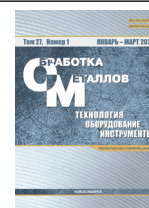




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Прогнозирование изменений поверхностного слоя в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки

Тимур Абляз^a, Илья Осинников^b, Евгений Шлыков^{c,*}, Анна Каменских^d, Александр Горохов^e,
 Никита Кропанев^f, Карим Муратов^g

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/0009-0006-4478-3803>, ilyuhaosinnikov@bk.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-3012-2418>, anna_kamenskih@mail.ru;
^e <https://orcid.org/0009-0000-5588-0154>, littlealex99@mail.ru; ^f <https://orcid.org/0009-0002-5907-9852>, cropanew.nikita2016@yandex.ru;
^g <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:

Поступила: 13 декабря 2024
 Рецензирование: 19 декабря 2024
 Принята к печати: 28 декабря 2024
 Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Копировально-прошивная электроэрозионная обработка
 Математическая модель
 Хромсодержащая сталь
 Лункообразование
 Металлография
 Белый слой
 Сплошность

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01224, <https://rscf.ru/project/23-79-01224/>.

АННОТАЦИЯ

Введение. В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований толщины, сплошности и количества дефектов белого слоя, образованного в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки (КПЭО) на примере низколегированной стали 40X и среднелегированной стали 35XГС. **Цель работы:** теоретическое и экспериментальное исследование дефектного поверхностного слоя, образованного в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки. **Методы исследования.** Математические модели единичного импульса разряда на обрабатываемую поверхность получены методом конечных элементов. В качестве оборудования для КПЭО образцов из хромсодержащих сталей 40X и 35XГС выбран копировально-прошивной электроэрозионный станок Electronica Smart CNC. Моделирование и эксперименты проведены для двух режимов. Рабочие параметры: время включения импульса – T_{on} , мкс; напряжение – U , В; сила тока – I , А. Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе Olympus GX 51. **Результаты и обсуждение.** Разработаны математические модели воздействия единичного импульса на обрабатываемую поверхность разряда в процессе КПЭО, позволяющие прогнозировать толщину белого слоя в зависимости от режимов обработки и свойств обрабатываемого материала. Теоретические значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20...25 мкм при КПЭО на минимальном режиме и 60...80 мкм на максимальном режиме. Установлено, что экспериментальные значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20...25 мкм при КПЭО на минимальном режиме и 55...85 мкм – на максимальном. Отклонения теоретических значений толщины белого слоя от экспериментальных составляют не более 5 %, что подтверждает правильность полученных моделей. Установлено, что при КПЭО на минимальном режиме сплошность белого слоя в среднем в два раза больше, чем при обработке на максимальном режиме. Сплошность белого слоя стали 40X выше в сравнении со сталью 35XГС на 10 % при КПЭО на максимальном режиме и на 17 % – на минимальном. Выявлено, что при обработке на максимальном режиме количество микротрещин более чем в 2 раза превышает их количество при обработке на минимальном режиме.

Для цитирования: Прогнозирование изменений поверхностного слоя в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки / Т.Р. Абляз, И.В. Осинников, Е.С. Шлыков, А.А. Каменских, А.Ю. Горохов, Н.А. Кропанев, К.Р. Муратов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 48–60. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-48-60.

Введение

Развитие современного машиностроения связано с появлением новых, технически усовершенствованных изделий и конструкций. Изготовле-

ние высококачественных изделий является одной из приоритетных задач. Ужесточаются условия эксплуатации изделий, и соответственно требования к их эксплуатационным свойствам также постоянно растут. Для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик изделий возникает необходимость применения материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

Важными показателями обеспечения конкурентоспособности изделия являются массово-

*Адрес для переписки

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

габаритные характеристики. Ввиду этого применяются все более пространственно-сложные конструктивные элементы, позволяющие обеспечить минимальные массу и размеры изделия при соблюдении требований прочности и жесткости.

Наиболее распространенными технологиями изготовления изделий сложного профиля являются механические методы обработки. Недостатки традиционных лезвийных методов обработки: значительный износ режущего инструмента при резании высокотвердых материалов, необходимость применения дополнительной оснастки при многокоординатной обработке сложного профиля, невозможность обработки тонкостенных элементов ввиду силового воздействия со стороны режущего инструмента [1–3].

При изготовлении сложнопрофильных изделий из материалов с повышенными физико-механическими свойствами рационально использовать альтернативные электрофизические методы обработки, позволяющие обрабатывать материалы любой твердости при практически полном отсутствии сил резания. Одним из таких методов является метод электроэрозионной обработки (ЭЭО) [4–10].

Существенным недостатком, ограничивающим применение данного электрофизического метода, являются термометаллургические преобразования в поверхностном слое обрабатываемого материала. В процессе удаления частиц материала с обрабатываемой поверхности происходит пиролиз рабочей жидкости, наблюдается изменение структуры и свойств поверхностного слоя материала изделия [11, 12].

Процесс ЭЭО характеризуется локальным перегревом материала в зоне обработки, что приводит к возникновению явления, известного как хрупкое разрушение. При хрупком разрушении возникают температурные напряжения вследствие перегрева поверхностного слоя обрабатываемого материала. При превышении термическими напряжениями временного сопротивления обрабатываемого материала происходит удаление материала из зоны обработки. Причем частицы материала не подвергаются процессам плавления и испарения, а удаляются в твердой фазе, в результате чего возникают сколы и трещины [13, 14].

Из-за значительного перегрева в зоне обработки происходит перезакалка и отпуск обра-

батываемого материала. Возникают внутренние напряжения, которые в совокупности с измененными физико-механическими свойствами материала могут стать причиной преждевременного выхода из строя изделия при эксплуатации или брака на этапе изготовления [15].

Явление хрупкого разрушения материала в процессе ЭЭО характеризуется большим количеством микротрещин на обрабатываемой поверхности [16]. Наличие микротрещин на рабочих поверхностях изделия может приводить к его преждевременному разрушению вследствие распространения трещин в основной материал, что в свою очередь приведет к выходу из строя отдельного узла или всего изделия в целом.

Зоной поверхностного слоя, содержащей наибольшее количество дефектов, является так называемый белый слой. Белый слой имеет мелкозернистую структуру, обладающую высокой химической стойкостью. Толщина слоя колеблется от сотых долей миллиметра до 1,5 мм.

Белый слой на обработанной поверхности, образованный в процессе ЭЭО, имеет повышенную хрупкость. Его наличие существенно снижает прочностные характеристики материала, в особенности способность сопротивляться циклическим нагрузкам. Анализ литературы в области ЭЭО показал, что увеличение толщины белого слоя приводит к снижению усталостной долговечности материала [17].

Толщина белого слоя и его многократное появление на поверхности заготовки определяется множеством различных факторов [18], одним из которых является режим обработки. Параметры электрического процесса могут существенно влиять на толщину белого слоя [19]. С увеличением силы тока и продолжительности импульса количество энергии, подводимой к заготовке, вызывает плавление и испарение большего объема материала [11]. Уменьшение времени включения импульса на электроэрозионном станке позволяет снизить толщину белого слоя и его сплошность из-за меньшего количества энергии в зоне обработки. Снижение параметра напряжения также приводит к уменьшению толщины белого слоя [20].

В настоящее время не в полной мере изучен процесс формирования поверхностного слоя, а также величины его сплошности и механизмы

формирования микротрещин на поверхности заготовок из труднообрабатываемых материалов при копировально-прошивной электроэрозионной обработке (КПЭЭО). Номенклатура материалов, для которых исследован процесс образования белого слоя в процессе обработки, сильно ограничена.

Актуальной задачей является разработка теоретических зависимостей, позволяющих прогнозировать преобразования поверхностного слоя в процессе обработки, а также толщину, структуру и свойства образованного измененного слоя.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование дефектного поверхностного слоя, образованного в процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки.

Задачи

1. Разработать теоретическую модель единичного импульса в процессе КПЭЭО с возможностью ее применения для различных материалов, позволяющую прогнозировать толщину белого слоя. Получить теоретические значения толщины белого слоя для хромосодержащих сталей 40Х и 35ХГС.

2. Провести экспериментальные исследования толщины белого слоя, образованного в процессе КПЭЭО, для верификации разработанных моделей на примере хромосодержащих сталей 40Х и 35ХГС.

3. Провести экспериментальные исследования сплошности белого слоя после КПЭЭО хромосодержащих сталей 40Х и 35ХГС.

4. Провести экспериментальные исследования влияния режимов КПЭЭО на количество видимых дефектов на обработанной поверхности хромосодержащих сталей 40Х и 35ХГС.

Методика исследований

Эксперименты проводились на базе Центра коллективного пользования «Центр аддитивных технологий» кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». В рамках исследования выполнено моделирование единичного импульса разряда на обрабатываемую поверхность методом конечных элементов. Модель состоит из трех частей: 1) определение поля температур

в детали от действия распределенного теплового потока; 2) моделирование образования лунки; 3) определение поля температур в детали при ее остывании между импульсами.

Все поставленные задачи решались методом конечных элементов с использованием 8-узлового элемента в программном пакете ANSYS Mechanical APDL.

Для решения приняты следующие допущения и гипотезы: изотропность обрабатываемого материала; независимость свойств обрабатываемого материала от температуры; постоянство коэффициента конвективного теплообмена; пренебрежение потерями энергии на изменение агрегатного состояния материала; постоянство межэлектродного зазора.

При моделировании теплового импульса рассматривалось воздействие распределенного теплового потока на поверхность электрода-детали.

Уравнение теплопроводности в осесимметричной постановке в нестационарной задаче имеет вид

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где r – текущий радиус; z – текущая высота.

Область $ABCD$ принята областью действия рабочего импульса (рис. 1).

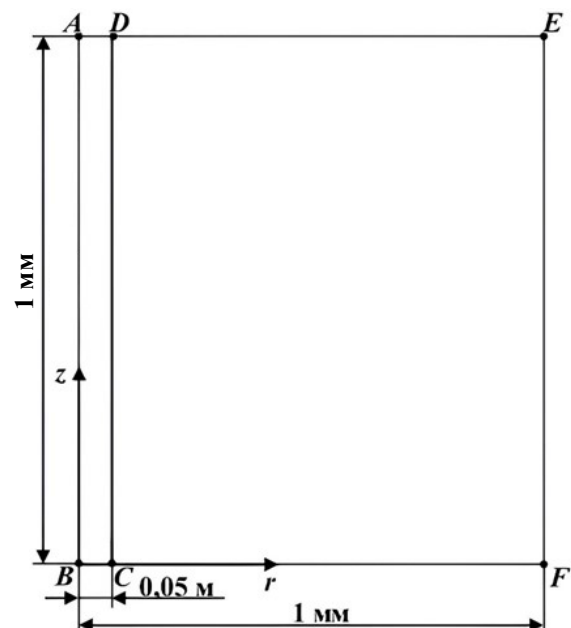


Рис. 1. Расчетная схема, обозначение границ для рабочего импульса

Fig. 1. Design diagram, boundary designation for the working impulse



На границе *AB* действует условие осевой симметрии тепловой задачи.

Границы *DE* и *EF* омываются рабочей жидкостью (РЖ). В качестве первого приближения опишем эти границы как конвективный теплообмен и положим коэффициент конвективного теплообмена константой. Условие на этих границах принимает вид

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{DE,EF} = h(T - T_{\infty}). \quad (2)$$

Условие термоизоляции на границах *BC* и *CF*:

$$T \Big|_{CD,CF} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (3)$$

Условие на границе *AD* для нормального закона распределения:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{DE,EF} = \eta \frac{IU}{\pi R_p^2} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}. \quad (4)$$

Начальное условие во всех точках тела принято в следующем виде:

$$T(0, r, z) = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (5)$$

При моделировании процесса остывания между импульсами использована схема, показанная на рис. 2, и уравнение равновесия задачи теплопроводности (1).

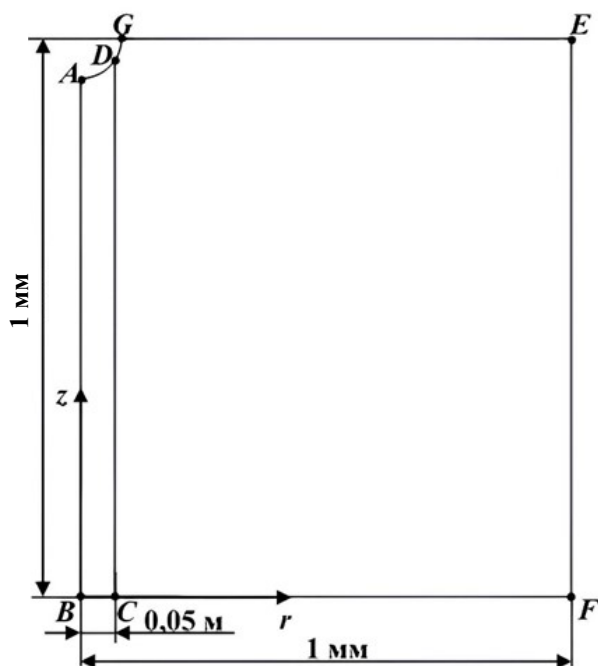


Рис. 2. Расчетная схема, обозначение границ процессов после теплового воздействия

Fig. 2. Design diagram, boundary designation for processes after thermal exposure

На границе *AB* при $r = 0$ действует условие осевой симметрии тепловой задачи.

Границы *AD*, *DG*, *GE* и *EF* обрабатываемой детали омываются рабочей жидкостью (РЖ). В качестве первого приближения опишем эти границы как конвективный теплообмен и положим коэффициент конвективного теплообмена константой. Условие на этих границах принимает вид

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{AD, DG, GE, EF} = h(T - T_{\infty}). \quad (6)$$

Условие термоизоляции на границах *BC* и *CF*:

$$T \Big|_{BC,CF} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (7)$$

Начальное условие во всех точках тела принято в следующем виде:

$$T(0, r, z) = T(T_{\text{импульса}}, r, z), \quad (8)$$

это поле температур после теплового воздействия.

Время охлаждения определялось с учетом скважности импульса, принятой 26 %.

Моделирование осуществлено для двух режимов ЭЭО, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Параметры режимов КПЭЭО
Parameters of the copy-piercing EDM modes

Параметр	Режим обработки	
	min	max
Сила тока <i>I</i> , А	2	8
Напряжение <i>U</i> , В	50	100
Время действия импульса T_{on} , мкс	40	150

В рамках данного исследования получены модели, рассчитанные для низколегированной стали 40Х и среднелегированной стали 35ХГС. Свойства, использованные в качестве входных параметров моделирования, представлены в табл. 2.

Решение выполнено методом конечных элементов. Для моделирования образования лунки принимали за условие удаления элемента превышение его температурой значения температуры плавления. Удаление элементов выполнялось за счет обнуления «жесткости» элементов тепловой задачи.

Входные параметры моделирования
Input parameters for simulation

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение	
			40X	35XГС
Коэффициент температуропроводности	K	Вт/(м·°С)	46	36
Удельная теплоемкость	C	Дж/(кг·°С)	466	496
Плотность	ρ	кг/м ³	7800	7800
Доля энергии импульса	μ	–	0,6	0,6
Коэффициент теплоотдачи	k	Вт/(м·°С)	300	300
Температура плавления	$T_{пл}$	°С	1250	1280

Проведены эксперименты по КПЭЭО образцов на указанных режимах (табл. 1). В качестве оборудования для КПЭЭО образцов из хромосодержащих сталей 40X и 35XГС выбран копировально-прошивной электроэрозионный станок Electronica Smart CNC. Обработка осуществлялась в среде трансформаторного масла (ГОСТ 982–80).

Для экспериментальных исследований толщины, сплошности и трещиноватости белого слоя, образованного в процессе КПЭЭО, в зависимости от параметров обработки и обрабатываемого материала изготовлены цилиндрические образцы диаметром 35 мм, длиной 20 мм из низколегированной стали 40X и среднелегированной стали 35XГС.

Для экспериментов методом фрезерования изготовлены медные электроды-инструменты (медь марки М1 ГОСТ 1173–2006) размерами 20×20×5мм.

После КПЭЭО были подготовлены микрошлифы. Для запрессовки образцов в бакелит использовалась установка для горячей запрессовки Top Tech Presidon. Финишная подготовка образцов осуществлена на шлифовальной установке Top Tech Plato. Шлифование произведено с использованием абразива зернистостью от р240 до р1500.

Исследования обработанной поверхности на предмет наличия трещин, а также микрошлифов для исследования толщины и сплошности белого слоя осуществлены металлографическим методом. Металлографические исследования про-

изведены на оптическом микроскопе Olympus GX 51 при увеличении 100...200 крат с применением программного пакета Olympus Stream Motion для обработки полученных изображений. Для выявления белого слоя микрошлифы образцов были протравлены 4%-м раствором азотной кислоты.

Результаты и их обсуждение

Результат образования лунки представлен на рис. 3.

На рис. 3 также указаны поля температур после остывания между импульсами. Размер ячейки конечно-элементной сетки составляет 5 мкм.

В процессе образования лунки на обработанной поверхности остается зона, в которой материал электрода-детали нагревается выше температуры плавления, после чего подвергается моментальному охлаждению. Эта зона представляет собой белый слой, концентрирующий в себе большую часть дефектов. Дефекты появляются из-за возникших в результате перезакалки напряжений и изменения элементного состава вследствие насыщения элементами рабочей жидкости и материала ЭИ.

Полученная схема позволяет выполнить моделирование серии единичных воздействий на поверхность электрода-детали с учетом эволюции геометрии поверхности. В дальнейшем возможно использование разработанной модели для прогнозирования размеров лунки и общей шероховатости поверхности, обработанной методом

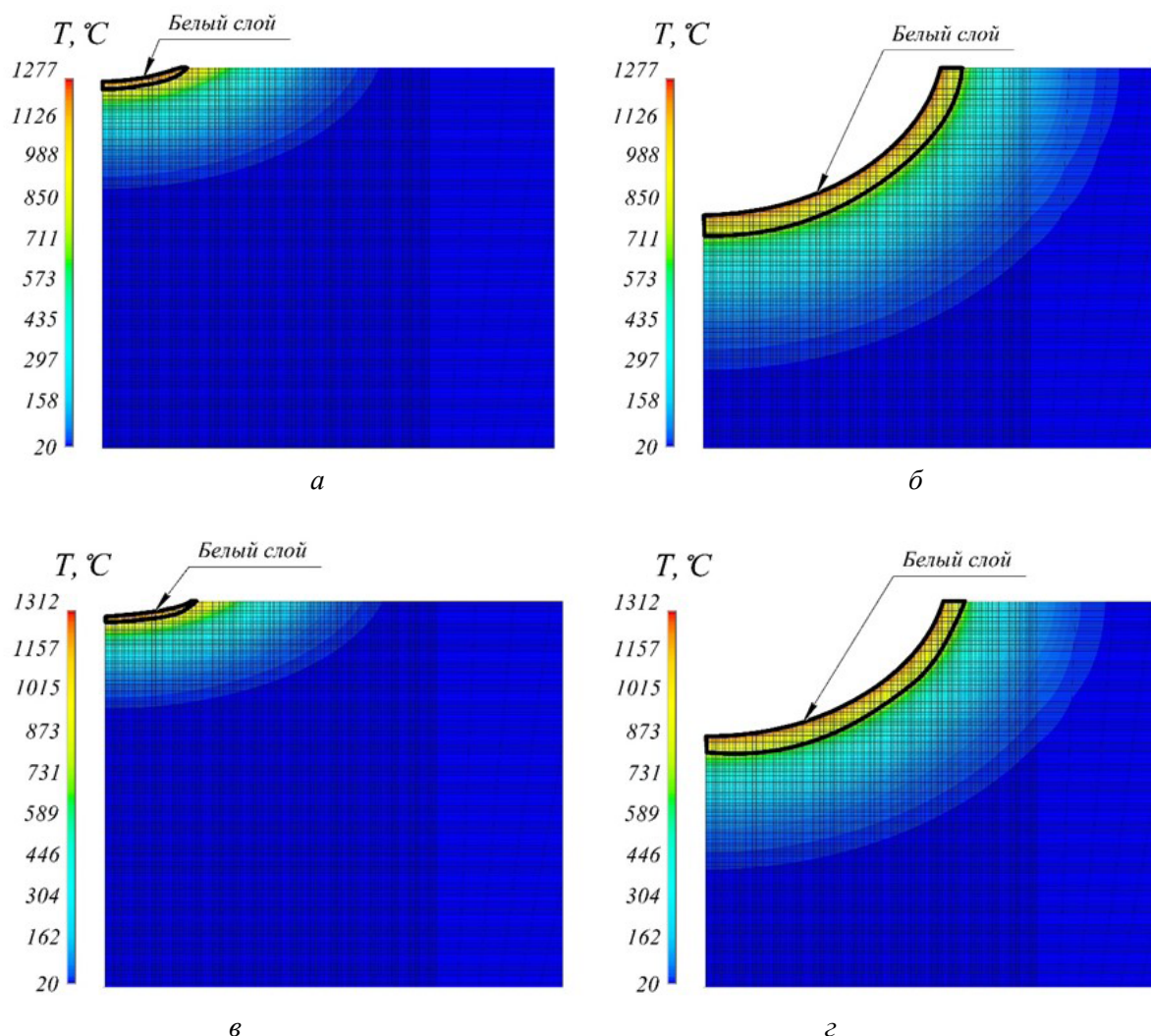


Рис. 3. Поля распределения температур при образовании лунки:
 а – 40Х, min; б – 40Х, max; в – 35ХГС, min; г – 35ХГС, max

Fig. 3. Temperature distribution fields during crater formation:
 а – 0.4 C-Cr, min; б – 0.4 C-Cr, max; в – 0.35 C-Cr-Mn-Si, min; г – 0.35 C-Cr-Mn-Si, max

КПЭЭО, в зависимости от режимов обработки и свойств обрабатываемого материала.

В табл. 3 представлены теоретические значения толщины белого слоя, образованного в процессе КПЭЭО, полученные на основе анализа рис. 3.

На рис. 4 представлены изображения, полученные в результате металлографического исследования микрошлифов образцов сталей 35ХГС и 40Х после копировально-прошивной обработки на максимальном и минимальном режимах.

Таблица 3
 Table 3

Теоретические значения толщины белого слоя
Theoretical values of white layer thickness

Режим КПЭЭО	Среднее значение толщины белого слоя, мкм	
	40Х	35ХГС
Min	25	20
Max	80	60

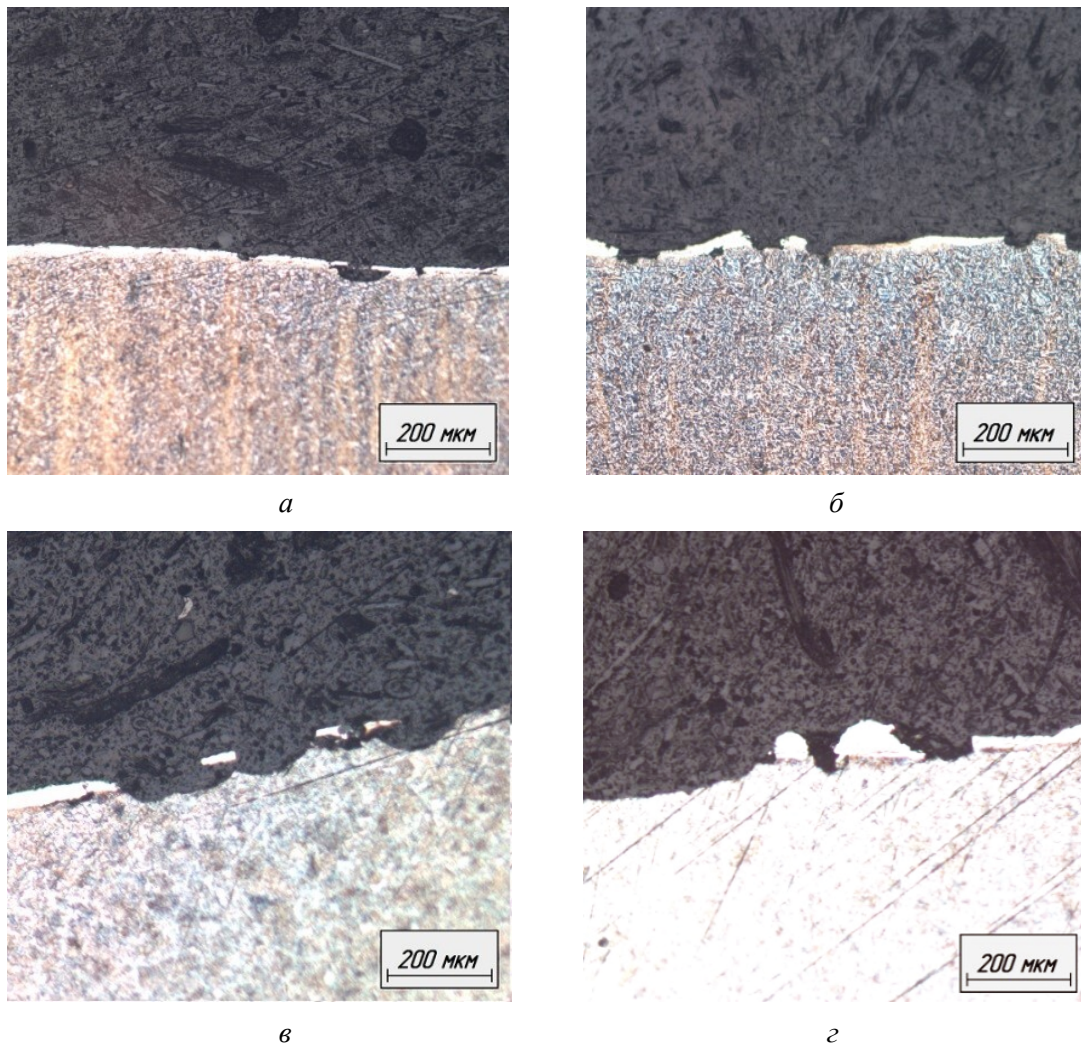


Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя образцов после КПЭЭО при увеличении 200×:

a – 40X, min; *б* – 40X, max; *в* – 35ХГС, min; *г* – 35ХГС, max

Fig. 4. Microstructure of the surface layer of samples after copy-piercing EDM at 200× magnification:

a – 0.4 C-Cr, min; *б* – 0.4 C-Cr, max; *в* – 0.35 C-Cr-Mn-Si, min; *г* – 0.35 C-Cr-Mn-Si, max

При визуальной оценке фотографий видно, что в процессе КПЭЭО на обрабатываемой поверхности сталей 40X и 35ХГС образуется ха-

рактерный белый слой. В зависимости от режимов обработки толщина такого слоя может значительно различаться (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Экспериментальные значения толщины белого слоя

Experimental values of white layer thickness

Режим КПЭЭО	Среднее значение толщины белого слоя, мкм	
	40X	35ХГС
Min	23,86	20,79
Max	83,00	58,00

Для сравнения теоретических и экспериментальных значений толщины белого слоя построена гистограмма (рис. 5).

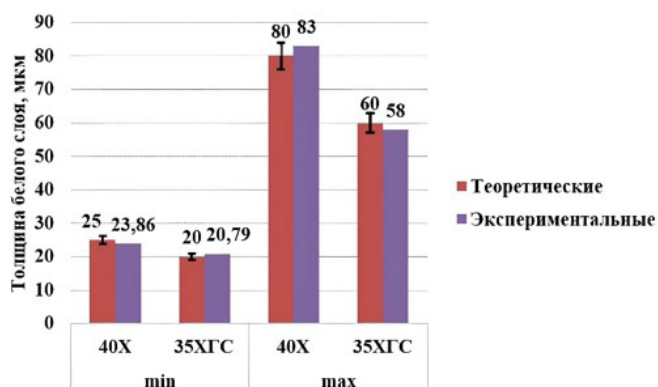


Рис. 5. Гистограмма значений толщины белого слоя

Fig. 5. Histogram of white layer thickness values

На основе анализа рис. 5 можно сделать вывод, что экспериментальные значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20...25 мкм при КПЭЭО на минимальном режиме и 55...85 мкм на максимальном режиме.

Установлено, что при КПЭЭО на одинаковых режимах значения толщины белого слоя низко-

легированной стали 40X больше значений для среднелегированной стали 35XГC. Это можно обосновать большей теплопроводностью и меньшей температурой плавления стали 40X.

Наблюдается корреляция теоретических и экспериментальных значений. Выявлено, что отклонения теоретических значений толщины белого слоя от экспериментальных отличаются не более чем на 5 %, это подтверждает правильность полученных моделей.

Показано, что полученные теоретические модели образования лунки в процессе КПЭЭО позволяют с заявленной точностью в зависимости от параметров обработки и физико-механических характеристик обрабатываемого материала спрогнозировать толщину образованного в процессе обработки белого слоя.

На основе анализа рис. 4 установлено, что белый слой, образованный в процессе КПЭЭО сталей 40X и 35XГC, распределен неравномерно, наблюдаются многочисленные пустоты и полости. Для оценки сплошности белого слоя выполнена количественная оценка общей площади белого слоя на микрошлифах и пустот (табл. 5).

Таблица 5

Table 5

Сплошность белого слоя обработанной поверхности при КПЭЭО
Continuity of the white layer of the machined surface after copy-piercing EDM

Режим КПЭЭО	Сплошность белого слоя, %	
	40X	35XГC
Min	94,00	51,00
Max	84,00	34,00

На основе полученных данных построена гистограмма (рис. 6).

Анализ гистограммы показал, что режим КПЭЭО оказывает значительное влияние на сплошность белого слоя обработанных хромсодержащих сталей 40X и 35XГC. При КПЭЭО на максимальном режиме сплошность белого слоя в среднем в два раза меньше, чем при обработке на минимальном режиме.

Выявлено, что сплошность белого слоя стали 40X выше в сравнении со сталью 35XГC на 10 % при КПЭЭО на максимальном режиме и на 17 % при КПЭЭО на минимальном режиме.

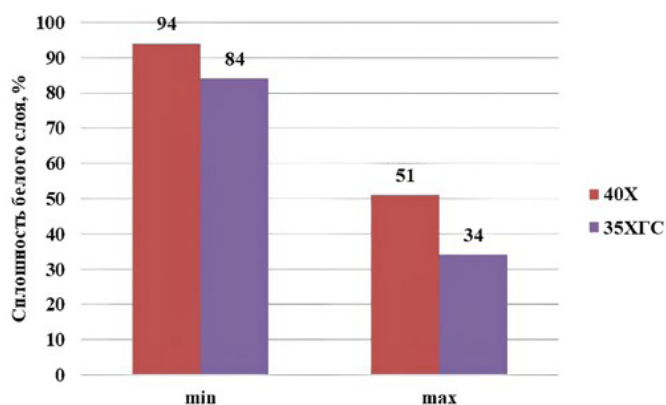


Рис. 6. Гистограмма сплошности белого слоя

Fig. 6. Histogram of white layer continuity

Снимки обработанной поверхности образцов сталей 35ХГС и 40Х представлены на рис. 7.

При визуальной оценке результатов металлографического исследования установлено, что в процессе КПЭЭО сталей 35ХГС и 40Х на обработанной поверхности образуется множество микротрещин. Произведена оценка количества

микротрещин на единицу площади поверхности, обработанной электроэрозионным методом. В табл. 6. представлены результаты количественной оценки.

На основе полученных данных о количестве микротрещин построена гистограмма (рис. 8).

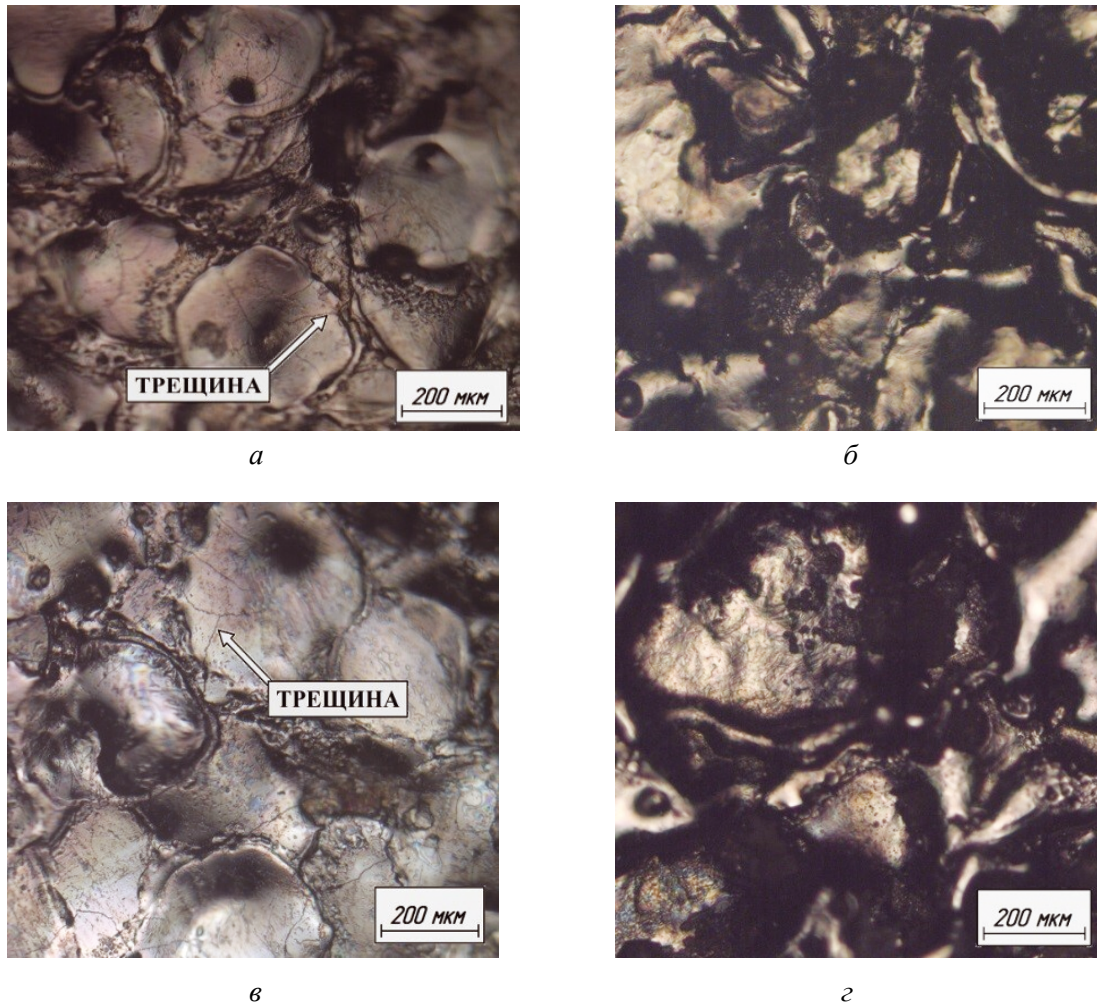


Рис. 7. Поверхность образцов после КПЭЭО при увеличении 200×:

а – 40Х, min; б – 40Х, max; в – 35ХГС, min; г – 35ХГС, max

Fig. 7. Surface of samples after copy-piercing EDM at 200× magnification:

а – 0.4 C-Cr, min; б – 0.4 C-Cr, max; в – 0.35 C-Cr-Mn-Si, min; г – 0.35 C-Cr-Mn-Si, max

Таблица 6

Table 6

Количество микротрещин на обработанной поверхности после КПЭЭО
Number of microcracks on the machined surface after copy-piercing EDM

Режим КПЭЭО	Среднее количество микротрещин на 1 мм ²	
	40Х	35ХГС
Min	28,89	26,38
Max	72,35	66,35

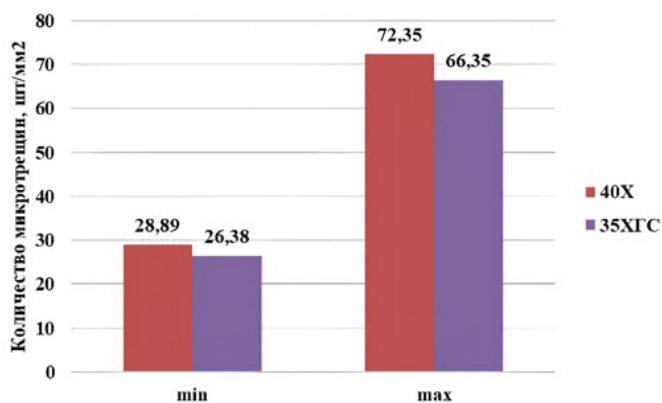


Рис. 8. Гистограмма количества микротрещин в белом слое

Fig. 8. Histogram of the number of microcracks in the white layer

Анализ гистограммы показал, что при КПЭЭО хромсодержащих сталей 40X и 35ХГС количество образующихся микротрещин существенно изменяется в зависимости от параметров режима обработки. При обработке на максимальном режиме количество микротрещин более чем в 2 раза превышает их количество при обработке на минимальном режиме.

Установлено, что количество трещин в белом слое при обработке хромсодержащих сталей 40X и 35ХГС сопоставимо, разница не превышает 10 %.

Выводы

1. Разработаны математические модели воздействия единичного импульса на обрабатываемую поверхность разряда в процессе КПЭЭО, позволяющие прогнозировать толщину белого слоя в зависимости от режимов обработки и свойств обрабатываемого материала. Отмечена возможность использования разработанной модели для прогнозирования размеров лунки и общей шероховатости поверхности. Получены теоретические значения толщины белого слоя для низколегированной стали 40X и среднелегированной стали 35ХГС. Теоретические значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20...25 мкм при КПЭЭО на минимальном режиме и 60...80 мкм на максимальном режиме. При КПЭЭО на одинаковых режимах значения толщины белого слоя низколегированной стали 40X больше значений для среднелегированной стали 35ХГС. Это можно обосновать большей тепло-

проводностью и меньшей температурой плавления стали 40X.

2. Установлено, что экспериментальные значения толщины белого слоя варьируются в диапазоне 20...25 мкм при КПЭЭО на минимальном режиме и 55...85 мкм на максимальном режиме. Показано, что полученные теоретические модели образования единичной лунки позволяют с заявленной точностью в зависимости от параметров обработки и физико-механических характеристик обрабатываемого материала спрогнозировать толщину образованного в процессе обработки белого слоя. Отклонения теоретических значений толщины белого слоя от экспериментальных составляют не более 5 %, что подтверждает правильность полученных моделей.

3. Установлено, что при КПЭЭО на минимальном режиме сплошность белого слоя в среднем в два раза больше, чем при обработке на минимальном режиме. Сплошность белого слоя стали 40X выше в сравнении со сталью 35ХГС на 10 % при КПЭЭО на максимальном режиме и на 17 % при КПЭЭО на минимальном режиме.

4. Выявлено, что при обработке на максимальном режиме количество микротрещин более чем в 2 раза превышает их количество при обработке на минимальном режиме. Количество трещин в белом слое при обработке хромсодержащих сталей 40X и 35ХГС сопоставимо, разница не превышает 10 %.

Список литературы

1. Influence of the grade of hot work tool steels and its microstructural features on the durability of punches used in the closed die precision forging of valve forgings made of nickel-chrome steel / M. Hawryluk, M. Lachowicz, M. Zwierzchowski, M. Janik, Z. Gronostajski, J. Filipiak // *Wear*. – 2023. – Vol. 528–529. – DOI: 10.1016/j.wear.2023.204963.
2. Microstructure and abrasive wear behavior of a novel FeCrMoVC laser cladding alloy for high-performance tool steels / J. Zeisig, N. Schädlich, L. Giebeler, J. Sander, J. Eckert, U. Kühn, J. Hufenbach // *Wear*. – 2017. – Vol. 382–383. – P. 107–112. – DOI: 10.1016/j.wear.2017.04.021.
3. Mechanical properties and corrosion resistance of steel X210CrW12 after semi-solid processing and heat treatment / L. Rogal, J. Dutkiewicz, Z. Szklarz, H. Krawiec, M. Kot, S. Zimowski // *Materials Characterization*. – 2014. – Vol. 8823. – P. 100–110. – DOI: 10.3329/jname.v7i2.5309.

4. A comparative study on the erosion behavior and mechanism of chrome-coated 25Cr3Mo2WNiV steel and QPQ 25Cr3Mo2WNiV steel / C. Dou, K. Pan, C. Wang, S. Wei, C. Zhang, L. Xu, H. Cui, Y. Liang, J. Huang // *Materials Today Communications*. – 2024. – Vol. 41. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110820.
5. *Abbas M.N., Solomon D.G., Bahari Md.* A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47 (7). – P. 1214–1228. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.
6. *Liao Y.S., Chen S.T., Lin C.S.* Development of a high precision tabletop versatile CNC wire-EDM for making intricate micro parts // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2005. – Vol. 15. – P. 245–253. – DOI: 10.1088/0960-1317/15/2/001.
7. *Yoo H.K., Kwon W.T., Kang S.* Development of a new electrode for micro-electrical discharge machining (EDM) using Ti(C, N)-based cermet // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2014. – Vol. 15 (4). – P. 609–616. – DOI: 10.1007/s12541-014-0378-x.
8. *Hoang K.T., Yang S.H.* A study on the effect of different vibration-assisted methods in micro-WEDM // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213 (9). – P. 1616–1622. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.025.
9. *Hoang K.T., Yang S.H.* A new approach for micro-WEDM control based on real-time estimation of material removal rate // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2015. – Vol. 16 (2). – P. 241–246. – DOI: 10.1007/s12541-015-0032-2.
10. *Debroy A., Chakraborty S.* Non-conventional optimization techniques in optimizing non-traditional machining processes: a review // *Management Science Letters*. – 2013. – Vol. 4 (1). – P. 23–38. – DOI: 10.5267/j.msl.2012.10.038.
11. *Świercz R., Oniszczyk-Świercz D., Chmielewski T.* Multi-response optimization of electrical discharge machining using the desirability function // *Micromachines*. – 2019. – Vol. 10 (72). – DOI: 10.3390/mi10010072.
12. *Świercz R., Oniszczyk-Świercz D.* The effects of reduced graphene oxide flakes in the dielectric on electrical discharge machining // *Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 9 (3). – DOI: 10.3390/nano9030335.
13. *Chalisgaonkar R., Kumar J.* Microstructural characteristics of pure titanium by WEDM // *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. – 2014. – Vol. 9 (6). – P. 463–484. – DOI: 10.1504/IJMMP.2014.067308.
14. Study of micro structural material changes after WEDM based on TEM lamella analysis / K. Muralova, R. Zahradnicek, L. Benes, T. Prokes, R. Hrdy, J. Fries // *Metals*. – 2020. – Vol. 10 (7). – P. 949. – DOI: 10.3390/met10070949.
15. Determination of residual stress distribution in high strength aluminum alloy after EDM / S. Mehmood, A. Sultan, N.A. Anjum, W. Anwar, Z. Butt // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2017. – Vol. 11 (1). – P. 29–35. – DOI: 10.12913/22998624/68729.
16. *Ablyaz T.R., Zhurin A.V., Shlykov E.S.* Simulation of electrical discharge machining of dissimilar materials // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 13 (6). – P. 2173–2177.
17. Discharge current effect on machining characteristics and mechanical properties of aluminum alloy 6061 workpiece produced by electric discharging machining process / C.-G. Kuo, C.-Y. Hsu, J.-H. Chen, P.-W. Lee // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 9 (11). – P. 1–8. – DOI: 10.1177/1687814017730756.
18. *Ghodsiyeh D., Golshan A.J., Shirvanehdeh A.* Review on current research trends in wire electrical discharge machining (WEDM) // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2013. – Vol. 6 (2). – P. 154–166. – DOI: 10.17485/ijst/2013/v6i2.18.
19. Experimental investigation of white layer thickness on EDM processed silicon steel using ANFIS approach / T. Muthuramalingam, D. Saravanakumar, L.G. Babu, H.P. Nguen, N.P. Vu // *Silicon*. – 2020. – Vol. 12. – P. 1905–1911. – DOI: 10.1007/s12633-019-00287-2.
20. The effect of power supply current on recast layer in S45C steel using wire EDM / H. Wijaya, S. Wahyudi, R. Soenoko, P.H. Setyarini, S. Yasid, F. Gapsari // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 494 (1). – DOI: 10.1088/1757-899X/494/1/012102.

Конфликт интересов

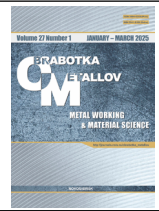
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science





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



Prediction of changes in the surface layer during copy-piercing electrical discharge machining



Timur Ablyaz ^a, Ilya Osinnikov ^b, Evgeniy Shlykov ^{c, *}, Anna Kamenskikh ^d, Aleksandr Gorohov ^e,
Nikita Kropanev ^f, Karim Muratov ^g

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/0009-0006-4478-3803>,  ilyuhaosinnikov@bk.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>,  Kruspert@mail.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0002-3012-2418>,  anna_kamenskikh@mail.ru;

^e  <https://orcid.org/0009-0000-5588-0154>,  littlealex99@mail.ru; ^f  <https://orcid.org/0009-0002-5907-9852>,  cropanew.nikita2016@yandex.ru;

^g  <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>,  Karimur_80@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13 December 2024

Revised: 19 December 2024

Accepted: 28 December 2024

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Copy-piercing electrical discharge machining

Mathematical model

Chromium steel

Crater formation

Metallography

White layer

Continuity

Funding

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-01224, <https://rscf.ru/project/23-79-01224/>.

ABSTRACT

Introduction. This paper presents the results of theoretical and experimental studies of the thickness, continuity and number of defects in the white layer formed during the copy-piercing electrical discharge machining, using low-alloy steel *0.4 C-Cr* and medium-alloy steel *0.35 C-Cr-Mn-Si* as an example. **The purpose of the work** is to theoretically and experimentally investigate the defective surface layer formed during copy-piercing electrical discharge machining. **Research methods.** Mathematical models of a single discharge pulse impact on the surface being machined were obtained using the finite element method. An *Electronica Smart CNC* copy-piercing electrical discharge machine was selected as the equipment for copy-piercing electrical discharge machining of samples made from *0.4 C-Cr* and *0.35 C-Cr-Mn-Si* steels. Simulating and experiments were carried out in two modes. The operating parameters were: pulse-on time (T_{on} , μ s), voltage (U , V), and current (I , A). Metallographic studies were performed using an *OLYMPUS GX 51* optical microscope. **Results and discussion.** Mathematical models were developed to simulate the impact of a single discharge pulse on the machined surface during copy-piercing electrical discharge machining. These models allow predicting the thickness of the white layer depending on the processing modes and the properties of the material being processed. The theoretical values of the white layer thickness vary in the range of 20–25 μ m during copy-piercing electrical discharge machining in the minimum mode and vary in the range of 60–80 μ m in the maximum mode. It was established that the experimental values of the white layer thickness vary in the range of 20–25 μ m during copy-piercing electrical discharge machining in the minimum mode and vary in the range of 55–85 μ m in the maximum mode. The deviation of the theoretical values of the white layer thickness from the experimental ones differs by no more than 5%, which confirms the accuracy of the obtained models. It was found that during copy-piercing electrical discharge machining in the minimum mode, the continuity of the white layer is on average two times greater than when machining in the maximum mode. The continuity of the white layer of *0.4 C-Cr* steel is 10% higher compared to *0.35 C-Cr-Mn-Si* steel during copy-piercing electrical discharge machining in the maximum mode and 17% higher during copy-piercing electrical discharge machining in the minimum mode. It was revealed that when machining in the maximum mode, the number of microcracks is more than 2 times greater than when machining in the minimum mode. The number of cracks in the white layer when processing chromium steels *0.4 C-Cr* and *0.35 C-Cr-Mn-Si* is comparable, the difference does not exceed 10%.

For citation: Ablyaz T.R., Osinnikov I.V., Shlykov E.S., Kamenskikh A.A., Gorohov A.Yu., Kropanev N.A., Muratov K.R. Prediction of changes in the surface layer during copy-piercing electrical discharge machining. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 48–60. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-48-60. (In Russian).

References

1. Hawryluk M., Lachowicz M., Zwierzchowski M., Janik M., Gronostajski Z., Filipiak J. Influence of the grade of hot work tool steels and its microstructural features on the durability of punches used in the closed die precision forging of valve forgings made of nickel-chrome steel. *Wear*, 2023, vol. 528–529. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204963.

* 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

2. Zeisig J., Schädlich N., Giebeler L., Sander J., Eckert J., Kühn U., Hufenbach J. Microstructure and abrasive wear behavior of a novel FeCrMoVC laser cladding alloy for high-performance tool steels. *Wear*, 2017, vol. 382–383, pp. 107–112. DOI: 10.1016/j.wear.2017.04.021.
3. Rogal L., Dutkiewicz J., Szklarz Z., Krawiec H., Kot M., Zimowski S. Mechanical properties and corrosion resistance of steel X210CrW12 after semi-solid processing and heat treatment. *Materials Characterization*, 2014, vol. 8823, pp. 100–110. DOI: 10.3329/jname.v7i2.5309.
4. Dou C., Pan K., Wang C., Wei S., Zhang C., Xu L., Cui H., Liang Y., Huang J. A comparative study on the erosion behavior and mechanism of chrome-coated 25Cr3Mo2WNiV steel and QPQ 25Cr3Mo2WNiV steel. *Materials Today Communications*, 2024, vol. 41. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110820.
5. Abbas M.N., Solomon D.G., Bahari Md. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47 (7), pp. 1214–1228. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.
6. Liao Y.S., Chen S.T., Lin C.S. Development of a high precision tabletop versatile CNC wire-EDM for making intricate micro parts // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2005. – Vol. 15. – P. 245–253. – DOI: 10.1088/0960-1317/15/2/001.
7. Yoo H.K., Kwon W.T., Kang S. Development of a new electrode for micro-electrical discharge machining (EDM) using Ti(C, N)-based cermet. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, vol. 15 (4), pp. 609–616. DOI: 10.1007/s12541-014-0378-x.
8. Hoang K.T., Yang S.H. A study on the effect of different vibration-assisted methods in micro-WEDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol. 213 (9), pp. 1616–1622. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.025.
9. Hoang K.T., Yang S.H. A new approach for micro-WEDM control based on real-time estimation of material removal rate. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, vol. 16 (2), pp. 241–246. DOI: 10.1007/s12541-015-0032-2.
10. Debroy A., Chakraborty S. Non-conventional optimization techniques in optimizing non-traditional machining processes: a review. *Management Science Letters*, 2013, vol. 4 (1), pp. 23–38. DOI: 10.5267/j.msl.2012.10.038.
11. Świercz R., Oniszczyk-Świercz D., Chmielewski T. Multi-response optimization of electrical discharge machining using the desirability function. *Micromachines*, 2019, vol. 10 (72). DOI: 10.3390/mi10010072.
12. Świercz R., Oniszczyk-Świercz D. The effects of reduced graphene oxide flakes in the dielectric on electrical discharge machining. *Nanomaterials*, 2019, vol. 9 (3). DOI: 10.3390/nano9030335.
13. Chalisgaonkar R., Kumar J. Microstructural characteristics of pure titanium by WEDM. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2014, vol. 9 (6), pp. 463–484. DOI: 10.1504/IJMMP.2014.067308.
14. Mouralova K., Zahradnicek R., Benes L., Prokes T., Hrdy R., Fries J. Study of micro structural material changes after WEDM based on TEM lamella analysis. *Metals*, 2020, vol. 10 (7), p. 949. DOI: 10.3390/met10070949.
15. Mehmood S., Sultan A., Anjum N.A., Anwar W., Butt Z. Determination of residual stress distribution in high strength aluminum alloy after EDM. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2017, vol. 11 (1), pp. 29–35. DOI: 10.12913/22998624/68729.
16. Ablyaz T.R., Zhurin A.V., Shlykov E.S. Simulation of electrical discharge machining of dissimilar materials. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13 (6), pp. 2173–2177.
17. Kuo C.-G., Hsu C.-Y., Chen J.-H., Lee P.-W. Discharge current effect on machining characteristics and mechanical properties of aluminum alloy 6061 workpiece produced by electric discharging machining process. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9 (11), pp. 1–8. DOI: 10.1177/1687814017730756.
18. Ghodsiyeh D., Golshan A.J., Shirvanehdeh A. Review on current research trends in wire electrical discharge machining (WEDM). *Indian Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 6 (2), pp. 154–166. DOI: 10.17485/ijst/2013/v6i2.18.
19. Muthuramalingam T., Saravanakumar D., Babu L.G., Nguen H.P., Vu N.P. Experimental investigation of white layer thickness on EDM processed silicon steel using ANFIS approach. *Silicon*, 2020, vol. 12, pp. 1905–1911. DOI: 10.1007/s12633-019-00287-2.
20. Wijaya H., Wahyudi S., Soenoko R., Setyarini P.H., Yasid S., Gapsari F. The effect of power supply current on recast layer in S45C steel using wire EDM. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 494 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/494/1/012102.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.