, E. Abedi, M.M. Abdolhosseini // *International Journal of Electrochemical Science*. – 2013. – Vol. 8 (30). – P. 3095–3104. – DOI: 10.1016/S1452-3981(23)14376-8.
19. Effect of tool rotational and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder in electro discharge machining characteristics of NiTi-60 shape memory alloy / S. Daneshmand, V. Monfared, A.A. Lotfi Neyestanak // *Silicon*. – 2017. – Vol. 9 (2). – P. 273–283. – DOI: 10.1007/s12633-016-9412-1.
20. Baroi B.K., Jagadish, Patowari P.K. A review on sustainability, health, and safety issues of electrical discharge machining // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2022. – Vol. 44 (2). – P. 59. – DOI: 10.1007/s40430-021-03351-4.
21. Influences of cryogenically treated work material on near-dry wire-cut electrical discharge machining process / E. Kannan, Y. Trabelsi, S. Boopathi, S. Alagesan // *Surface Topography: Metrology and Properties*. – 2022. – Vol. 10 (1). – P. 015027. – DOI: 10.1088/2051-672X/ac53e1.
22. Abdulkareem S., Khan A.A., Konneh M. Reducing electrode wear ratio using cryogenic cooling during electrical discharge machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 45. – P. 1146–1151. – DOI: 10.1007/s00170-009-2060-5.
23. Gill S.S., Singh J. Effect of deep cryogenic treatment on machinability of titanium alloy (Ti-6246) in electric discharge drilling // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2010. – Vol. 25 (6). – P. 378–385. – DOI: 10.1080/10426910903179914.
24. Srivastava V., Pandey P.M. Performance evaluation of electrical discharge machining (EDM) process using cryogenically cooled electrode // *Materials*



and Manufacturing Processes. – 2012. – Vol. 27 (6). – P. 683–688. – DOI: 10.1080/10426914.2011.602790.

25. The effects of cold and cryogenic treatments on the machinability of beryllium-copper alloy in electro discharge machining / Y. Yildiz, M. Sundaram, K. Rajurkar, M. Nalbant // 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems. – Madison, Wisconsin, 2011. – P. 1–6.

26. Singh R., Singh B. Comparison of cryo-treatment effect on machining characteristics of titanium in electric discharge machining // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 3. – P. 239–248. – DOI: 10.15282/ijame.3.2011.1.0020.

27. Effect of cryogenic treatment on thermal conductivity properties of copper / D. Nadig, V. Ramakrishnan, P. Sampathkumaran, C. Prashanth // AIP Conference Proceedings. – 2012. – Vol. 1435 (1). – P. 133–139.

28. Srivastava V., Pandey P.M. Effect of process parameters on the performance of EDM process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode // Journal of Manufacturing Processes. – 2012. – Vol. 14 (3). – P. 393–402. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2012.05.001.

29. Liqing L., Yingjie S. Study of dry EDM with oxygen-mixed and cryogenic cooling approaches // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 6. – P. 344–350.

30. Jafferson J., Hariharan P. Machining performance of cryogenically treated electrodes in microelectric discharge machining: a comparative experimental study // Materials and Manufacturing Processes. – 2013. – Vol. 28 (4). – P. 397–402.

31. Study of the effect of cryogenic treatment of tool electrodes during electro discharge machining /

V. Mathai, R. Vaghela, H. Dave, H. Raval, K. Desai // Proceedings of the Eighth International Conference on Precision Meso, Micro & Nano Engineering (COPEN-8: 2013). – National Institute of Technology, Calicut, India, 2013. – P. 13–15.

32. Singh J., Singh G., Pandey P.M. Electric discharge machining using rapid manufactured complex shape copper electrode with cryogenic cooling channel // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2021. – Vol. 235 (1–2). – P. 173–185. – DOI: 10.1177/0954405420949102.

33. Influence of cryogenic treatment on the performance of micro-EDM tool electrode in machining of magnesium alloy AZ31B / D. Prakash, M. Tariq, R. Davis, A. Singh, K. Debnath // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 39. – P. 1198–1201. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.589.

34. Machinability analysis and optimization of electrical discharge machining in AA6061-T6/15wt.% SiC composite by the multi-criteria decision-making approach / G. Karthik Pandiyan, T. Prabakaran, D. Jafrey Daniel James, V. Sivalingam // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2022. – Vol. 31 (5). – P. 3741–3752. – DOI: 10.1007/s11665-021-06511-8.

35. 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 // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 128. – P. 5595–5612. – DOI: 10.1007/s00170-023-12269-1.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Investigation on the electrical discharge machining of cryogenic treated beryllium copper (BeCu) alloys

Dhruv Sawant<sup>1, a</sup>, Rujuta Bulakh<sup>1, b</sup>, Vijaykumar Jatti<sup>1, c, \*</sup>, Satish Chinchani<sup>2, d</sup>,  
Akshansh Mishra<sup>3, e</sup>, Eyob Messele Sefene<sup>4, 5, f</sup>

<sup>1</sup> Symbiosis Institute of Technology, Pune-412115, Maharashtra State, India

<sup>2</sup> Vishwakarma Institute of Information Technology, Kondhwa (Budruk), Pune - 411039, Maharashtra, India

<sup>3</sup> School of Industrial and Information Engineering, Politecnico Di Milano, 22 Leonardo str., Milan, Italy

<sup>4</sup> National Taiwan University of Science and Technology, 43 Keelung Rd., Taipei, 106335, Taiwan

<sup>5</sup> Bahir Dar Institute of Technology, Bahir Dar, Amhara, Ethiopia

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0009-9543-690X>, [✉ dhruv.sawant.btech2022@sitpune.edu.in](mailto:dhruv.sawant.btech2022@sitpune.edu.in);

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0000-4594-3385>, [✉ rujuta.bulakh.btech2022@sitpune.edu.in](mailto:rujuta.bulakh.btech2022@sitpune.edu.in);

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7949-2551>, [✉ vijaykumar.jatti@sitpune.edu.in](mailto:vijaykumar.jatti@sitpune.edu.in);

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4175-3098>, [✉ satish.chinchani@viit.ac.in](mailto:satish.chinchani@viit.ac.in);

<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4939-359X>, [✉ akshansh.mishra@mail.polimi.it](mailto:akshansh.mishra@mail.polimi.it);

<sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4660-6262>, [✉ eyobsmart27@gmail.com](mailto:eyobsmart27@gmail.com)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 18 November 2023

Revised: 08 January 2024

Accepted: 22 January 2024

Available online: 15 March 2024

#### Keywords:

Beryllium copper

Cryogenic treatment

Material removal rate

White layer thickness

Surface crack formation

### ABSTRACT

**Introduction.** In modern manufacturing world, industries should adapt technological advancements for precision machining of difficult-to-machine metals, especially for beryllium copper (*BeCu*) alloys. The electrical discharge machining of alloys has proven its viability. **The purpose of the work.** A literature review indicated that the investigation of electrical discharge machining of *BeCu* alloys is still in its infancy. Furthermore, the cryogenic treatment of workpieces and electrodes in electrical discharge machining has not received much attention from researchers. Moreover, the impact of magnetic field strength on surface integrity and productivity during electrical discharge machining has not attracted much attention from researchers. **The methods of investigation.** This paper describes the use of electrolytic copper with different gap current values, pulse on periods, and external magnetic strength for electrical discharge machining of *BeCu* alloys. This paper examines how the material removal rate, the thickness of the white layer, and the formation of surface cracks are affected by cryogenic treatment of the workpiece and tool, pulse-on time, gap current, and magnetic strength. **Results and Discussion.** The combination of the cryogenically treated *BeCu* workpiece and the untreated *Cu* electrode had the highest material removal rate among all the combinations of workpieces and tools used in this study. The pulse on-time and the strength of the magnetic field had little influence on material removal rate, whereas the gap current had the greatest effect. The maximum achieved material removal rate was 11.807 mm<sup>3</sup>/min. At a high material removal rate, the observed thickness of the white layer on the horizontal surface ranged from 12.92 μm to 14.24 μm. In the same way, the maximum and minimum values for the vertical surface were determined to be 15.58 μm and 11.67 μm, respectively. According to scanning electron microscopy, the layer thickness was less than 20 μm, and barely noticeable surface cracks were observed in specimens with low, medium and high material removal rates. Obviously, due to the cryogenic processing of the workpiece and the external magnetic strength, there was a slight cracking of the surface and the formation of a white layer.

**For citation:** Sawant D., Bulakh R., Jatti V., Chinchani S., Mishra A., Sefene E.M. Investigation on the electrical discharge machining of cryogenic treated beryllium copper (BeCu) alloys. *Obrabotka metallov (tehnologiya, 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. (In Russian).

#### \* Corresponding author

Jatti Vijaykumar S., Ph.D. (Engineering), Professor

Symbiosis Institute of Technology,

Pune – 412115, Maharashtra State, India

Tel.: 91-2028116300, e-mail: vijaykumar.jatti@sitpune.edu.in

## References

1. 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.
2. Akıncıoğlu S. Taguchi optimization of multiple performance characteristics in the electrical discharge machining of the TiGr2. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 2022, vol. 20 (2), pp. 237–253. DOI: 10.22190/FUME201230028A.
3. Danish M., Al-Amin M., Abdul-Rani A.M., Rubaiee S., Ahmed A., Zohura F.T., Ahmed R., Yildirim M.B. Optimization of hydroxyapatite powder mixed electric discharge machining process to improve modified surface features of 316L stainless steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2023, vol. 237 (3), pp. 881–895. DOI: 10.1177/09544089221111584.
4. Kam M., İpekçi A., Argun K. Experimental investigation and optimization of machining parameters of deep cryogenically treated and tempered steels in electrical discharge machining process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, vol. 236 (5), pp. 1927–1935. DOI: 10.1177/09544089221078133.
5. Gautam N., Goyal A., Sharma S.S., Oza A.D., Kumar R. Study of various optimization techniques for electric discharge machining and electrochemical machining processes. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 57, pp. 615–621. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.005.
6. Shukla S.K., Priyadarshini A. Application of machine learning techniques for multi objective optimization of response variables in wire cut electro discharge machining operation. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 969, pp. 800–806. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.969.800.
7. Kumar Vin., Kumar Vik., Jangra K.K. An experimental analysis and optimization of machining rate and surface characteristics in WEDM of Monel-400 using RSM and desirability approach. *Journal of Industrial Engineering International*, 2015, vol. 11 (3), pp. 297–307. DOI: 10.1007/s40092-015-0103-0.
8. Kumar S.V., Kumar M.P. Optimization of cryogenic cooled EDM process parameters using grey relational analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, vol. 28, pp. 3777–3784. DOI: 10.1007/s12206-014-0840-9.
9. 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.
10. Ghosh I., Sanyal M., Jana R., Dan P.K. Machine learning for predictive modeling in management of operations of EDM equipment product. *2016 Second International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)*. IEEE, 2016, pp. 169–174. DOI: 10.1109/ICRCICN.2016.7813651.
11. Ulas M., Aydur O., Gurgenc T., Ozel C. Surface roughness prediction of machined aluminum alloy with wire electrical discharge machining by different machine learning algorithms. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9 (6), pp. 12512–12524. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.08.098.
12. Kumar N.A., Babu A.S. Influence of input parameters on the near-dry WEDM of Monel alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, vol. 33 (1), pp. 85–92. DOI: 10.1080/10426914.2017.1279297.
13. Pogrebnyak A., Bratushka S., Beresnev V.M., Levintant-Zayonts N. Shape memory effect and superelasticity of titanium nickelide alloys implanted with high ion doses. *Russian Chemical Reviews*, 2013, vol. 82 (12), p. 1135. DOI: 10.1070/RC2013v082n12ABEH004344.
14. Ming W., Zhang S., Zhang G., Du J., Ma J., He W., Cao C., Liu K. Progress in modeling of electrical discharge machining process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 187, p. 122563. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122563.
15. 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.
16. Boopathi S. An extensive review on sustainable developments of dry and near-dry electrical discharge machining processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2022, vol. 144 (5), p. 050801. DOI: 10.1115/1.4052527.

17. Ali M.A., Samsul M., Hussein N.I., Rizal M., Izamshah R., Hadzley M., Kasim M.S., Sulaiman M.A., Sivarao S. The effect of EDM die-sinking parameters on material removal rate of beryllium copper using full factorial method. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2013, vol. 16 (1), pp. 44–50. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.16.01.2249.
18. Daneshmand S., Kahrizi E.F., Abedi E., Abdolhosseini M.M. Influence of machining parameters on electro discharge machining of NiTi shape memory alloys. *International Journal of Electrochemical Science*, 2013, vol. 8 (3), pp. 3095–3104. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)14376-8.
19. Daneshmand S., Monfared V., Lotfi Neyestanak A.A. Effect of tool rotational and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder in electro discharge machining characteristics of NiTi-60 shape memory alloy. *Silicon*, 2017, vol. 9 (2), pp. 273–283. DOI: 10.1007/s12633-016-9412-1.
20. Baroi B.K., Jagadish, Patowari P.K. A review on sustainability, health, and safety issues of electrical discharge machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, vol. 44 (2), p. 59. DOI: 10.1007/s40430-021-03351-4.
21. Kannan E., Trabelsi Y., Boopathi S., Alagesan S. Influences of cryogenically treated work material on near-dry wire-cut electrical discharge machining process. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2022, vol. 10 (1), p. 015027. DOI: 10.1088/2051-672X/ac53e1.
22. Abdulkareem S., Khan A.A., Konneh M. Reducing electrode wear ratio using cryogenic cooling during electrical discharge machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 45, pp. 1146–1151. DOI: 10.1007/s00170-009-2060-5.
23. Gill S.S., Singh J. Effect of deep cryogenic treatment on machinability of titanium alloy (Ti-6246) in electric discharge drilling. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, vol. 25 (6), pp. 378–385. DOI: 10.1080/10426910903179914.
24. Srivastava V., Pandey P.M. Performance evaluation of electrical discharge machining (EDM) process using cryogenically cooled electrode. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, vol. 27 (6), pp. 683–688. DOI: 10.1080/10426914.2011.602790.
25. Yildiz Y., Sundaram M., Rajurkar K., Nalbant M. The effects of cold and cryogenic treatments on the machinability of beryllium-copper alloy in electro discharge machining. *44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Madison, Wisconsin, 2011, pp. 1–6.
26. Singh R., Singh B. Comparison of cryo-treatment effect on machining characteristics of titanium in electric discharge machining. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2011, vol. 3, pp. 239–248. DOI: 10.15282/ijame.3.2011.1.0020.
27. Nadig D., Ramakrishnan V., Sampathkumaran P., Prashanth C. Effect of cryogenic treatment on thermal conductivity properties of copper. *AIP Conference Proceedings*, 2012, vol. 1435 (1), pp. 133–139.
28. Srivastava V., Pandey P.M. Effect of process parameters on the performance of EDM process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, vol. 14 (3), pp. 393–402. DOI: 10.1016/j.jmapro.2012.05.001.
29. Liqing L., Yingjie S. Study of dry EDM with oxygen-mixed and cryogenic cooling approaches. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6, pp. 344–350.
30. Jafferson J., Hariharan P. Machining performance of cryogenically treated electrodes in microelectric discharge machining: a comparative experimental study. *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, vol. 28 (4), pp. 397–402.
31. Mathai V., Vaghela R., Dave H., Raval H., Desai K. Study of the effect of cryogenic treatment of tool electrodes during electro discharge machining. *Proceedings of the Eighth International Conference on Precision Meso, Micro & Nano Engineering (COPEN-8: 2013)*, National Institute of Technology, Calicut, India, 2013, pp. 13–15.
32. Singh J., Singh G., Pandey P.M. Electric discharge machining using rapid manufactured complex shape copper electrode with cryogenic cooling channel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2021, vol. 235 (1–2), pp. 173–185. DOI: 10.1177/0954405420949102.
33. Prakash D., Tariq M., Davis R., Singh A., Debnath K. Influence of cryogenic treatment on the performance of micro-EDM tool electrode in machining of magnesium alloy AZ31B. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 39, pp. 1198–1201. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.589.



34. Karthik Pandiyan G., Prabakaran T., Jafrey Daniel James D., Sivalingam V. Machinability analysis and optimization of electrical discharge machining in AA6061-T6/15wt.% SiC composite by the multi-criteria decision-making approach. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, vol. 31 (5), pp. 3741–3752. DOI: 10.1007/s11665-021-06511-8.

35. 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. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 128, pp. 5595–5612. DOI: 10.1007/s00170-023-12269-1.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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>).