

НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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


Повышение качества изготовления изделий из жаропрочного никелевого сплава нового поколения с применением проволочно-вырезной электроэрозионной обработки

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

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

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

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.048.4

История статьи:

Поступила: 12 декабря 2024
 Рецензирование: 19 декабря 2024
 Принята к печати: 28 декабря 2024
 Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка
 Шероховатость поверхности
 Точность
 Микротрещины
 Поверхностный слой
 Циклические испытания

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 экспериментального исследования по количественной и качественной оценке поверхности после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭО). **Цель работы:** экспериментальное исследование с проведением анализа дефектов поверхности образцов после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки изделий из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П. **Методы исследования.** Образцы для исследования определенной геометрии получены методом ПВЭО на четырех режимах. Рабочие параметры: высота образца – h , мм, время действия импульса – T_{on} , мкс, время выключения импульса – T_{off} , мкс. Выполнена оценка образцов на электронном микроскопе Hitachi S-3400N в режиме обратно рассеянных электронов при напряжении 25 кВ. Топография поверхности после электроэрозионной обработки оценивалась с помощью лазерного сканирующего микроскопа (ЛКСМ) LextOLS4000. Циклические испытания проводились на универсальной испытательной машине Biss-00-100 с частотой испытаний 20 Гц в симметричном цикле ($R = -1$). **Результаты и обсуждение.** Установлено, что при ПВЭО величина дефектного белого слоя постоянна и составляет 10 мкм независимо от режима обработки. Проанализирован показатель качества поверхности – шероховатости по Ra . Установлено, что среднее значение шероховатости по параметру Ra составляет 1,62 мкм при обработке образца высотой 10 мм. При увеличении высоты значение шероховатости поверхности достигает 2,6 мкм на минимальном режиме и 3,4 мкм – на максимальном. Установлено, что с увеличением высоты заготовки возрастает количество микротрещин на поверхности изделия, связанное с интенсификацией взаимодействия единичных импульсов с обрабатываемой поверхностью. В результате исследования установлено, что при амплитуде нагружения 400 МПа достигается среднее значение числа циклов, которое составляет $1,50E+05$ циклов. Отмечено уменьшение количества циклов при увеличении амплитуды циклов нагружения.

Для цитирования: Повышение качества изготовления изделий из жаропрочного никелевого сплава нового поколения с применением проволочно-вырезной электроэрозионной обработки / Е.С. Шлыков, Т.Р. Абляз, В.Б. Блохин, К.Р. Муратов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 34–47. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-34-47.

Введение

В современной промышленности происходит постоянное ужесточение требований к показателям качества изделий. Внедрение сплавов нового поколения приводит к повышению физико-механических свойств изделий. Так, внедрение

в производство гранулируемого жаропрочного никелевого сплава ВВ751П привело к повышению устойчивости изделий авиации в среде высоких температур без потери их механических свойств. Изделия из жаропрочного сплава ВВ751П имеют продленный эксплуатационный срок службы и повышенные характеристики циклической долговечности [1–3].

Для изготовления изделий в современном авиадвигателестроении применяется преимущественно механическая обработка. Внедрение новых материалов приводит к значительному

*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

усложнению технологического процесса серийного изготовления. Обработка жаропрочных материалов механическими методами имеет ряд технологических и экономических недостатков. При механической обработке изделий из жаропрочных сплавов из-за их высокой твердости происходит образование проточин на резце, что приводит к снижению стойкости инструмента и снижению точности обработки. Другой проблемой в процессе обработки резанием является упрочнение и низкая теплопроводность обрабатываемого материала. В процессе резания при обработке жаропрочных материалов выделяется значительное количество теплоты, что приводит к интенсификации и локализации термического воздействия на режущую кромку резца и к его износу [4, 5].

Альтернативным методом изготовления изделий из жаропрочных сплавов нового поколения является проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭЭО) [6–10]. ПВЭЭО основана на разрушении материала с поверхности заготовки под действием электрических импульсов, возникающих между электродом-инструментом (ЭИ) и электродом-деталью (ЭД), которые выделяют тепло. Такая обработка не зависит от механической прочности, твердости, вязкости и хрупкости материала, и полностью отсутствует механическое воздействие на обрабатываемую поверхность [11–14].

При внедрении ПВЭЭО в производство необходимо исследовать вопрос обеспечения качества поверхности в процессе обработки. В процессе ПВЭЭО кратковременные единичные импульсы приводят к интенсивному локальному термическому и химическому влиянию на обрабатываемую поверхность заготовки. В результате образовывается наружный поверхностный слой, отличающийся от основного материала по физико-механическим свойствам. Этот слой обладает иными значениями твердости, нежели основной материал, на нем могут присутствовать трещины и другие поверхностные дефекты. Энергия каждого отдельно взятого импульса и время его воздействия на площадь заготовки определяют, в свою очередь, значение величины измененного слоя.

Помимо поверхностных дефектов в данном слое активно интенсифицируются остаточные напряжения. Интенсивное термическое воздей-

ствие способствует возникновению в поверхностном слое заготовки остаточных напряжений. Величина и направление этих напряжений напрямую зависят от режимов обработки, а также от физических и химических свойств материала и поверхностного слоя [15–18].

Для минимизации величины измененного поверхностного слоя требуется исследование влияния режимов обработки на его формирование [19–21]. Режимы обработки влияют на показатель качества поверхности – шероховатости по Ra .

Можно наблюдать неоднородности рельефа поверхности после ПВЭЭО, сформированной наложением большого количества лунок, которые образованы воздействием единичных импульсов на поверхность заготовки. Микрорельеф поверхности после ПВЭЭО отличается от поверхности, полученной лезвийным инструментом.

Актуальной задачей является обеспечение качества поверхности при обработке жаропрочных никелевых сплавов нового поколения проволочно-вырезной электроэрозионной обработкой.

Целью работы является экспериментальное исследование с проведением качественного и количественного анализа дефектов на поверхности образцов после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки изделий из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П.

Задачи

1. Проанализировать величину дефектного (белого) слоя образцов, изготовленных в рамках исследования из жаропрочного сплава ВВ751П.
2. Проанализировать показатель качества поверхности изготовленных образцов – шероховатость по Ra , мкм.
3. Провести исследование поверхности на наличие микротрещин и структурных дефектов с применением лазерного сканирующего микроскопа и оценить температурное воздействие при формировании микрорельефа поверхности.
4. Провести циклические испытания образцов из жаропрочного сплава ВВ751П после ПВЭЭО.

Методика исследований

Эксперименты проводились на базе ЦКП «Центр аддитивных технологий» кафедры ИТМ

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». В ходе экспериментов были изготовлены образцы, представленные на рис. 1. Процесс проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭЭО) осуществлялся с использованием станка Electronica EcoCut производства компании Electronica Machine Tools (Пуна, Индия). В процессе исследования в качестве электрода-инструмента применялась проволока VercoCut производства компании Verkenhoff GmbH (Херборн, Германия) диаметром 0,25 мм. Для обеспечения процесса обработки использовалась дистиллированная вода в качестве рабочей среды.

Обработка образцов выполнялась на минимальном и максимальном режимах. Каждый эксперимент повторялся три раза. Такая повторяемость позволяет исключить появление случайных погрешностей. В качестве изменяемых режимов обработки были выбраны время вклю-

чения импульса T_{on} , мкс, время выключения импульса T_{off} , мкс, и высота образца. Режимы ПВЭЭО представлены в табл. 1.

Шероховатость обработанной поверхности после ЭЭО по параметру Ra измерялась на профилометре Mahr Perthometer S2 (Mahr GmbH, Геттинген, Германия) при базовой длине трассировки 0,8 мм.

С применением лазерного сканирующего микроскопа (ЛКМ) LextOLS4000 (Olympus Corporation, Токио, Япония) по трехмерной модели изображения получена топография поверхности после электроэрозионной обработки. Модель поверхности получена в программном модуле 3D Roughness Reconstruction (Olympus Corporation, Токио, Япония). Трехмерная поверхность получена оптическими срезами в результате сканирования X - Y - Z определенных участков поверхности. Сканирование проводилось при увеличении $\times 200$ и $\times 1000$ и шаге ска-

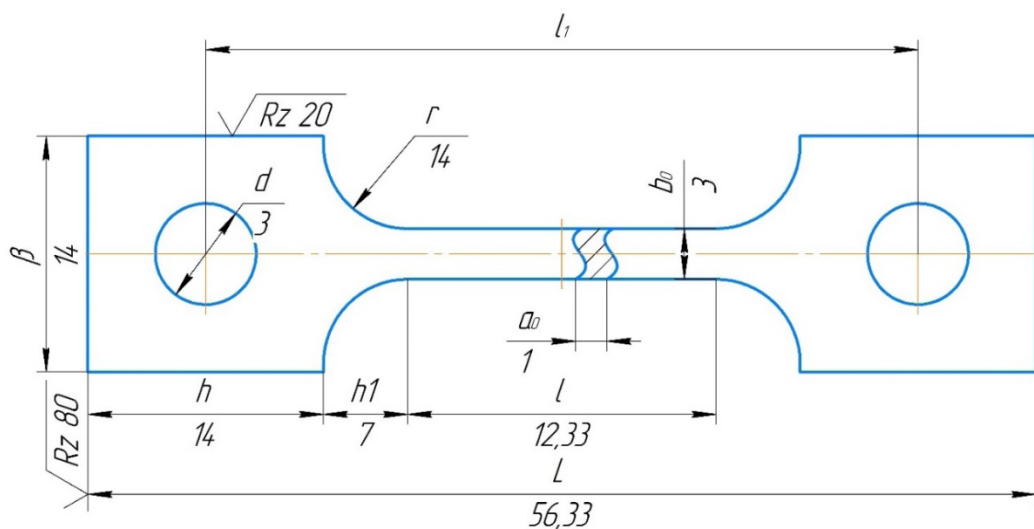


Рис. 1. Геометрия образца

Fig. 1. Specimen geometry

Таблица 1

Table 1

Режимы ПВЭЭО (проволочно-вырезная электроэрозионная обработка)

WEDM modes

№	T_{on} , мкс	h , мм	T_{off} , мкс
1	21	10	60
2	30		
3	21	15	
4	30		

нирования по оси Z , равном 2 мкм. В качестве источника света при сканировании применялся полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм. Для визуальной оценки результатов обработки использовали сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N в режиме обратно рассеянных электронов при напряжении 25 кВ.

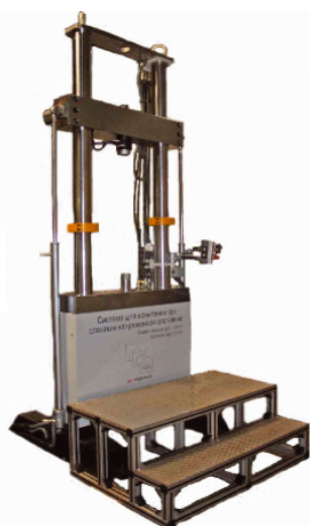
Циклические испытания проводились на универсальной испытательной машине Biss-00-100 (рис. 2, а) с частотой испытаний 20 Гц в симметричном цикле ($R = -1$). Процесс контроля усталостных испытаний материалов осуществлялся методом мягкого нагружения, т. е. с плавным и контролируемым увеличением приложенных напряжений. Критериями остановки испытания служили три основных фактора, тщательно отслеживаемые специализированной измерительной аппаратурой. Испытание прекращалось при полном разрушении образца – это наиболее очевидный признак достижения предела выносливости материала. Испытание прерывалось при достижении заранее определенного числа циклов нагружения, кратного 100 000. Остановка испытания происходила при увеличении размаха деформаций более чем на 20 % от начальной величины. Этот параметр от-

ражает накопление пластической деформации в материале. Превышение допустимого порога в 20 % сигнализирует о значительном снижении несущей способности образца и указывает на близость к разрушению. Важно учитывать, что этот порог может варьироваться в зависимости от типа материала и условий испытания.

Для исследования влияния процесса поверхностной ПВЭО на усталостные характеристики образцы снимались с испытаний после 100 тысяч циклов. Проводилось оптическое сканирование поверхности с помощью оптического микроскопа – профилометра NewView 5010 (рис. 2, б). Этот прибор позволяет создать цифровую модель рельефа поверхности и провести как качественный, так и количественный анализ изменений, которые произошли на поверхности материала в процессе испытаний.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования были проанализированы образцы жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, полученные методом ПВЭО на минимальном и максимальном режимах. Поверхностный слой образцов качественно и количественно



а



б

Рис. 2. Оборудование для исследования влияния циклических испытаний на деформацию поверхности:

а – сервогидравлическая универсальная испытательная машина Biss-00-100; б – интерферометр-профилометр NewView 5010

Fig. 2. Equipment for studying the effect of cyclic tests on surface deformation:

а – servo-hydraulic universal testing machine Biss-00-100; б – interferometer-profilometer NewView 5010

оценивался с помощью оптического микроскопа Olympus GX51 при увеличении $\times 200$ (рис. 3).

Установлено, что при ПВЭЭО величина дефектного белого слоя остается стабильной на обоих режимах и составляет 10 мкм. Изменение параметров обработки в данном диапазоне не оказывает значительного влияния на глубину образования дефектного слоя.

Поверхность образца, выполненного из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, подвергнутого ПВЭЭО на минимальном режиме № 1,

показана на рис. 4. При исследовании образца методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) не обнаружено поверхностных дефектов в виде пор и трещин. Во время процесса ПВЭЭО происходят искровые разряды и наблюдается выброс микрообъема расплавленного металла из образца, что приводит к образованию микрократера. Выброшенный расплавленный металл быстро затвердевает, формируя характерный валик по периметру кратера. На рис. 4, *а* и *б* отсутствуют ярко выраженные зоны расплава

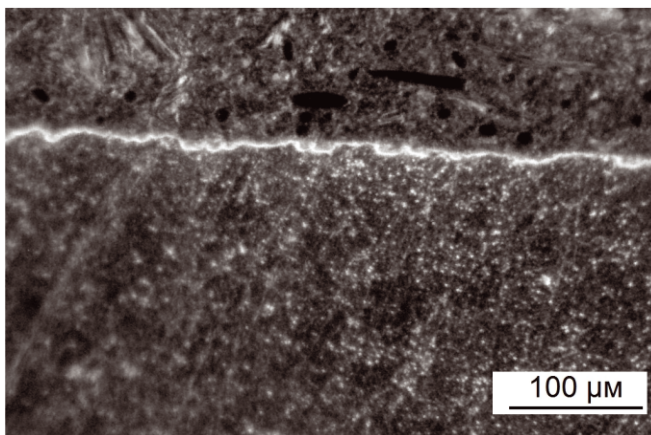
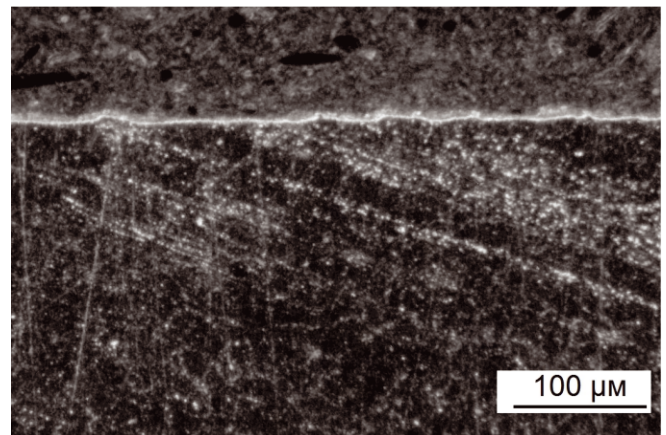
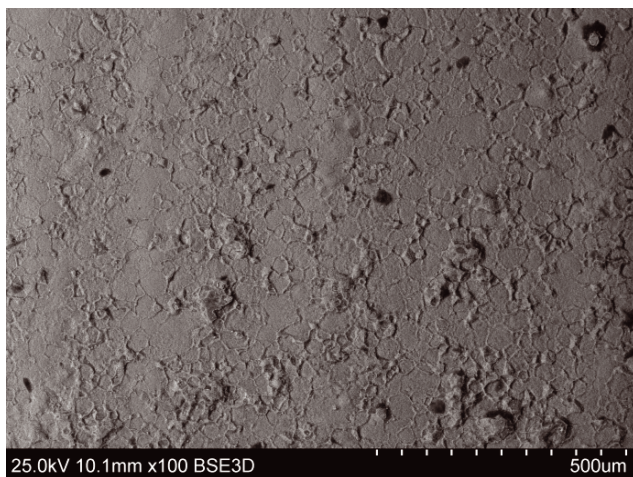

а

б

Рис. 3. Структура поверхностного слоя образцов ВВ751П после ПВЭЭО:
а – на минимальном режиме; *б* – на максимальном режиме

Fig. 3. Structure of the surface layer of VV751P samples after WEDM:
а – in minimum mode; *б* – in maximum mode


а

б

Рис. 4. Поверхность образца, выполненного из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, после электроэрозионной проволочной обработки по режиму № 1 (получено при помощи СЭМ):
а – увеличение $\times 100$; *б* – увеличение $\times 1000$

Fig. 4. Surface of the specimen made of heat-resistant nickel alloy VV751P after WEDM according to mode No. 1, obtained using SEM:
а – 100 \times magnification; *б* – 1,000 \times magnification

в виде лунок, а также валики, впадины и острые наплывы.

На рис. 5 показана томография поверхности образца после обработки на режиме № 1. Среднее значение параметра шероховатости по $Ra = 1,53$ мкм.

Исследование поверхности образца, подвергнутого обработке по режиму № 1, с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа (ЛКСМ) OLSLext 4000 показало, что обработанная поверхность плоская, с характерным микрорельефом, сформированным путем оплавления материала образца в процессе обработки. Наличия на обработанной поверхности образца пор или трещин не выявлено.

При увеличении энергии импульса (режим № 2) наблюдается интенсифицирование процесса плавления материала. Расплавленный сплав хаотично распространяется по поверхности, формируя неровности различной формы и размера. Этот процесс обуславливает различия в шероховатости поверхностного слоя материалов. В

связи с тем, что поверхностный слой материала обрабатываемой заготовки подвергается интенсивному термическому воздействию при ЭЭО, на его поверхности формируются вторичные структуры. Установлено, что увеличение мощности ПВЭЭО на режиме № 2 при сохранении высоты обрабатываемого образца 10 мм не приводит к качественным изменениям обработанной поверхности (рис. 6, а). Однако при более высоких увеличениях (рис. 6, б) на обработанной поверхности выявляются микротрещины, формирующиеся в процессе высокоскоростного охлаждения расплавленного металла с более высоких температур, реализуемых за счет более интенсивного энерговыделения по сравнению с режимом обработки № 1. На рис. 6, б отмечено наличие микротрещин в лунках на поверхности образца высотой 10 мм, обработанного на режиме № 2.

На рис. 7 представлен случайный участок поверхности образца из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П после режима № 2. Отмечено

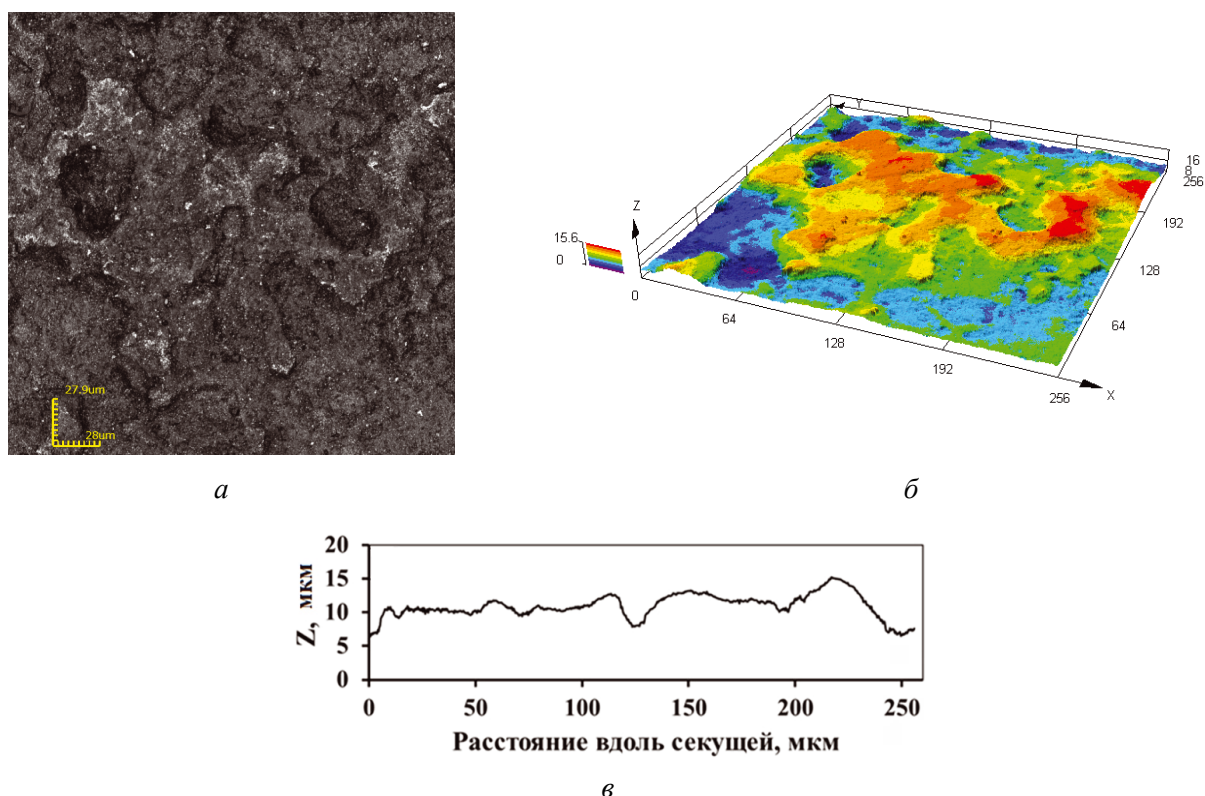


Рис. 5. ЛКСМ при увеличении $\times 500$:

а – случайный участок поверхности образца после обработки по режиму № 1 с секущей; б – 3D-модель с температурной картой высот; в – график изменения микрорельефа поверхности вдоль секущей

Fig. 5. CSLM at 500 \times magnification:

а – a random area of the sample surface after processing in mode No. 1 with a secant line; б – 3D model with a temperature map of heights; в – graph of microrelief variation along the secant line

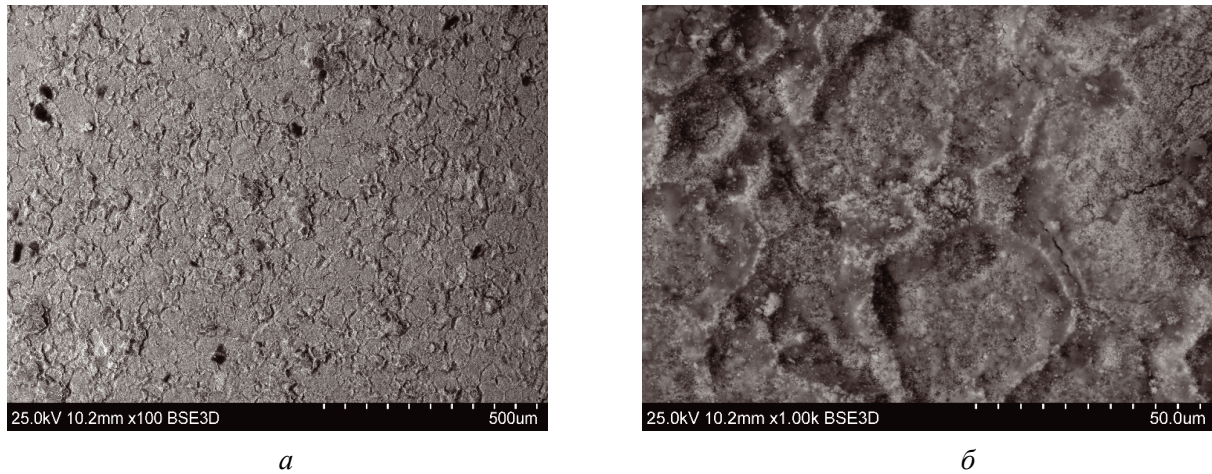


Рис. 6. Поверхность образца, выполненного из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П после ПВЭЭО на режиме № 2, полученная при помощи СЭМ:

а – при увеличении $\times 100$; б – при увеличении $\times 1000$

Fig. 6. Surface of the specimen made of heat-resistant nickel alloy *VV751P* after *WEDM* in mode No. 2, obtained using *SEM*:

а – at $100\times$ magnification; б – at $1,000\times$ magnification

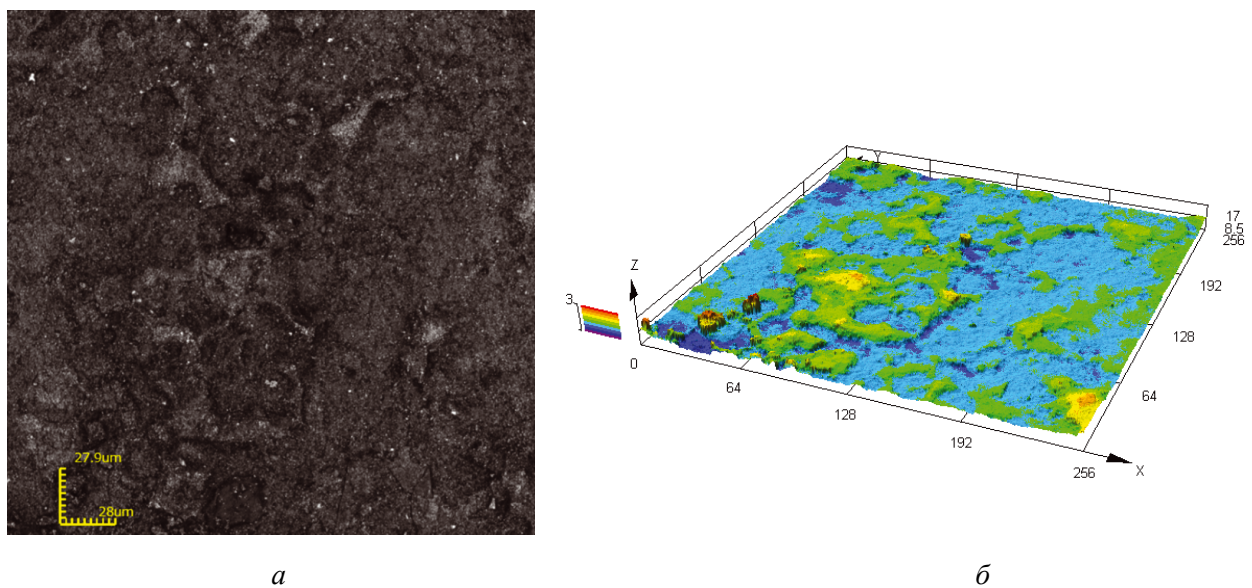


Рис. 7. ЛКСМ при увеличении $\times 500$:

а – случайный участок поверхности образца после обработки по режиму № 2 с секущей; б – 3D-модель с температурной картой высот; в – график изменения микро рельефа поверхности вдоль секущей

Fig. 7. *CSLM* at $500\times$ magnification:

а – a random area of the sample surface after processing in mode No. 2 with a secant; б – 3D model with a temperature map of heights; в – graph of microrelief variation along the secant line

меньшее развитие температурной карты высот в сравнении с режимом № 1. Установлено, что среднее значение шероховатости по параметру $Ra = 1,62$ мкм, это соотносится со значением параметра шероховатости на режиме № 1 и соответствует одному классу шероховатости.

С увеличением высоты обрабатываемого образца до 15 мм образование микротрещин на

его поверхности в процессе электроэрозионной проволочной обработки интенсифицируется вне зависимости от мощности режима обработки (рис. 8, *a–e*). Действие вторичных разрядов показано на рис. 8. Финальный этап характеризуется явлениями кавитации, а также плазменного светящего факела (с характерным временем жизни 5 мс) из-за участвовавших высокочастотных

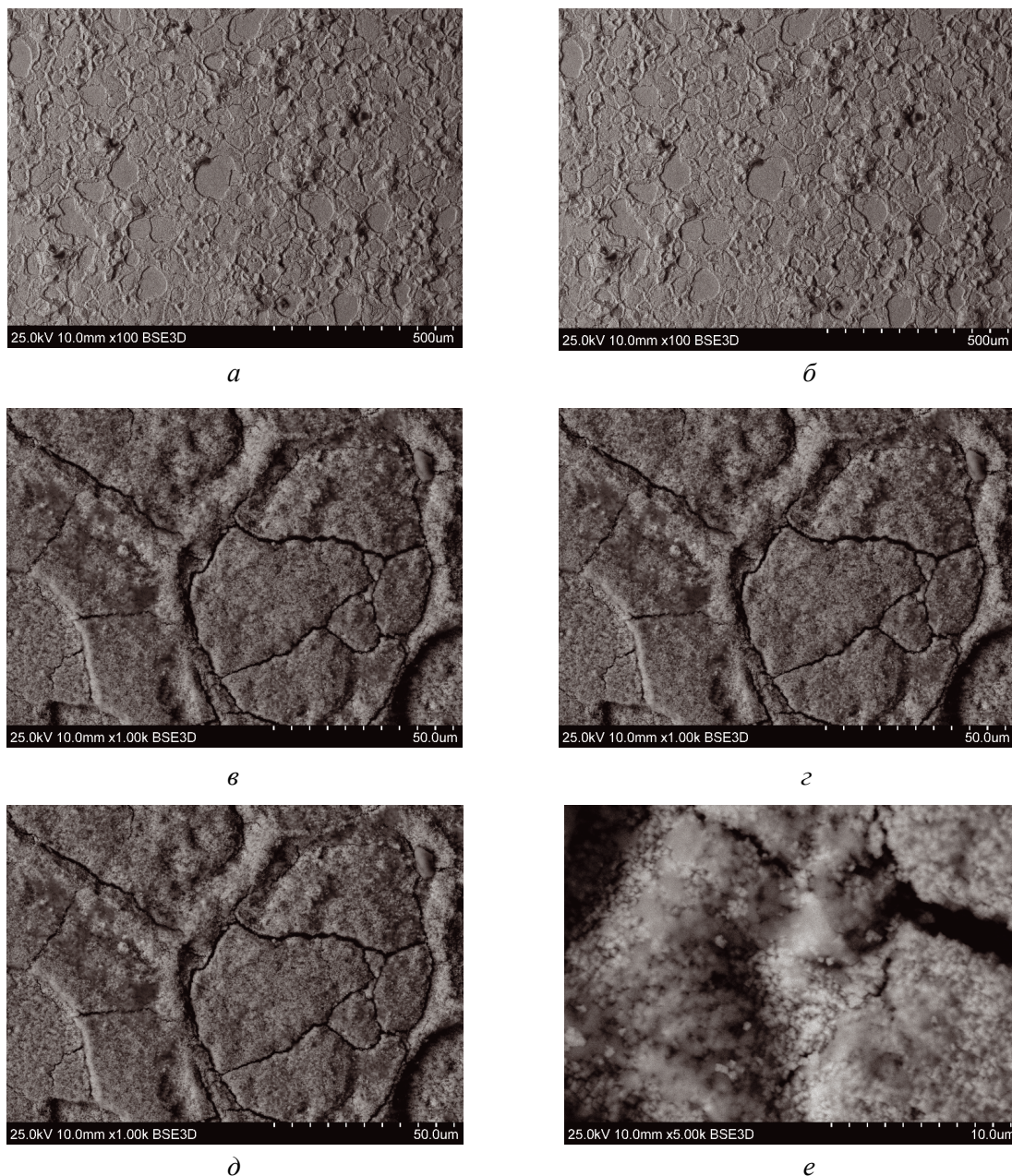


Рис. 8. Поверхность образцов, выполненных из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, после ПВВЭО на режиме (а) № 3 при увеличении $\times 100$; (б) № 4 при увеличении $\times 100$; (в) № 3 при увеличении $\times 1000$; (г) № 4 при увеличении $\times 1000$; (д) № 3 при увеличении $\times 5000$; (е) № 4 при увеличении $\times 5000$ (получено при помощи СЭМ)

Fig. 8. Surface of samples made of heat-resistant nickel alloy VV751P, after WEDM in the mode: (a) No. 3 at $100\times$ magnification; (б) No. 4 $100\times$ magnification; (в) No. 3 $1,000\times$ magnification; (г) No. 4 at $1,000\times$ magnification; (д) No. 3 at $5,000\times$ magnification; (е) No. 4 at $5,000\times$ magnification (obtained by SEM)

разрядов вблизи катода. В начале третьего этапа пузырьки парогазового слоя начинают схлопываться из-за уравнивания внутреннего и внешнего давления за счет повышения локальной температуры, которая является производной приложенного давления. Это явление приводит к возникновению большого кавитационного удара, составляющего примерно 1010 МПа, дальнейшему активному увеличению параметра шероховатости поверхности и росту технологических трещин при ПВЭЭО жаропрочного никелевого сплава ВВ751П.

При повышении энергии импульса, помимо увеличения параметра шероховатости, происходит зарождение технологических трещин, образуемых в результате ПВЭЭО. Быстрое нагревание заготовки до температуры 5000 °С с последующим резким охлаждением до температуры дистиллированной воды (20 °С) способствует возникновению трещин на обработанной поверхности. Это явление обусловлено воздействием термических напряжений, которые приводят к растрескиванию металла. Важным фактором, влияющим на образова-

ние трещин, является наличие впадин и отверстий, служащих концентраторами напряжений. После обработки поверхности образца высотой 15 мм на режиме № 3 относительно крупные микротрещины выявляются методом СЭМ при достаточно небольших увеличениях (рис. 8, а). При несколько бóльших увеличениях становится очевидно, что микротрещины на обработанной поверхности, в сравнении с поверхностями образцов высотой 10 мм и обработанными по режимам № 1 и 2, становятся более глубокими и разветвленными (рис. 8, в). Более подробные исследования обработанной поверхности при кратности увеличения $\times 5000$ показали наличие мелкокристаллических образований субмикронного размера, по границам которых обнаруживаются микротрещины зигзагообразной формы, показанные стрелками на рис. 8, д.

Качественных изменений в микрорельефе поверхности образца высотой 15 мм, обработанной на режиме № 3, в сравнении с микрорельефом поверхности образца высотой 10 мм, обработанной по режиму № 2, не отмечено (рис. 9).

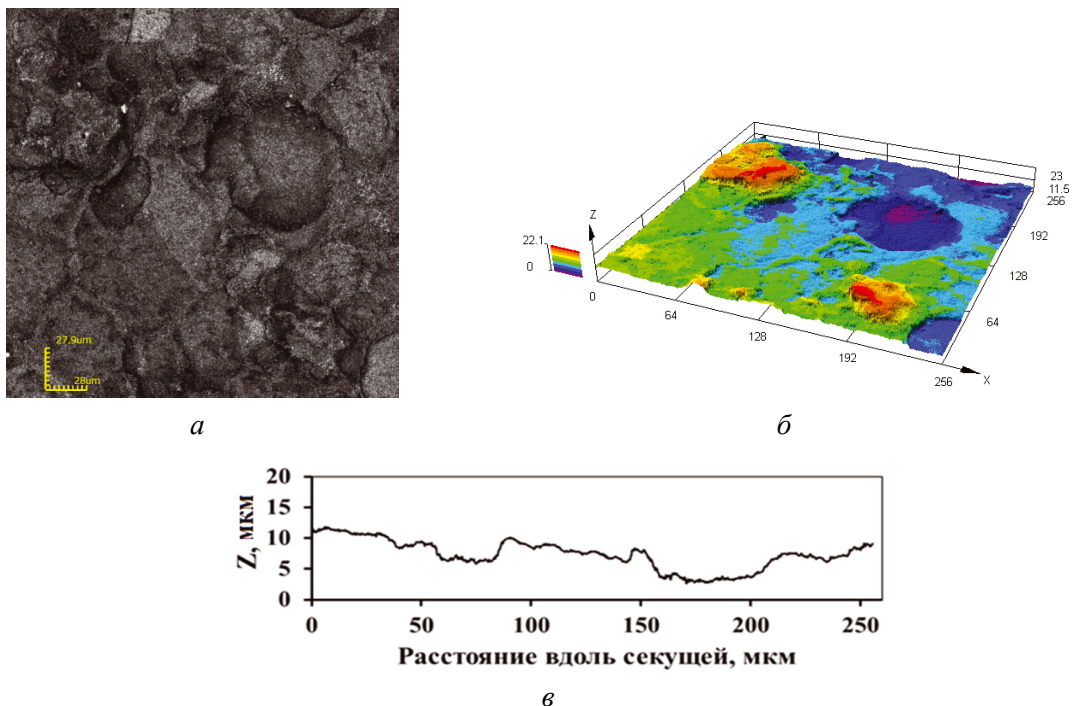


Рис. 9. ЛКСМ при увеличении $\times 500$:

а – случайный участок поверхности образца после обработки по режиму № 3 с секущей; б – 3D-модель с температурной картой высот; в – график изменения микрорельефа поверхности вдоль секущей

Fig. 9. CSLM at 500 \times magnification:

а – a random area of the sample surface after processing in mode No. 3 with a secant line; б – 3D model with a temperature map of heights; в – graph of microrelief variation along the secant line

Значение параметра шероховатости по $Ra = 2,6$ мкм после ПВЭЭО на режиме № 3.

На поверхности образца, обработанной на режиме № 4, также обнаруживается достаточно большое количество трещин и растрескиваний (рис. 8, б, з). Как показали исследования поверхности образца с помощью ЛКСМ (рис. 10), глубина таких трещин и растрескиваний превышает 1 мкм. Макроскопических дефектов в виде крупных пор или раковин не выявлено.

Формирование микротрещин и растрескиваний в образце, подвергнутом ПВЭЭО на режиме № 3, обусловлено образованием мелкокристаллических структур при высокоскоростной кристаллизации из расплава с повышенных температур. Увеличение высоты образца приводит к увеличению времени воздействия единичных импульсов. Как следствие, интенсифицируется термическое воздействие. Возникающие при этом напряжения вызывают образование микротрещин, которые впоследствии могут сливаться, образуя более крупные трещины. Значение вели-

чины параметра шероховатости по Ra составляет 3,4 мкм.

С увеличением высоты обрабатываемой заготовки происходит активное повышение концентрации энергии на поверхности обработки, что вызывает явление вторичных разрядов, негативно влияющих на концентрацию и интенсивность образования трещин на поверхности жаропрочного никелевого сплава ВВ751П. Наличие трещин на поверхности негативно сказывается на эксплуатационной характеристике изделий, выполненных из жаропрочных никелевых сплавов.

Для определения времени, характера и механизма разрушения при действии циклических нагрузок на ответственные изделия из функциональных материалов проведены циклические испытания на малоцикловую усталость. Малоцикловая усталость отражает разрушение при упругопластическом деформировании изделия. Данные циклических испытаний указаны в табл. 2 и на усталостной диаграмме (рис. 11) соответственно.

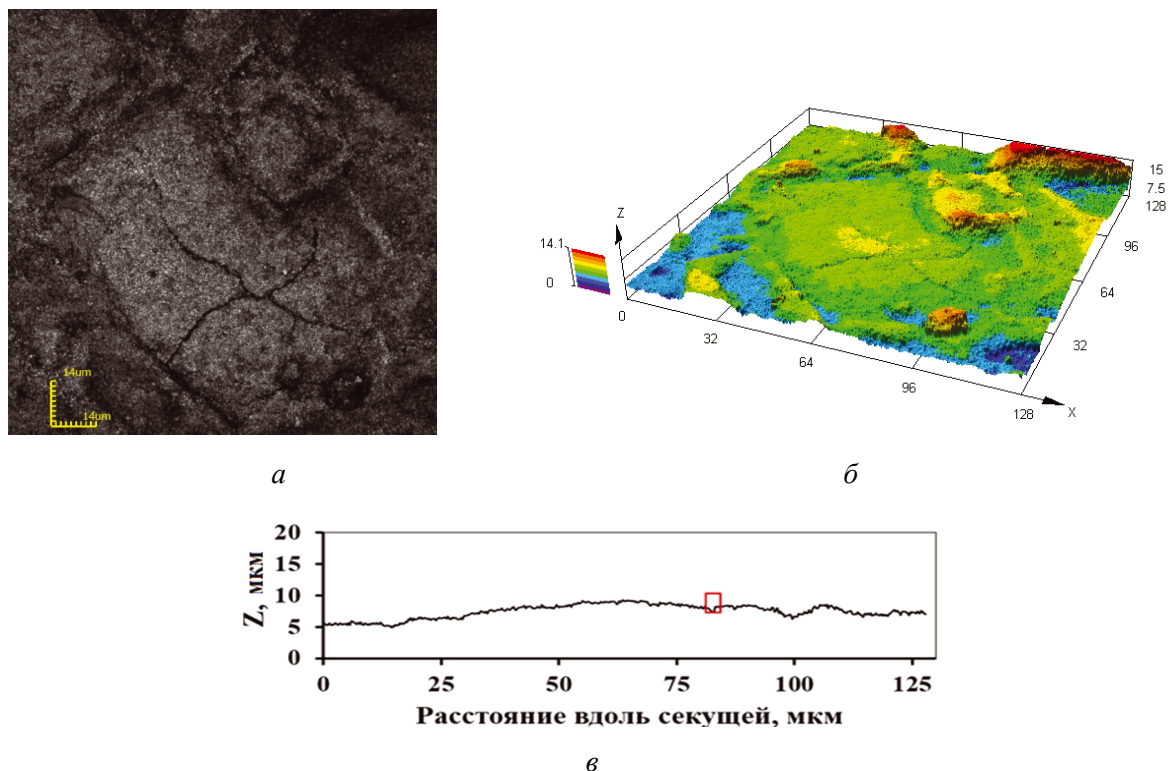


Рис. 10. ЛКСМ при увеличении $\times 500$:

a – случайный участок поверхности образца после обработки по режиму № 4 с секущей; b – 3D-модель с температурной картой высот; c – график изменения микро рельефа поверхности вдоль секущей

Fig. 10. CSLM at 500 \times magnification:

a – a random area of the sample surface after processing in mode No. 4 with a secant line; b – 3D model with a temperature map of heights; c – graph of microrelief variation along the secant line

Результаты циклических испытаний сплава ВВ751П
Results of cyclic tests of VV751P alloy

№ п/п	Напряжения в цикле нагружения		Количество циклов	Результат
	кН	МПа		
1	0,75	263	2,50E+05	Не разрушен
2	1	351	1,74E+05	Разрушен
3	2	702	1,90E+04	Разрушен
4	1,5	526	4,18E+04	Разрушен
5	1,2	421	1,62E+05	Разрушен
6	1,1	386	92 700	Разрушен

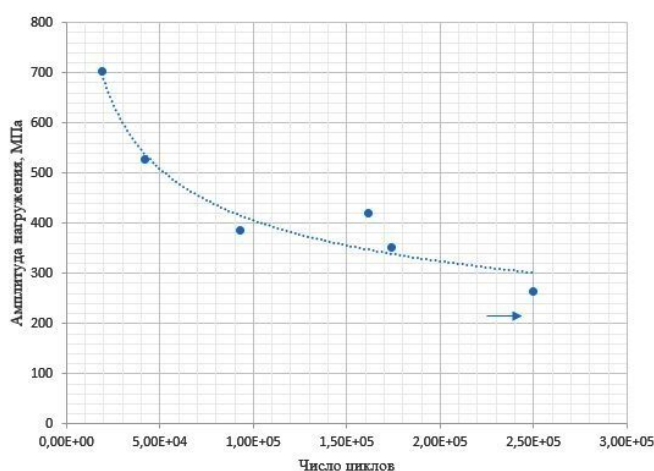


Рис. 11. Усталостная диаграмма сплава ВВ751П при малоцикловой усталости (стрелкой обозначен образец, который не разрушился за заданное количество циклов)

Fig. 11. Low-cycle fatigue diagram for the VV751P alloy (an arrow indicates a run-out sample that did not fracture after the specified number of cycles)

В результате исследования установлено, что при амплитуде нагружения 400 МПа достигается среднее значение числа циклов, которое составляет $1,50E+05$ циклов. Отмечено уменьшение количества циклов при увеличении амплитуды циклов нагружения. На графике стрелкой обозначен образец, который не разрушился за заданное количество циклов.

Выводы

1. Проведен анализ дефектного (белого) слоя образцов. Установлено, что в процессе ПВЭЭО величина дефектного (белого) слоя постоянна после обработки и составляет порядка 10 мкм независимо от режима обработки.

2. Проанализирован показатель качества поверхности – шероховатости по Ra . Установлено, что среднее значение шероховатости по параметру Ra составляет 1,62 мкм при обработке образцы высотой 10 мм. При увеличении высоты значение шероховатости поверхности достигает 2,6 мкм на минимальном режиме и 3,4 мкм – на максимальном.

3. Установлено, что с увеличением высоты заготовки происходит образование микротрещин на поверхности изделия, которые увеличиваются на максимальном режиме. Формирование трещин связано с интенсификацией взаимодействия единичных импульсов с обрабатываемой поверхностью. При обработке образца высотой 10 мм отмечено отсутствие пор и трещин на поверхности. При обработке образцов высотой 15 мм установлено наличие трещин на поверхности, достигающих в длину 50...60 мкм.

4. В результате исследования установлено, что при амплитуде нагружения 400 МПа достигается среднее значение числа циклов, которое составляет $1,50E+05$ циклов. Отмечено уменьшение количества циклов при увеличении амплитуды циклов нагружения.

Список литературы

1. Nowotnik A. Nickel-based superalloys // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2016. – Vol. 107 (2). – P. 1–6. – DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.02574-1.
2. Neumeier S., Freund L.P., Göken M. Novel wrought γ/γ' cobalt base superalloys with high strength and improved oxidation resistance // Scripta Materialia. – 2015. – Vol. 109. – P. 104–107. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.07.030.



3. Additive manufacturing of Nickel-based superalloy: optimization of surface roughness using integrated high-speed milling / D. Sommer, A. Safi, C. Esen, R. Hellmann // Proceedings of SPIE. – 2024. – Vol. 12876: Laser 3D Manufacturing XI. – DOI: 10.1117/12.3000972.
4. *Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.* Газотурбинные двигатели. – Пермь: Авиадвигатель, 2006. – 1204 с.
5. *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). – P. 1287–1300. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
6. *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.
7. *LotfiNeyestanak A.A., Daneshmand S.* The effect of operational cutting parameters on Nitinol-60 in wire electrodischarge machining // Advances in Materials Science and Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–6. – DOI: 10.1155/2013/457186.
8. *Sharma N., Raj T., Jangra K.K.* Parameter optimization and experimental study on wire electrical discharge machining of porous Ni40Ti60 alloy // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2013. – Vol. 231 (6). – P. 956–970. – DOI: 10.1177/0954405415577710.
9. *Safranski D., Dupont K., Gall K.* Pseudoelastic NiTiNOL in orthopaedic applications // Shape Memory and Superelasticity. – 2020. – Vol. 6. – P. 332–341. – DOI: 10.1007/s40830-020-00294-y.
10. *Rathod R., Kamble D., Ambhore N.* Performance evaluation of electric discharge machining of titanium alloy – a review // Journal of Engineering and Applied Science. – 2022. – Vol. 69 (1). – P. 1–19. – DOI: 10.1186/s44147-022-00118-z.
11. *Porwal R.K., Yadava V., Ramkumar J.* Micro electrical discharge machining of micro-hole // Advanced Science Engineering and Medicine. – 2020. – Vol. 12 (11). – P. 1335–1339. – DOI: 10.1166/ase.2020.2586.
12. Predictive model of milling force for complex profile milling / X. Su, G. Wang, J. Yu, F. Jiang, J. Li, Y. Rong // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 87. – P. 1653–1662. – DOI: 10.1007/s00170-016-8589-1.
13. *Gimadeev M.R., Nikitenko A.V., Berkun V.O.* Influence of the sphero-cylindrical tool orientation angles on roughness under processing complex-profile surfaces // Advanced Engineering Research. – 2023. – Vol. 23 (3). – P. 231–240. – DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240.
14. *Sharakhovsky L.I., Marotta A., Essiptchouk A.M.* Model of workpiece erosion for electrical discharge machining process // Applied Surface Science. – 2006. – Vol. 253. – P. 797–804. – DOI: 10.1016/j.apusc.2006.01.013.
15. *Barenji R.V., Pourasl H.H., Khojastehzad V.M.* Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio // Precision Engineering. – 2016. – Vol. 45. – P. 435–444.
16. Investigations on surface integrity of heat treated 42CrMo4 (AISI 4140) processed by sinking EDM / F. Klocke, S. Schneider, L. Ehle, H. Meyer, L. Hensgen, A. Klink // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 42. – P. 580–585. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.263.
17. *Golabczak A., Konstanynowicz A., Golabczak M.* Mathematical modelling of the physical phenomena in the interelectrode gap of the EDM process by means of cellular automata and field distribution equations // Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures. – 2013. – Vol. 41. – P. 169–184. – DOI: 10.1007/978-3-319-00506-5_11.
18. Quantitative analysis of bubble size and electrodes gap at different dielectric conditions in powder mixed EDM process / A. Kumar, A. Mandal, A.R. Dixit, D.K. Mandal // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 4 (1). – P. 1–11. – DOI: 10.1007/s00170-020-05189-x.
19. *Puri A.B., Bhattacharyya B.* Modeling and analysis of white layer depth in a wire-cut EDM process through response surface methodology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2005. – Vol. 25 (3). – P. 301–307. – DOI: 10.1007/s00170-003-2045-8.
20. *Ablyaz T.R., Zhurin A.* Influence of wire-cut electrical discharge machining on surface quality // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36 (2). – P. 156–158. – DOI: 10.3103/S1068798X16020039.
21. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: a review paper / M. Brown, D. Wright, R.M. Saoubi, J.M. Gourlay, M. Wallis, A. Mantle, P. Crawforth, H. Ghadbeigi // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2018. – Vol. 23. – P. 39–53. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.10.001.

Конфликт интересов

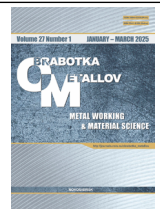
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 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



Improvement the manufacturing quality of new generation heat-resistant nickel alloy products using wire electrical discharge machining

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

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

^a <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0009-0009-2693-6580>, warkk98@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 December 2024

Revised: 19 December 2024

Accepted: 28 December 2024

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Wire electrical discharge machining

Surface roughness

Accuracy

Microcracks

Surface layer

Cyclic testing

Funding

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

ABSTRACT

Introduction. The paper presents the results of an experimental study on the quantitative and qualitative evaluation of the surface after wire electrical discharge machining (WEDM). **The purpose of this study** is an experimental investigation with qualitative and quantitative analysis of surface defects in samples made of a heat-resistant nickel alloy *VV751P* after WEDM. **Methods of research.** Samples for the study with a specific geometry were obtained by the wire electrical discharge machining method in 4 modes. The operating parameters were: workpiece height (h , mm), pulse-on time (T_{on} , μ s), and pulse-off time (T_{off} , μ s). The samples were studied using a *Hitachi S-3400N* electron microscope in backscattered electron mode at 25 kV. Surface topography after electrical discharge machining was evaluated using a laser scanning microscope (LSM) *LexiOLS4000*. Cyclic tests were performed on a universal testing machine *Biss-00-100* at a test frequency of 20 Hz in a symmetrical cycle ($R = -1$). **Results and discussion.** The defective (white) layer of samples was analyzed. It is established that during wire electrical discharge machining the thickness of defective white layer is within 10 μ m, both after processing in minimum and maximum mode. The surface quality index (surface roughness Ra) was analyzed. It was found that the average value of surface roughness parameter Ra is 1.62 μ m when processing samples with a height of 10 mm. When the sample height increases, the surface roughness value reaches 2.6 μ m after processing in minimum mode and 3.4 μ m after processing in maximum mode. It is established that with an increase in workpiece height, the number of microcracks on the surface of the product increases, which is associated with the intensification of the interaction of single pulses with the processed surface. As a result of the study, it is found that at a loading amplitude of 400 MPa, an average value of the number of cycles reaches $1.50E + 05$ cycles. A decrease in the number of cycles is observed with an increase in the amplitude of the loading cycles.

For citation: Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Blokhin V.B., Muratov K.R. Improvement the manufacturing quality of new generation heat-resistant nickel alloy products using wire electrical discharge machining. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 34–47. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-34-47. (In Russian).

References

1. Nowotnik A. Nickel-based superalloys. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016, vol. 107 (2), pp. 1–6. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.02574-1.
2. Neumeier S., Freund L.P., Göken M. Novel wrought γ/γ' cobalt base superalloys with high strength and improved oxidation resistance. *Scripta Materialia*, 2015, vol. 109, pp. 104–107. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.07.030.
3. Sommer D., Safi A., Esen C., Hellmann R. Additive manufacturing of Nickel-based superalloy: optimization of surface roughness using integrated high-speed milling. *Proceedings of SPIE*, 2024, vol. 12876. *Laser 3D Manufacturing XI*. DOI: 10.1117/12.3000972.
4. Inozemtsev A.A., Sandratsky V.L. *Gazoturbinnnye dvigateli* [Gas turbine engines]. Perm', Aviadvigatel' Publ., 2006. 1204 p.

* 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

5. 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.
6. 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.
7. LotfiNeyestanak A.A., Daneshmand S. The effect of operational cutting parameters on Nitinol-60 in wire electrodischarge machining. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1155/2013/457186.
8. Sharma N., Raj T., Jangra K.K. Parameter optimization and experimental study on wire electrical discharge machining of porous Ni40Ti60 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, vol. 231 (6), pp. 956–970. DOI: 10.1177/0954405415577710.
9. Safranski D., Dupont K., Gall K. Pseudoelastic NiTiNOL in orthopaedic applications. *Shape Memory and Superelasticity*, 2020, vol. 6, pp. 332–341. DOI: 10.1007/s40830-020-00294-y.
10. Rathod R., Kamble D., Ambhore N. Performance evaluation of electric discharge machining of titanium alloy – a review. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2022, vol. 69 (1), pp. 1–19. DOI: 10.1186/s44147-022-00118-z.
11. Porwal R.K., Yadava V., Ramkumar J. Micro electrical discharge machining of micro-hole. *Advanced Science Engineering and Medicine*, 2020, vol. 12 (11), pp. 1335–1339. DOI: 10.1166/ asem.2020.2586.
12. Su X., Wang G., Yu J., Jiang F., Li J., Rong Y. Predictive model of milling force for complex profile milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 87, pp. 1653–1662. DOI: 10.1007/s00170-016-8589-1.
13. Gimadeev M.R., Nikitenko A.V., Berkun V.O. Influence of the sphero-cylindrical tool orientation angles on roughness under processing complex-profile surfaces. *Advanced Engineering Research*, 2023, vol. 23 (3), pp. 231–240. DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240.
14. Sharakhovsky L.I., Marotta A., Essiptchouk A.M. Model of workpiece erosion for electrical discharge machining process. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 253, pp. 797–804. DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.01.013.
15. Barenji R.V., Pourasl H.H., Khojastehnezhad V.M. Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio. *Precision Engineering*, 2016, vol. 45, pp. 435–444.
16. Klocke F., Schneider S., Ehle L., Meyer H., Hensgen L., Klink A. Investigations on surface integrity of heat treated 42CrMo4 (AISI 4140) processed by sinking EDM. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 580–585. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.263.
17. Golabczak A., Konstantynowicz A., Golabczak M. Mathematical modelling of the physical phenomena in the interelectrode gap of the EDM process by means of cellular automata and field distribution equations. *Experimental and Numerical Investigation of Advanced Materials and Structures*, 2013, vol. 41, pp. 169–184. DOI: 10.1007/978-3-319-00506-5_11.
18. Kumar A., Mandal A., Dixit A.R., Mandal D.K. Quantitative analysis of bubble size and electrodes gap at different dielectric conditions in powder mixed EDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 4 (1), pp. 1–11. DOI: 10.1007/s00170-020-05189-x.
19. Puri A.B., Bhattacharyya B. Modeling and analysis of white layer depth in a wire-cut EDM process through response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 25 (3), pp. 301–307. DOI: 10.1007/s00170-003-2045-8.
20. Ablyaz T.R., Zhurin A. Influence of wire-cut electrical discharge machining on surface quality. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36 (2), pp. 156–158. DOI: 10.3103/S1068798X16020039.
21. Brown M., Wright D., Saoubi R.M., Gourlay J.M., Wallis M., Mantle A., Crawforth P., Ghadbeigi H. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: a review paper. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2018, vol. 23, pp. 39–53. DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.10.001.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.