



Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

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



Особенности применения электродов-инструментов, изготовленных аддитивными технологиями, при электроэрозионной обработке изделий

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

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

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

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:

Поступила: 11 июня 2024
 Рецензирование: 25 июня 2024
 Принята к печати: 28 июня 2024
 Доступно онлайн: 15 сентября 2024

Ключевые слова:

Аддитивные технологии
 Селективное лазерное сплавление
 Копировально-прошивная электро-
 эрозионная обработка
 Сила тока
 Напряжение
 Время включения импульса
 Шероховатость поверхности
 Износ электрода-инструмента

Финансирование

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 23-29-00104. <https://rscf.ru/project/23-29-00104/>

Благодарности

Авторы выражают благодарность доценту каф. ИТМ ФГАОУ ВО «ПНИПУ» Е.А. Морозову за помощь в изготовлении образцов электродов-инструментов методом СЛС из мартенситностареющей стали MS1.

Для цитирования: Особенности применения электродов-инструментов, изготовленных аддитивными технологиями, при электроэрозионной обработке изделий / Т.Р. Абляз, В.Б. Блохин, Е.С. Шлыков, К.Р. Муратов, И.В. Осинников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 135–148. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-135-148.

*Адрес для переписки

Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
 Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
 Комсомольский проспект, 29,
 614990, г. Пермь, Россия
 Тел.: +7 961 759-88-49, e-mail: Kruspert@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе представлены результаты исследования применения электрода-инструмента (ЭИ), изготовленного методом селективного лазерного сплавления из порошка мартенситностареющей стали MS1 для копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭ-ЭО). **Цель работы:** экспериментальное исследование особенностей применения аддитивно изготовленных ЭИ при КПЭЭО ответственных изделий. **Методы исследования.** Изготовление образцов выполнялось на установке ReaLizer SLM 50. В качестве исходного материала использовался порошок MS1 сферической формы со средним размером частиц 30 мкм. Для отработки режимов и выбора образца ЭИ с наименьшим количеством поверхностных дефектов было отработано четыре режима изготовления, выбран наилучший образец для дальнейшего исследования. КПЭЭО проводилась на оборудовании EMT Smart CNC в среде трансформаторного масла. Образцы были установлены в зажим при прямой полярности и применялись в качестве ЭИ, в качестве электрода-детали служила пластина 12X18H10T. Исследование проводилось с помощью факторного эксперимента (типа 2³) с центром плана. Входные данные факторного эксперимента – сила тока I , А, напряжение U , В, время включения импульса T_{on} , мкс. Выходными параметрами являлись параметр шероховатости по Ra и γ – износ ЭИ. Измерение параметра шероховатости по Ra проводилось на установке Mahr Perthometer S2. **Результаты и обсуждение.** Методом СЛС изготовлены образцы ЭИ из порошка MS1, выбран наиболее качественный образец № 4 для КПЭЭО. Получены эмпирические уравнения, описывающие взаимосвязь параметра качества поверхности – шероховатости по Ra и γ – износа ЭИ, изготовленного из мартенситностареющей стали MS1, в зависимости от режимов КПЭЭО. На минимальном режиме при силе тока $I = 4$ А и напряжении $U = 50$ В износ ЭИ $\gamma = 0,0063875$ г. Максимальный износ ЭИ составляет $\gamma = 0,13938$ г при силе тока $I = 8$ А и напряжении $U = 50$ В. Установлено, что при постоянном времени включения импульса $T_{on} = 75$ мкс наименьшая шероховатость $Ra = 2,83$ мкм получена при силе тока $I = 4$ А и напряжении $U = 100$ В, а максимальная шероховатость составила $Ra = 4,1568$ мкм при $I = 8$ А и $U = 100$ В.

Введение

Актуальность применения аддитивных технологий при изготовлении электродов для электроэрозионной обработки (ЭЭО) возникла в связи с повышенными требованиями к точно-

сти и качеству изготовления сложнопрофильных изделий [1–3]. Установлено, что один из самых рациональных аддитивных методов получения электродов-инструментов (ЭИ) – это технология селективного лазерного сплавления (СЛС) [4–8].

Отмечается, что применение аддитивных технологий позволяет получить требуемые параметры повторяемой геометрии сложнопрофильных элементов, а также обеспечить повышенные показатели производительности и стойкости ЭИ путем применения новых составов порошковых материалов. В работах [9–13] отмечена эффективность применения композитных электродов-инструментов, полученных с применением аддитивных технологий.

Принцип технологии СЛС заключается в разбивке изделия на слои и последующей печати изделия с циклическим повторением операций. Повышение требований к точности, качеству и надежности изготовления изделий требует применения ЭИ высокого качества, повторяющих профиль поверхности. Требуемая точность размеров изделий, обрабатываемых методом ЭЭО, варьируется от 12-го до 6-го качества, а требуемая шероховатость по Ra – от 3,2 до 0,8 мкм. Повышенные требования к точности и шероховатости связаны с эксплуатационными особенностями; обрабатываемые поверхности находятся в сопряжении с кинематическими узлами и механизмами.

В работах [14–18] рассматривается метод СЛС для получения металлических электродов-инструментов. Авторы отмечают, что применение аддитивных технологий для выращивания ЭИ позволяет не только обеспечить требуемые параметры повторяемой геометрии сложнопрофильных элементов изделий, но и получить повышенные показатели производительности и стойкости ЭИ путем применения новых порошковых материалов.

Основные параметры процесса СЛС – мощность лазера, скорость сканирования, тип и расстояние штриховки, толщина слоя и характеристики порошка – влияют на образование дефектов в процессе выращивания ЭИ. Пористость является наиболее частым и сложным дефектом для устранения при селективном лазерном сплавлении. На образование пор оказывают влияние свойства исходного порошкового материала, параметры установки и режимы выращи-

вания [19–21]. Еще один дефект, появляющийся при применении порошковых аддитивных технологий, – несплавления, которые возникают при недостаточном перекрытии единичных дорожек друг с другом. Неверно подобранные режимы для определенного материала приводят к повышению пористости. При недостаточном значении мощности в процессе СЛС порошковый слой не полностью расплавляется, это вызывает эффект сферодизации или несплавление с предыдущим слоем из-за наличия в дорожке несплавленных частиц [22]. Повышение значения мощности приводит к интенсивному испарению материала или наиболее легкоплавких компонентов порошка, что вызывает образование пор. Наличие подобных дефектов способствует интенсификации разрушения ЭИ в процессе ЭЭО. Наличие нестабильности в структуре ЭИ может также сказаться на формировании стабильного процесса искрообразования при копировально-прошивной ЭЭО (КПЭЭО), что негативным образом отразится на качестве обработки.

В настоящее время сформированные подходы к проектированию конфигурации ЭИ и назначению режимов обработки полагаются на методики проектирования нагруженных ответственных изделий. Данные подходы не включают в себя особенности физической стороны процесса ЭЭО. Следует оптимизировать размеры и форму ЭИ не только с учетом массовых и механических характеристик, но также с учетом его физических свойств (электросопротивления и возможности формирования стабильного канала искрообразования). Исходные параметры ЭИ оказывают влияние на формируемую поверхность и непосредственно на расход ЭИ. Структурные дефекты интенсифицируют процесс расхода ЭИ в процессе КПЭЭО. На получение требуемого качества поверхности оказывает влияние шероховатость ЭИ не только до КПЭЭО, но и в самом процессе. Исходя из этого установлено, что обеспечение предъявленных требований качества ЭИ является актуальной научно-технологической задачей.

Целью работы является экспериментальное исследование особенностей применения аддитивно изготовленных ЭИ при КПЭЭО ответственных изделий. Для достижения указанной цели были поставлены следующие *задачи*.

Разработать рациональную методику изготовления образцов электродов-инструментов из мартенситностареющей стали MS1 методом селективного лазерного сплавления. Эти образцы должны обладать минимальным количеством структурных дефектов для дальнейшей КПЭЭО.

Установить эмпирическую зависимость параметра качества поверхности аддитивно изготовленного ЭИ из мартенситностареющей стали MS1 в зависимости от режимов КПЭЭО.

Установить эмпирическую зависимость износа аддитивно изготовленного ЭИ из мартенситностареющей стали MS1 в зависимости от режимов КПЭЭО.

Оценить влияние режимов КПЭЭО на качество поверхности аддитивно изготовленного ЭИ из мартенситностареющей стали MS1.

Методика исследований

Исследования проводились на базе центра коллективного пользования «Центр аддитивных технологий» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Изготовление опытных ЭИ осуществлялось методом аддитивных технологий (СЛС). ЭИ изготавливались из порошка мартенситностареющей стали марки MS1. Частицы порошка обладали средним размером 20...40 мкм и имели сферическую форму. Мартенситностареющие стали – это уникальные низкоуглеродистые мартенситные стали, которые получают прочность за счет интерметаллических осадков, образующихся в процессе термической обработки при старении. Низкое содержание углерода обеспечивает хорошую свариваемость, а значительные легирующие добавки позволяют добиться высокой прочности за счет механизмов закалки в виде осадков. В процессе СЛС возникают сле-

дующие дефекты: трещины, поры и достаточно грубая поверхность с наличием приплавленных частичек порошка.

Необходима проработка режимов сплавления на данном порошке MS1. Проведение пробных режимов позволит получить ЭИ с минимальным количеством дефектов.

Проработка режимов сплавления проводилась на установке ReaLizer 50 (рис. 3, а), которая работает по технологии СЛС и используется преимущественно для изготовления мелкогабаритных деталей из порошков различной номенклатуры. Установка оснащена импульсным волоконным лазером с возможностью регулировки траектории перемещения луча, а также продолжительности засветки. Одним из основных достоинств установки ReaLizer SLM 50 является высокая детализация изделий. В качестве защитного газа для спекания применялся аргон. Для получения ЭИ использовались четыре режима (табл. 1) сплавления порошкового материала MS1 и был выбран наилучший по качеству образец.

Параметры, варьируемые при изготовлении ЭИ из порошка мартенситностареющей стали MS1 методом СЛС: время засветки каждой точки – t , мкс; рабочая сила тока – I , мА; расстояние между точками траектории движения лазера – S , мкм; средняя мощность лазерного излучения – P_{cp} , Вт; шаг заполнения, мкм; толщина единичного слоя – h , мкм; скорость сканирования – V , м/с.

Образцы изготовлены в виде параллелепипедов длиной 30 мм и сечением 5×5 мм. На рис. 1 представлены полученные образцы на подложке для выращивания.

Высокая плотность энергии в процессе СЛС приводит к чрезмерному испарению материала и образованию брызг, из-за чего образуется большое количество пор. Поры снижают уста-

Таблица 1

Table 1

Технологические режимы изготовления ЭИ
Technological modes of manufacturing the tool electrode

№	t , мкс	I , мА	S , мкм	P_{cp} , Вт	Шаг заполнения, мкм	h , мкм	V , м/с
1	40	1400	20	35	0,05	30	1
2	40	1400	30	35	0,05	30	0,75
3	20	1200	20	30	0,05	30	1
4	20	1400	20	35	0,05	30	1



Рис. 1. Образцы электродов-инструментов
 Fig. 1. Samples of tool electrodes

лостные характеристики и механические свойства получаемых изделий, действуя как концентраторы напряжений. Трещины на поверхности изделий, полученных методов СЛС, вызваны большим температурным градиентом между ванной расплава и затвердевшим металлом.

На образцах № 1–3 (рис. 2, а–в) присутствуют хаотически расположенные поры диаметром 40...65 мкм. Поверхность образца № 4 характеризуется наименьшим количеством структурных дефектов (пор, которые в диаметре составляют 20...28 мкм, и трещин шириной до 2...3 мкм). При исследовании полученных образцов на наличие дефектов (поры, микротрещины) установлено, что наиболее пригодный образец для КПЭ-ЭО – под номером 4 (рис. 2, г).

Копировально-прошивная электроэрозионная обработка проводилась на установке Electronica Smart CNC (рис. 2, б) в среде трансформаторного масла. Обрабатываемая заготовка выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Значения и интервал входных параметров представлены в табл. 2. Для оценки параметра качества поверхности по *Ra* использовался профилометр Mahr Perthometer S2 (рис. 2, в). Оценка проводилась согласно методике ГОСТ 2789–73.

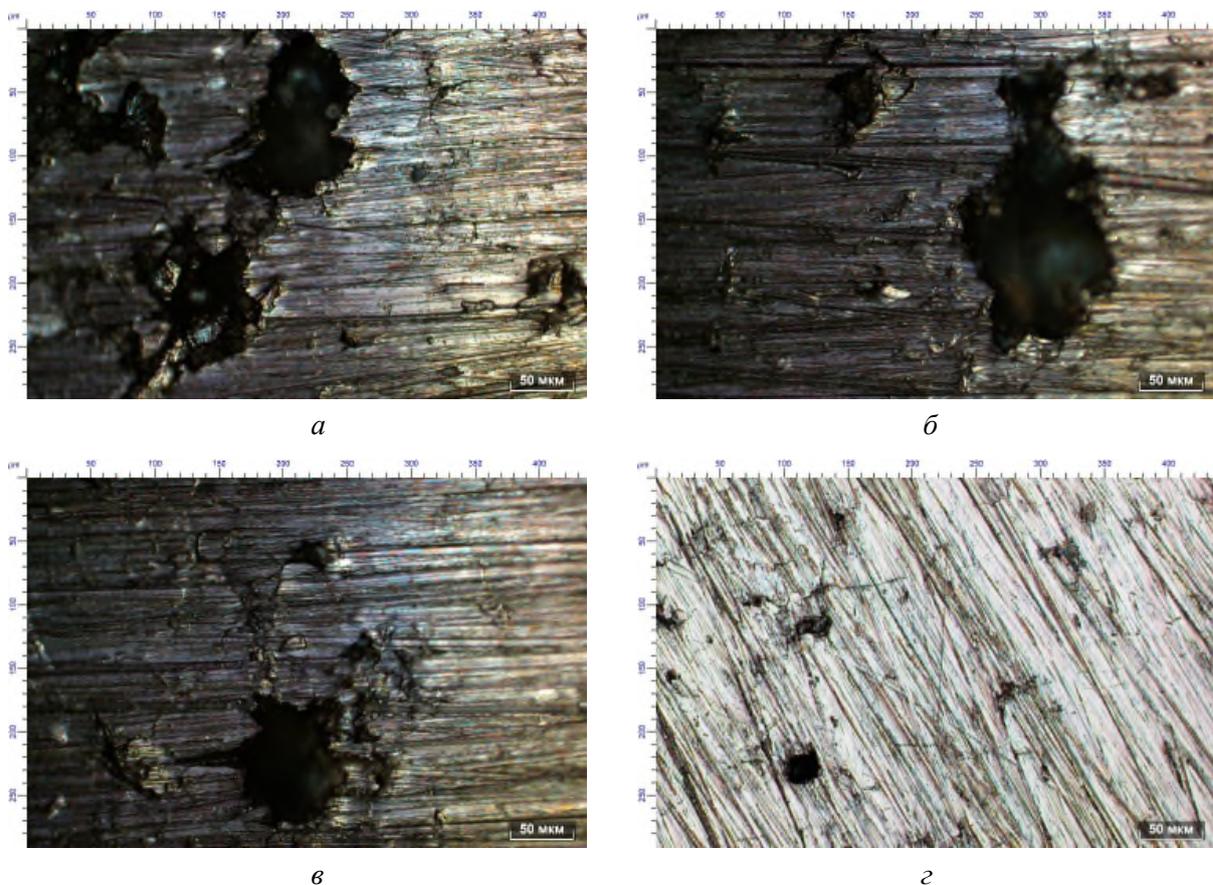


Рис. 2. Поверхности образцов:
 а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4
 Fig. 2. Surfaces of sample:
 а – No.1; б – No.2; в – No.3; г – No.4

Режимы копировально-прошивной электроэрозионной обработки
Modes of copy-piercing EDM machining

Режим	Сила тока I , А	Время включения импульса T_{on} , мкс	Напряжение U , В
Минимальный уровень	4	50	50
Средний уровень	6	75	75
Максимальный уровень	8	100	100

Рельеф поверхности образцов и количество дефектов на поверхности оценивались с помощью инвертированного металлографического микроскопа научно-исследовательского класса NIM900 (рис. 3, *з*) при увеличениях $\times 300$ и $\times 500$.

С целью определения зависимостей формирования параметра шероховатости по Ra , а также износа рабочей поверхности ЭИ, изготов-

ленного из мартенситностареющей стали MS1 и полученного с применением технологии селективного лазерного сплавления, проведен полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 с центром плана. Значения факторов закодированы в матрицу с помощью координат преобразования. Матрица планирования эксперимента показана в табл. 3. Выходными параметрами явля-

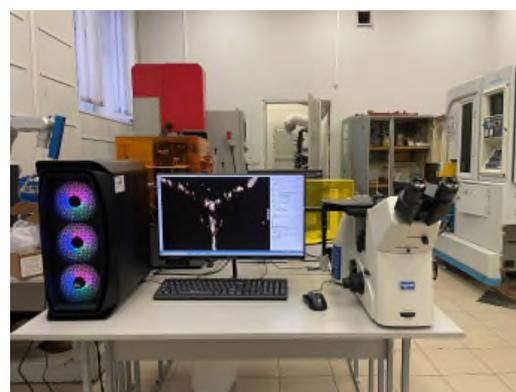
*а**б**в**г*

Рис. 3. Установки для проведения эксперимента и оценки результатов:

а – ReaLizer SLM 50; *б* – микроскоп NIM900; *в* – копировально-прошивной электроэрозионный станок Electronica Smart CNC; *г* – профилометр Mahr Perthometer S2

Fig. 3. Facilities for conducting the experiment and evaluating the results:

а – ReaLizer SLM 50; *б* – NIM900 microscope; *в* – Electronica Smart CNC copy-piercing EDM machine; *г* – Mahr Perthometer S2 profilometer

Таблица 3

Table 3

Закодированная матрица планирования
Coded planning matrix

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0

ются параметр шероховатости ЭИ по Ra , мкм, и износ ЭИ γ , г.

Подробная методика проведения ПФЭ представлена в работах [23, 24]. Согласно данной методике проведено девять экспериментов и по-

лучены результаты (табл. 4), отражающие зависимость шероховатости ЭИ по Ra и износа электрода от режимов КПЭЭО с использованием ЭИ, изготовленного по технологии СЛС из мартенситностареющей стали MS1.

Таблица 4

Table 4

Матрица результатов экспериментов
Matrix of experimental results

№ опыта	Ra , мкм	γ , г
1	2,9475	0,0062
2	4,33693	0,01
3	3,0374	0,0059
4	3,34163	0,0172
5	2,8057	0,0082
6	3,8035	0,0021
7	3,016	0,0161
8	4,6673	0,0156
9	3,50183	0,001

Результаты и их обсуждение

В результате проведения полного факторного эксперимента получены эмпирические зависимости, которые устанавливают взаимосвязь между выходными параметрами и режимами обработки. В работе предположена линейная связь между независимой переменной и входными факторами. Эмпирическая модель зависимости параметра износа ЭИ от режимов обработки

(сила тока I , А; напряжение U , В; время включения импульса T_{on} , мкс), имеет следующий вид:

$$\gamma = 0,002997 + 0,00214325I + 0,00010806U - 0,00027248T_{on} - 0,00005425IU + 0,0000028992T_{on}U + 0,00003276IT_{on}. \quad (1)$$

По критерию Фишера была выполнена проверка адекватности математической модели:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{адекв}}^2}{S_y^2} < F_{\text{табл}}; \quad (2)$$

$$F_{\text{расч}} = 0,003 < F_{\text{табл}} = 3,24. \quad (3)$$

где $F_{\text{расч}}$ и $F_{\text{табл}}$ – значения критерия Фишера (соответственно расчетное и табличное); $S_{\text{адекв}}^2$ – дисперсия адекватности; S_y^2 – дисперсия воспроизводимости.

Исходя из того, что $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, при уровне зависимости $\alpha = 0,05$ можно сделать вывод о том, что модель удовлетворяет критерию адекватности. Полученная математическая модель достоверно отражает зависимость выходного параметра (износа ЭИ) от режимов КПЭЭО.

На рис. 4 представлен график гиперповерхности отклика. На графике установлена зависимость входных данных (режимов обработки I и U при постоянном $T_{\text{он}} = 75$ мкс) на износ ЭИ (γ). Установлено, что на минимальном режиме при силе тока $I = 4$ А и напряжении $U = 50$ В износ ЭИ составляет $\gamma = 0,0063875$ г. При силе тока $I = 8$ А и напряжении $U = 50$ В зафиксирован максимальный износ ЭИ, который составляет $\gamma = 0,13938$ г. Физические особенности характера разрушения материала в результате воздей-

ствия ЭЭО напрямую зависят от величины энергии единичного разряда. Значение величины энергии импульса (разряда) растет прямо пропорционально с повышением силы тока. Далее происходит электроэрозионное разрушение ЭИ. При высоких значениях силы тока температура в зоне искрообразования повышается, что также приводит к интенсивному износу ЭИ.

Эмпирическая модель зависимости параметра качества поверхности – шероховатости ЭИ по Ra – от режимов обработки (сила тока I , А; напряжение U , В; время включения импульса $T_{\text{он}}$, мкс) имеет вид

$$\begin{aligned} Ra = & -0,7004 + 1,070300415I + \\ & + 0,03421764U + 0,04854912T_{\text{он}} - \\ & - 0,0106517IU - 0,0006473216T_{\text{он}}U - \\ & - 0,01304028IT_{\text{он}} + 0,0001738704IT_{\text{он}}U. \quad (4) \end{aligned}$$

На рис. 5 представлен график гиперповерхности, показывающий влияние таких параметров, как напряжение и сила тока, на формирование качества поверхности. Установлено, что при постоянном времени включения импульса $T_{\text{он}} = 75$ мкс наименьшая шероховатость ЭИ $Ra = 2,83$ мкм получена при силе тока $I = 4$ А и напряжении $U = 100$ В, а максимальная

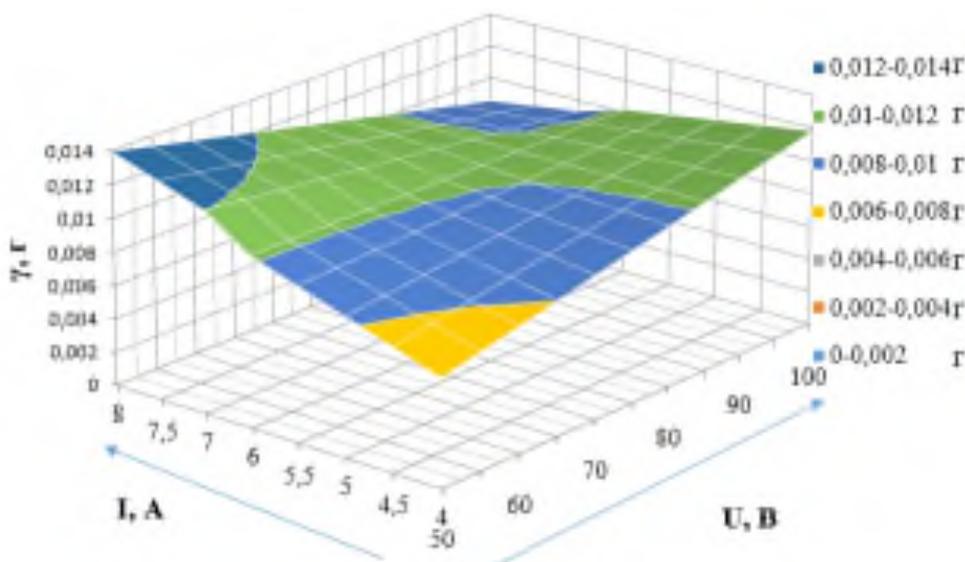


Рис. 4. Гиперповерхность регрессионной модели износа ЭИ при постоянном времени включения импульса $T_{\text{он}} = 75$ мкс; γ – износ ЭИ, г; I – сила тока, А; U – напряжение, В

Fig. 4. The regression model hypersurface of electrode flow rate at constant pulse duration $T_{\text{он}} = 75$ μ s; γ is a tool electrode wear (g); I is a current (A); U is a voltage (V)

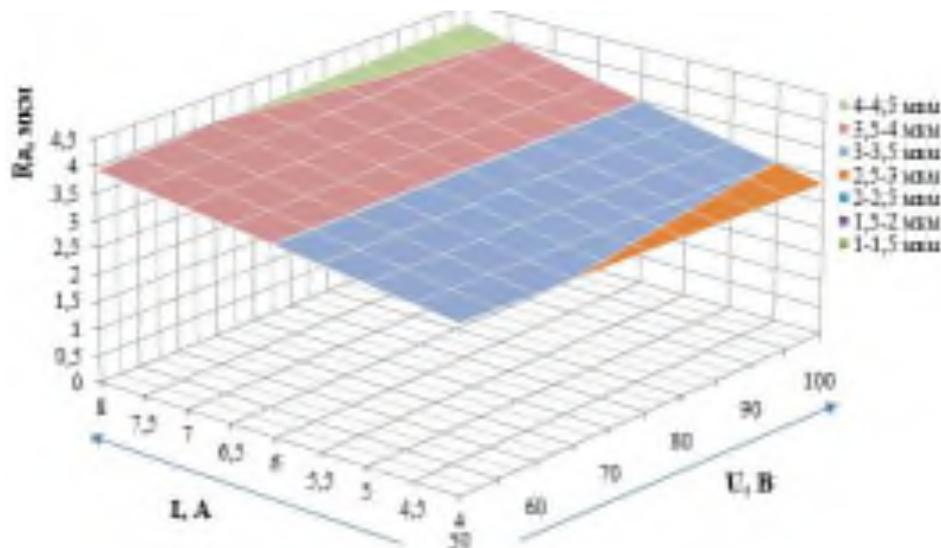


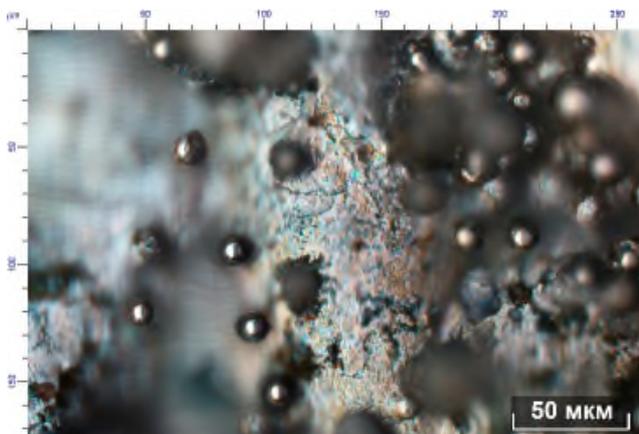
Рис. 5. Гиперповерхность регрессионной модели шероховатости поверхности ЭИ при постоянном времени включения импульса $T_{on} = 75$ мкс; Ra – параметр шероховатости, мкм; I – сила тока, А; U – напряжение, В

Fig. 5. The regression model hypersurface of the TE surface roughness at constant pulse on time $T_{on} = 75$ μ s; Ra is the roughness parameter (μ m); I is a current (A); U is a voltage (V)

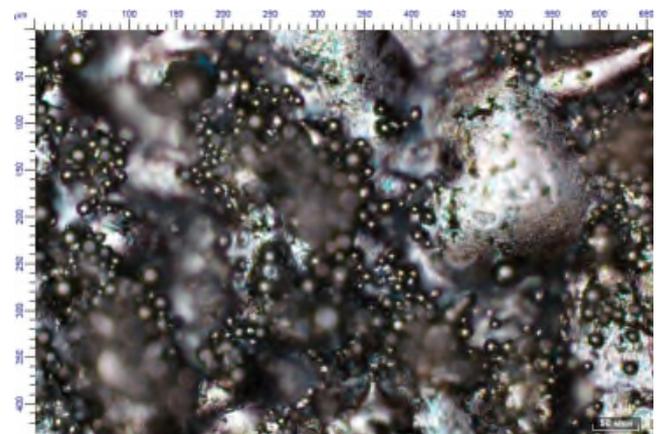
шероховатость поверхности ЭИ составила $Ra = 4,1568$ мкм при $I = 8$ А и $U = 100$ В. Значения величин размеров параметров лунок изменяются с изменением мощности единичных разрядов, действующих в межэлектродном зазоре. Формирование более точной и чистой поверхности ЭИ происходит при минимальном значении мощности разрядов, которые зависят от величины силы тока. Повышение силы тока сопровождается увеличением глубины лунок и получением более грубой шероховатости поверхности ЭИ.

На рис. 6–8 представлены снимки поверхности ЭИ после СЛС и после КПЭЭО-обработки

на минимальном и максимальном режимах. На поверхности ЭИ (рис. 6), изготовленного из мартенситостареющей стали MS1 методом СЛС, наблюдаются участки проплавленных единиц порошка MS1. Установлено, что проплавленные участки располагаются хаотично на поверхности ЭИ, а также наблюдаются поры между проплавленными участками. После КПЭЭО поверхность ЭИ приобретает гладкую и ровную морфологию. При КПЭЭО на максимальных режимах при $I = 8$ А, $T_{on} = 100$ мкс, $U = 100$ В формируются впадины и хаотичные трещины, сопровождаемые зонами расплава материала (рис. 7, 8). При



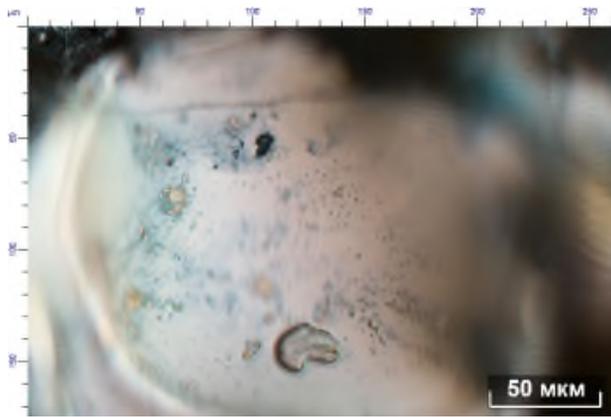
а



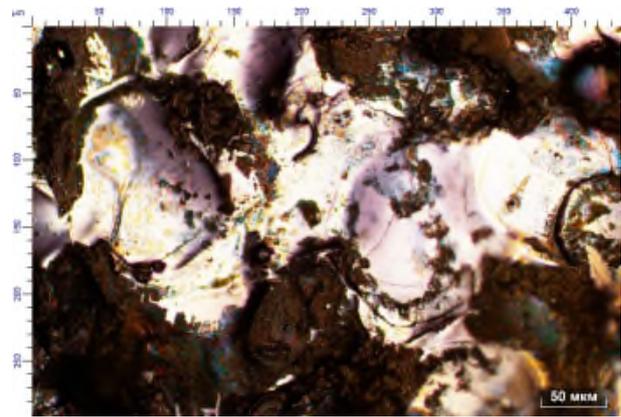
б

Рис. 6. Поверхность электрода до обработки (после 3D-печати) при увеличении $\times 500$ (а) и $\times 300$ (б)

Fig. 6. Electrode surface before machining (after 3D printing) at magnifications of $\times 500$ (a) and $\times 300$ (b)



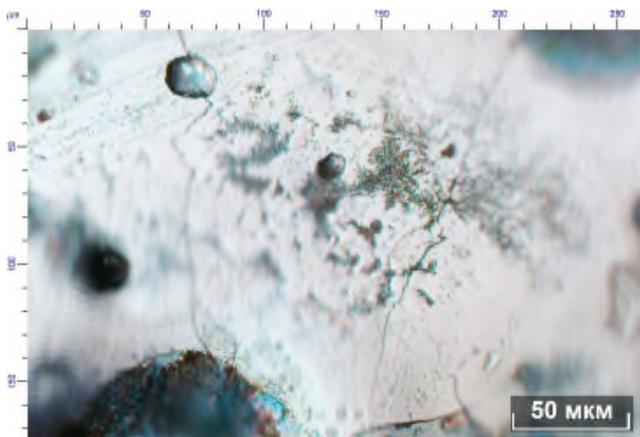
а



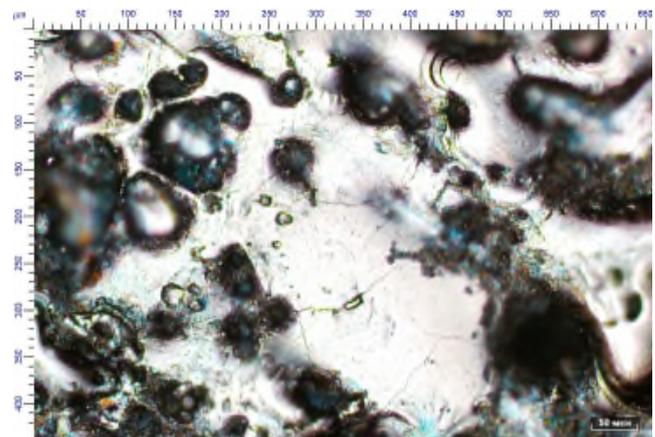
б

Рис. 7. Поверхность электрода после КПЭЭО на минимальном режиме при увеличении $\times 500$ (а) и $\times 300$ (б)

Fig. 7. Electrode surface after electrical discharge machining at minimum mode at magnification $\times 500$ (a) and $\times 300$ (b)



а



б

Рис. 8. Поверхность электрода после КПЭЭО на максимальном режиме при увеличении $\times 500$ (а) и $\times 300$ (б)

Fig. 8. Electrode surface after electrical discharge machining at maximum mode at magnification $\times 500$ (a) and $\times 300$ (b)

КПЭЭО $I = 8$ А, $U = 100$ В и $T_{on} = 100$ мкс установлено наличие хаотичных трещин шириной до 1...3 мкм (рис. 8). Трещины на поверхности ЭИ возникают из-за быстрого нагрева поверхности (с повышением величины силы тока и времени включения импульса повышается температура в зоне обработки) и быстрого охлаждения диэлектрической жидкостью. Впадины на поверхности ЭИ после КПЭЭО связаны со скоплением шлама от продуктов разрушения материала ЭИ и электрода-детали (ЭД). С повышением силы тока и времени включения импульса происходит интенсификация процесса разрушения. Зоны расплава материала возникают с увеличением

энергии единичных импульсов (с повышением силы тока).

Процесс электроэрозионной обработки сопровождается высокими температурами в месте пробоя. Быстрый нагрев и последующие циклы охлаждения вызывают термические напряжения на поверхности ЭИ, которые способствуют образованию трещин на поверхности ЭИ. Присутствие микротрещин и иных поверхностных дефектов приводит к макродефектам поверхностного слоя и снижению эксплуатационных свойств используемых ЭИ. Рельеф обработанной поверхности аддитивно выращенного ЭИ, представленный на рис. 7, а, при увеличении

×500 показывает, что для исключения поверхностных дефектов ЭИ требуется применение минимального режима КПЭЭО при силе тока $I = 4$ А и напряжении $U = 100$ В.

Выводы

Изготовлены электроды-инструменты методом селективного лазерного сплавления из порошка мартенситностареющей стали MS1. Установлено, что образец № 4 содержит минимальное количество пор и трещин. Образец № 4 изготовлен при рабочей силе тока 1400 мА, времени засветки единичной точки 20 мкс, расстоянии между точками 20 мкм, средней мощности лазерного излучения 35 Вт, шаге заполнения 0,05 мкм, толщине слоя 30 мкм и скорости сканирования 1 м/с.

Получена регрессионная зависимость между режимами КПЭЭО и износом ЭИ при обработке ЭИ из мартенситностареющей стали. На минимальном режиме при силе тока $I = 4$ А и напряжении $U = 50$ В износ электрода минимальный и составляет $\gamma = 0,0063875$ г. Максимальный износ электрода-инструмента составляет $\gamma = 0,13938$ г при силе тока $I = 8$ А и напряжении $U = 50$ В.

Получена регрессионная зависимость между режимами КПЭЭО и параметром качества поверхности шероховатости аддитивно выращенного ЭИ из мартенситностареющей стали MS1. Показано, что при постоянном времени включения импульса $T_{on} = 75$ мкс наименьшая шероховатость ЭИ составляет $Ra = 2,83$ мкм, она была получена при силе тока $I = 4$ А и напряжении $U = 100$ В, а максимальная шероховатость ЭИ $Ra = 4,1568$ мкм – при $I = 8$ А и $U = 100$ В.

Установлено, что на поверхности аддитивно выращенного ЭИ из мартенситностареющей стали MS1 присутствуют хаотически расположенные поверхностные дефекты (микротрещины, впадины, вырывы и зоны переплава), снижающие прочностные характеристики ЭИ. Для исключения поверхностных дефектов и формирования однородной поверхности следует использовать чистовые режимы со значением силы тока $I = 4$ А, напряжения $U = 100$ В и времени включения импульса $T_{on} = 75$ мкс. Установлено, что с повышением силы тока до 8 А в межэлектродном зазоре происходит увеличение температуры и величины разряда импульсов, что приводит к структурным дефектам.

Список литературы

1. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 6 (2). – P. 13–26. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.002.
2. Dimla D.E., Hopkinson N., Rothe H. Investigation of complex rapid EDM electrodes for rapid tooling applications // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2004. – Vol. 23 (3). – P. 249–255. – DOI: 10.1007/s00170-003-1709-8.
3. Ho K.H., Newman S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM) // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 43, iss. 13. – P. 1287–1300. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
4. Experimental study on debris evacuation during slot EDMing / I. Ayesta, O. Flaño, B. Izquierdo, J.A. Sanchez, S. Plaza // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 42. – P. 6–11. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.174.
5. Application of additive manufactured tungsten carbide-cobalt electrodes with interior flushing channels in S-EDM / E. Uhlmann, J. Polte, R. Bolz, S. Yabroudi, J. Streckenbach, A. Bergmann // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 95. – P. 460–465. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.136.
6. Application of additive manufactured tungsten carbide tool electrodes in EDM / E. Uhlmann, A. Bergmann, R. Bolz, W. Gridin // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 68. – P. 86–90. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.027.
7. Rathi M.G., Mane D.V. An overview of additive mixed EDM // *International Journal of Scientific and Research Publications*. – 2014. – Vol. 4 (11). – P. 1–6.
8. Design and additive manufacturing of optimized electrodes for energy storage applications / M.D. Batista, S. Chandrasekaran, B.D. Moran, M.S. Troya // *Carbon*. – 2023. – Vol. 205. – P. 262–269. – DOI: 10.1016/j.carbon.2023.01.044.
9. Gu D., Shen Y., Xiao J. Influence of processing parameters on particulate dispersion in direct laser sintered WC-Co p/Cu MMCs // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2008. – Vol. 26 (5). – P. 411–422. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2007.09.005.
10. Investigation of the machinability of composite materials electrode-tools while EDM / A.O. Grisharin, N.D. Ogleznev, K.R. Muratov, T.R. Ablyaz // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 510 (1). – P. 1–5. – DOI: 10.1088/1757-899X/510/1/012006.
11. Singh P., Sidhu S.S., Payal H.S. Fabrication and machining of metal matrix composites: a review // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2015. – Vol. 31 (5). – P. 1–21.



12. *Thakur A., Pabla B.S.* Surface modification using composite electrodes in EDM: a review // *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology.* – 2023. – Vol. 11 (10). – P. 1008–1013. – DOI: 10.22214/ijraset.2023.56134.

13. Development and application of new composite materials as EDM electrodes manufactured via selective laser sintering / F.L. Amorim, T. Czelusniak, C.F. Higa, A. Lohrengel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2014. – Vol. 72. – P. 9–12. – DOI: 10.1007/s00170-014-5765-z.

14. Performance of sinking EDM electrodes made by selective laser sintering technique / F.L. Amorim, A. Lohrengel, N. Muller, G. Schafer, T. Czelusniak // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2012. – Vol. 65. – P. 9–12. – DOI: 10.1007/s00170-012-4267-0.

15. Prospects for laser based powder bed fusion in the manufacturing of metal electrodes: a review / P. Nyamekye, P. Nieminen, M.R. Bilesan, E. Repo, H. Piili, A. Salminen // *Applied Materials Today.* – 2021. – Vol. 23. – P. 1–20. – DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101040.

16. Residual porosity of 3D-LAM-printed stainless steel electrodes allows galvanic exchange platinisation / J. Weber, A.J. Wain, H. Piili, A. Vuorema // *ChemElectroChem.* – 2016. – Vol. 3 (6). – P. 1–24. – DOI: 10.1002/celec.201600098.

17. *Sahu A.K., Mahapatra S.S.* Performance analysis of tool electrode prepared through laser sintering process during electrical discharge machining of titanium // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2020. – Vol. 106 (6). – P. 1017–1041. – DOI: 10.1007/s00170-019-04675-1.

18. Experimental research on preparation and machining performance of porous electrode in electrical discharge machining / Y. Jiang, L. Kong, J. Yu, C. Hua //

Journal of Mechanical Science and Technology. – 2022. – Vol. 36 (1–3). – P. 1–15. – DOI: 10.1007/s12206-022-1134-2.

19. *Zhang B., Li Y., Bai Q.* Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review // *Chinese Journal of Mechanical Engineering.* – 2017. – Vol. 30 (3). – P. 515–527. – DOI: 10.1007/s10033-017-0121-5.

20. Defect, microstructure, and mechanical property of Ti-6Al-4V alloy fabricated by high-power selective laser melting / S. Cao, Z. Chen, K. Yang, S.C.V. Lim // *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society.* – 2017. – Vol. 69 (12). – P. 2684–2692. – DOI: 10.1007/s11837-017-2581-6.

21. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process / R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2012. – Vol. 59 (9). – P. 1025–1035. – DOI: 10.1007/s00170-011-3566-1.

22. *Promoppatum P., Yao S.C.* Analytical evaluation of defect generation for selective laser melting of metals // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2019. – Vol. 103. – P. 1–4. – DOI: 10.1007/s00170-019-03500-z.

23. Study of the EDM process of bimetallic materials using a composite electrode tool / T.R. Ablyaz, E.S. Shlykov, K.R. Muratov, A.V. Zhurin // *Materials.* – 2022. – Vol. 15 (3). – P. 1–13. – DOI: 10.3390/ma15030750.

24. *Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R.* Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools // *Materials.* – 2021. – Vol. 14 (20). – P. 1–19. – DOI: 10.3390/ma14206105.

Конфликт интересов

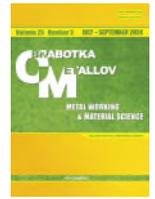
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 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



Features of the use of tool electrodes manufactured by additive technologies in electrical discharge machining of products

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

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

^a <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>, warkk98@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru;

^e <https://orcid.org/0009-0006-4478-3803>, ilyuhaosinnikov@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 June 2024

Revised: 25 June 2024

Accepted: 28 June 2024

Available online: 15 September 2024

Keywords:

Additive technologies

Selective laser melting

Copy-piercing electrical discharge machining

Current

Voltage

Pulse on time

Surface roughness

Tool electrode wear

Funding

The research was financially supported by the Russian Science Foundation under grant No. 23-29-00104. <https://rscf.ru/project/23-29-00104/>

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Associate Professor of the department. ITM FSAOU VO "PNRPU" Morozov E.A. for assistance in the manufacture of samples of electrode-tools using the SLS method from maraging steel MS1.

ABSTRACT

Introduction. The paper presents the results of a study of the use of a tool electrode (*TE*), manufactured by selective laser alloying from *MS1* maraging steel powder for copy-piercing electrical discharge machining (*EDM*). **Purpose of the work:** experimental study of the features of the use of additively manufactured *TE* in the *EDM* of critical products. **Research methods.** The specimens were prepared using a *Realizer SLM 50* system. The starting material was spherical *MS1* powder with an average particle size of 30 μm . To test the modes and select a *TE* sample with the least number of surface defects, four manufacturing modes were tested, and the best *TE* sample was selected for further research. The *EDM* was carried out on *EMT Smart CNC* equipment in a dielectric oil environment. The specimens were installed in a clamp with straight polarity and were used as *TE*; a *0.12C-18Cr-10Ni-Ti* steel plate served as the workpiece electrode. The study was conducted using a factorial experiment (type 23) with a central design. The input data of the factorial experiment is the current I (A), voltage U (V), pulse on time T_{on} (μs). The output parameters were the roughness parameter Ra and tool electrode wear γ . The roughness parameter Ra was measured using a *Mahr Perthometer S2*. **Results and discussion.** *TE* samples were made from *MS1* powder using the *SLS* method; the highest quality *TE* sample No. 4 was selected for *EDM*. Empirical equations are obtained that describe the relationship between the roughness parameter Ra and tool electrode wear γ , depending on the *EDM* modes. At the minimum mode with a current $I = 4$ A and a voltage $U = 50$ V, the tool electrode wear is $\gamma = 0.0063875$ g. The maximum tool electrode wear is $\gamma = 0.13938$ g with a current $I = 8$ A and a voltage $U = 50$ V. It is established that at a constant pulse on time $T_{on} = 75$ μs , the smallest roughness $Ra = 2.83$ μm is obtained at a current of $I = 4$ A and a voltage $U = 100$ V, and the maximum roughness is $Ra = 4.1568$ μm at $I = 8$ A and $U = 100$ V.

For citation: Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Shlykov E.S., Muratov K.R., Osinnikov I.V. Features of the use of tool electrodes manufactured by additive technologies in electrical discharge machining of products. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 135–148. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-135-148. (In Russian).

* Corresponding author

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

References

1. Rajurkar K.P., Sundaram M.M., Malshe A.P. Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6 (2), pp. 13–26. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.002.
2. Dimla D.E., Hopkinson N., Rothe H. Investigation of complex rapid EDM electrodes for rapid tooling applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, vol. 23 (3), pp. 249–255. DOI: 10.1007/s00170-003-1709-8.
3. Ho K.H., Newman S.T. State of the art electrical discharge machining (EDM) // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43 (13), pp. 1287–1300. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
4. Ayesta I., Flaño O., Izquierdo B., Sanchez J.A., Plaza S. Experimental study on debris evacuation during slot EDMing. *Procedia CIRP*, 2016, Vol. 42, pp. 6–11. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.174.
5. Uhlmann E., Polte J., Bolz R., Yabroudi S., Streckenbach J., Bergmann A. Application of additive manufactured tungsten carbide-cobalt electrodes with interior flushing channels in S-EDM. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 95, pp. 460–465. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.136.
6. Uhlmann E., Bergmann A., Bolz R., Gridin W. Application of additive manufactured tungsten carbide tool electrodes in EDM. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 68, pp. 86–90. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.027.
7. Rathi M.G., Mane D.V. An overview of additive mixed EDM. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2014, vol. 4 (11), pp. 1–6.
8. Batista M.D., Chandrasekaran S., Moran B.D., Troya M.S. Design and additive manufacturing of optimized electrodes for energy storage applications. *Carbon*, 2023, vol. 205, pp. 262–269. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.01.044.
9. Gu D., Shen Y., Xiao J. Influence of processing parameters on particulate dispersion in direct laser sintered WC-Co p/Cu MMCs. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2008, vol. 26 (5), pp. 411–422. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2007.09.005.
10. Grisharin A.O., Ogleznev N.D., Muratov K.R., Abyaz T.R. Investigation of the machinability of composite materials electrode-tools while EDM. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 510 (1), pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/510/1/012006.
11. Singh P., Sidhu S.S., Payal H.S. Fabrication and machining of metal matrix composites: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 31 (5), pp. 1–21. DOI: 10.1080/10426914.2015.1025976.
12. Thakur A., Pabla B.S. Surface modification using composite electrodes in EDM: a review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2023, vol. 11 (10), pp. 1008–1013. DOI: 10.22214/ijraset.2023.56134.
13. Amorim F.L., Czelusniak T., Higa C.F., Lohrengel A. Development and application of new composite materials as EDM electrodes manufactured via selective laser sintering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 72, pp. 9–12. DOI: 10.1007/s00170-014-5765-z.
14. Amorim F.A., Lohrengel A., Muller N., Schafer G., Czelusniak T. Performance of sinking EDM electrodes made by selective laser sintering technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 65, pp. 9–12. DOI: 10.1007/s00170-012-4267-0.
15. Nyamekye P., Nieminen P., Bilesan M.R., Repo E., Piili H., Salminen A. Prospects for laser based powder bed fusion in the manufacturing of metal electrodes: a review. *Applied Materials Today*, 2021, vol. 23, pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101040.
16. Weber J., Wain A.J., Piili H., Vuorema A. Residual porosity of 3D-LAM-printed stainless steel electrodes allows galvanic exchange platinisation. *ChemElectroChem*, 2016, vol. 3 (6), pp. 1–24. DOI: 10.1002/celec.201600098.
17. Sahu A.K., Mahapatra S.S. Performance analysis of tool electrode prepared through laser sintering process during electrical discharge machining of titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106 (6), pp. 1017–1041. DOI: 10.1007/s00170-019-04675-1.
18. Jiang Y., Kong L., Yu J., Hua C. Experimental research on preparation and machining performance of porous electrode in electrical discharge machining. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, vol. 36 (1–3), pp. 1–15. DOI: 10.1007/s12206-022-1134-2.
19. Zhang B., Li Y., Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 30 (3), pp. 515–527. DOI: 10.1007/s10033-017-0121-5.
20. Cao S., Chen Z., Yang K., Lim S.C.V. Defect, microstructure, and mechanical property of Ti-6Al-4V alloy fabricated by high-power selective laser melting. *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2017, vol. 69 (12). – P. 2684–2692. DOI: 10.1007/s11837-017-2581-6.

21. Li R., Liu J., Shi Y., Wang L. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 59 (9), pp. 1025–1035. DOI: 10.1007/s00170-011-3566-1.

22. Promoppatum P., Yao S.C. Analytical evaluation of defect generation for selective laser melting of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 1–4. DOI: 10.1007/s00170-019-03500-z.

23. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Zhurin A.V. Study of the EDM process of bimetallic materials using a composite electrode tool. *Materials*, 2022, vol. 15 (3), pp. 1–13. DOI: 10.3390/ma15030750.

24. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R. Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools. *Materials*, 2021, vol. 14 (20), pp. 1–19. DOI: 10.3390/ma14206105.

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>).