

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT3-1

В статье представлены результаты исследований, посвященные влиянию режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ЭЭО) на трещинообразование и морфологию поверхностного слоя титанового сплава VT3-1. Целью статьи являлось получение данных о взаимосвязи режимов обработки с глубиной проникновения микротрещин, а также влияние режимов обработки на морфологию поверхностного слоя, в частности на группу параметров  $R_a$ . Методом растровой электронной микроскопии показано, что глубина микротрещин зависит от числа проходов и режимов обработки. Максимальная глубина составила 12 мкм после первого прохода, а минимальная — 0,9 мкм после четвертого прохода. Исследование методом профилометрии группы параметров  $R_a$  позволило установить, что после третьего прохода образуется оптимальный микрорельеф, удерживающий смазку.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, титан, поверхностный слой, трещины, морфология, маслудерживающая способность.

**Введение.** Электроэрозионная обработка — современный высокотехнологичный метод, обеспечивающий достижение высокой точности размеров и качества поверхности обрабатываемых материалов. По сравнению с лезвийными методами обработки ЭЭО обладает рядом таких преимуществ, как возможность обработки тонкостенных деталей без их деформации, возможность изготовления нетехнологичных конструктивных элементов (узкие прорезы и щели от 0,05 мм) и обработки токопроводящих материалов, обладающих высокой твердостью. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка является конкурентной заменой традиционных методов получения изделий из труднообрабатываемых материалов, к числу которых относятся титан и его сплавы [1].

Титан широко применяется в различных отраслях производства благодаря жаропрочности, механической прочности и коррозионной стойкости. Данные характеристики обуславливают применение титана и его сплавов в качестве одного из наи-

более востребованных материалов при изготовлении авиационной техники. Высокая коррозионная стойкость, низкая химическая активность в организме человека и низкие ферромагнитные свойства обеспечивают широкое использование титана и титановых сплавов при изготовлении медицинских инструментов [2–4], биосовместимых имплантатов [5, 6], а также удовлетворяют требованиям диагностики пациентов с имплантатами методом МРТ [7, 8].

К точности и качеству поверхности изделий авиационной промышленности предъявляются очень высокие требования, поэтому многие исследователи уделяют большое внимание анализу микрорельефа поверхности после ЭЭО, исследуя влияние различных параметров обработки на характеристики поверхности. Установлено, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает величина пикового тока [9], с ее ростом увеличивается значение параметров микрорельефа. В исследованиях [9–11] показано, что значения параметров

микрорельефа и величины их отклонений становятся больше с ростом пикового тока и длительности импульса. Установлено, что короткий импульс (4–6 мкс) обеспечивает более низкие значения параметров микрорельефа, а давление прокатки и натяжение проволоки не оказывают влияния на точность и качество обработки поверхности [12].

В работах отечественных и зарубежных исследователей отмечается наличие трещин на поверхности материала, обработанного методом ЭЭО. На поверхностях конструкционных материалов, обработанных данным методом, наблюдается налипший шлак, расплавленные кратеры и трещины различного размера [9, 10, 12]. Явление образования трещин на поверхностях, подвергнутых ЭЭО, характеризуется параметром «плотность поверхностного растрескивания» [11]. В работах [9, 11] упоминается об увеличении количества трещин, а также об их расширении при обработке в режиме больших токов и длительных импульсах. Вместе с тем сокращение длительности импульса и увеличение пикового тока приводит к уменьшению количества трещин, а также их размеров [9]. Установлено, что при увеличении длительности импульса «ширина раскрытия трещин» повышается [11].

Выбор оптимальных параметров обработки и их комбинирование для повышения производительности и качества обрабатываемой поверхности является сложной научно-практической задачей ЭЭО. Это обусловлено большим числом параметров процесса и сложностью его механизма [10]. В настоящее время исследование проводятся с учетом таких параметров поверхности, как точность размеров, качество и морфология поверхностного слоя. Однако до сих пор актуальна проблема определения оптимальных значений вышеперечисленных параметров посредством выбора соответствующего режима ЭЭО.

**1. Постановка задачи.** К качеству поверхностного слоя деталей, обработанных электроэрозионным методом, предъявляются повышенные требования по причине формирования дефектного слоя после ЭЭО. Ранее большим числом авторов, как и нашим исследовательским коллективом [13–15], были изучены параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73, а также длина и ширина микротрещин, возникающих на поверхности титановых сплавов после ЭЭО.

В частности, установлено влияние режимов ЭЭО на среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a$ . Проведено исследование влияния режимов и числа проходов на морфологию поверхностного слоя, установлены причины различия теоретических и экспериментальных значений характеристик микрорельефа. Однако влияние режимов и числа проходов на размеры микротрещин и глубину их проникновения в поверхностный слой титанового  $\beta$ -сплава ВТЗ-1, а также на группу параметров  $R_k$  фактически не изучены, что обуславливает актуальность данной работы.

**2. Методика и аппаратура экспериментально-го исследования.** При проведении эксперимента в качестве заготовки использовались кольца из титанового  $\beta$ -сплава ВТЗ-1. Обработка осуществлялась в 1, 2, 3 и 4 прохода с последующим исследованием глубины проникновения микротрещин и группы параметров  $R_k$ . Химический состав титанового  $\beta$ -сплава ВТЗ-1 согласно ГОСТ 19807-91: Ti — 85,95–91,05 %; Al — 5,5–7 %; Mo — 2–3 %; Cr — 0,8–2 %; Fe — 0,2–0,7 %; Si — 0,15–0,4 %; C — до 0,1 %; N — до 0,05 % прочих 0,3 %. Заготовки из титанового сплава ВТЗ-1 обрабатывались на электроэрозионном станке SODICK VZ300L. В качестве диэлектрической жидкости использовалась деионизированная вода, в качестве электрода инструмента — мягкая латунная проволока (Cu 65 %, Zn 35 %) диаметром 0,2 мм. В ходе эксперимента эмпирическим способом подобраны режимы, удовлетворяющие требованию стабильности обработки и соответствующие минимальному количеству обрывов проволоки (табл. 1).

Стабильность обработки, заключающаяся в минимизации числа обрывов проволоки, достигалась посредством контроля положения специального маркера: ЭЭО проводилась при условии нахождения маркера в центре зоны MEDIUM, выход маркера в зону HARD предотвращался. Анализ параметров, представленных в табл. 1, позволяет сделать вывод о том, что группа параметров № 5 обеспечивает максимальную производительность. Поскольку данная группа параметров обработки в наибольшей степени удовлетворяет критерию стабильности, заключающемуся в минимизации числа обрывов проволоки, дальнейшую обработку в 1, 2, 3 и 4 прохода

Таблица 1

Режимы электроэрозионной обработки титанового сплава ВТЗ-1

№ группы параметров	On	Off	ЕРА	Верхний предел скорости обработки, мм/мин	Количество обрывов проволоки на пути в 5 мм	Стабильность обработки
1	008	014	–4	1,25	2	нестабильная
2	009	014	–4	0,09	30	нестабильная
3	008	014	–4	2,51	2	стабильная
4	006	014	–4	2,78	1	стабильная
5	010	119	–4	3,82	0	стабильная

где On — длина импульса; Off — пауза между импульсами; ЕРА — комплексный параметр, отражающий стабильность обработки

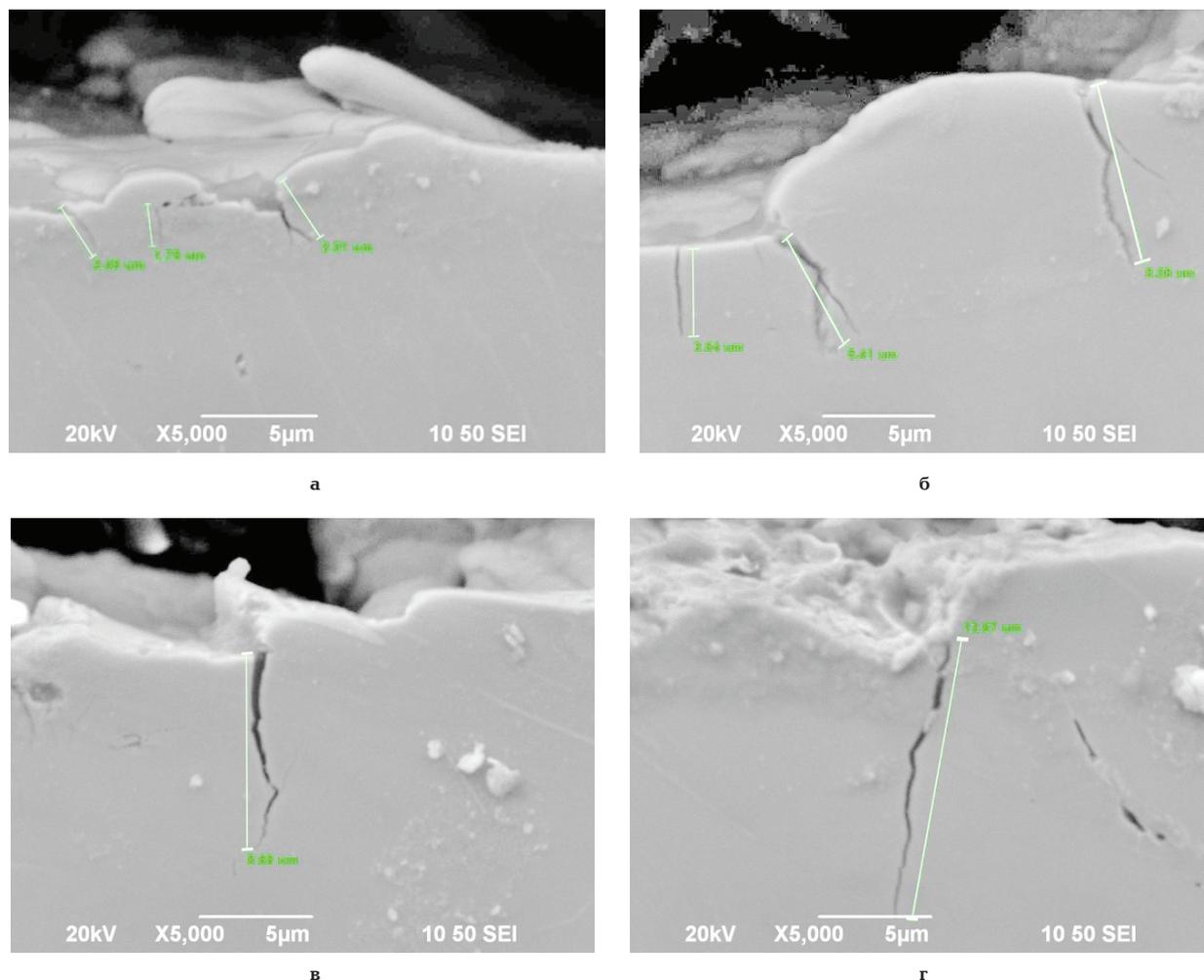


Рис. 1. Поперечные микрошлифы образцов из титанового сплава BT3-1 после первого прохода проволочно-вырезной электроэрозионной обработки,  $\times 5\,000$

проводили с использованием группы параметров № 5.

После электроэрозионной обработки были изготовлены поперечные микрошлифы для образцов после каждого из проходов, которые использовались для исследования глубины проникновения микротрещин и шероховатости поверхности, а именно группы параметров  $R_k$ . Микрошлифы изготавливались по стандартным методикам. Исследование глубины проникновения микротрещин проводили методом растровой электронной микроскопии на приборе JEOL JCM-5700, в режиме высокого вакуума. Используемый сигнал — вторичные электроны (SEI). Другие параметры режима принимали следующие значения: Spot Size (размер пятна) — 50, ускоряющее напряжение — 20 кВ, увеличение от 5000 до 10000 крат. При исследовании влияния количества проходов на глубину проникновения микротрещин проводился анализ всей поверхности образца длиной 5 мм, фиксировалась наибольшая глубина проникновения обнаруженных микротрещин для каждого прохода. Исследование группы параметров  $R_k$  по DIN4776 (ISO 13565-1:1998) проводили методом профилометрии на приборе TR-220 (TimeGroup) на базовых длинах 0,8 и 0,25 мм.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение.

3.1. Влияние количества проходов ЭЭО на глубину проникновения микротрещин.

Микрофотографии трещин для 1, 2, 3 и 4 проходов представлены на рис. 1–4 соответственно.

В целом трещинообразование в поверхностном слое в процессе ЭЭО является общеизвестным и распространенным явлением и связано со значительным градиентом температур, вызванным резким нагревом поверхностного слоя до температур плавления и выше и последующим резким охлаждением до температуры окружающего диэлектрика ( $20^\circ\text{C}$ ).

Как видно из рис. 1, наиболее характерной особенностью растрескивания образцов из титанового сплава BT3-1 является образование одной магистральной термической трещины, которая распространяется на всю глубину диффузионного слоя либо под прямым углом, либо с небольшим наклоном к поверхности образца (рис. 1в). Как правило, ширина трещины достигает наибольшей величины в месте возникновения у поверхности, уменьшается в направлении нормали к поверхности образца и не превышает толщины дефектного слоя. Вместе с тем в ходе ЭЭО также образуются трещины, обладающие практически неизменной шириной на всем своем протяжении (рис. 1б, слева). Постоянная ширина наиболее характерна для трещин, обладающих малой протяженностью. На микрофотографиях образцов, обработанных в один проход, обнаружено ветвление трещин — вторичные трещины первого типа (рис. 1а, 1б), причем зачастую ответвление от магистральной трещины обладает меньшей длиной и шириной. Кроме того, зафиксировано образование вторичных трещин второго типа (рис. 1б, справа), которые зарождаются в других областях

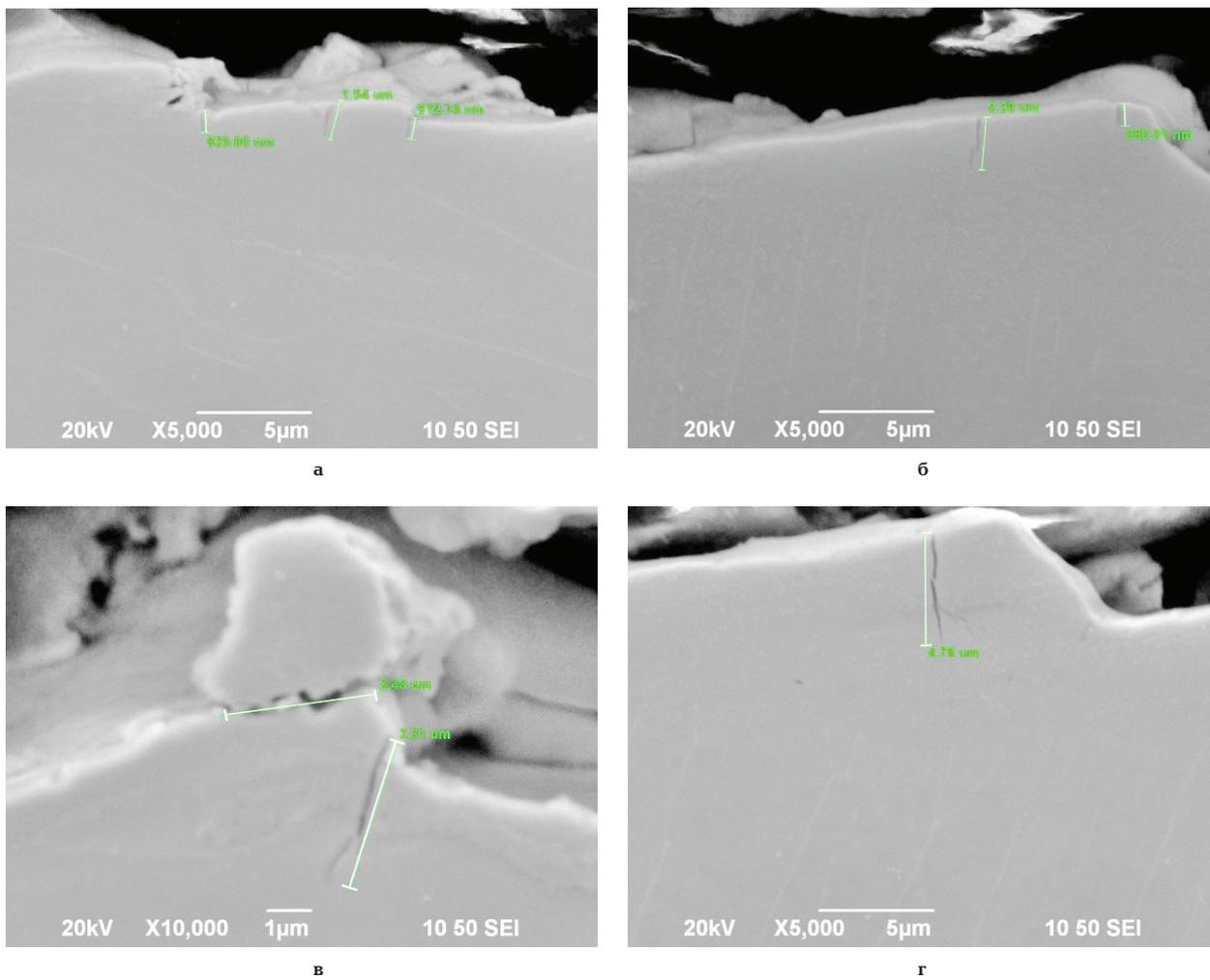


Рис. 2. Поперечные микрошлифы образцов из титанового сплава ВТ3-1 после второго прохода проволочно-вырезной электроэрозионной обработки,  $\times 5\ 000$ ,  $\times 10\ 000$

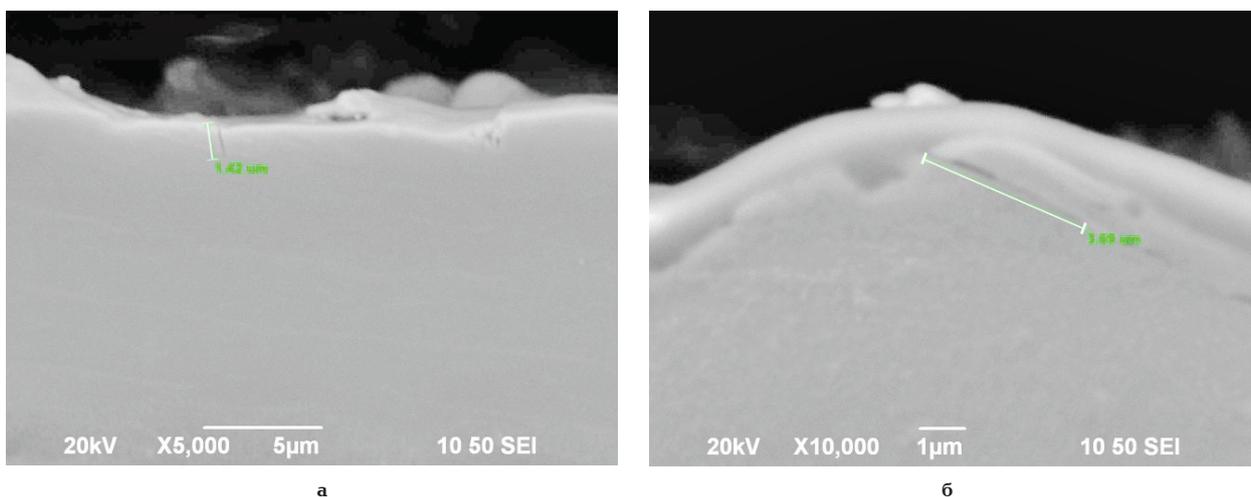


Рис. 3. Поперечные микрошлифы образцов из титанового сплава ВТ3-1 после третьего прохода проволочно-вырезной электроэрозионной обработки,  $\times 5\ 000$ ,  $\times 10\ 000$

и, как правило, не пересекаются с магистральными трещинами. Максимальная глубина трещин для первого прохода составила 12,67 мкм (рис. 1г).

После второго прохода глубина трещин значительно уменьшается, что можно объяснить снижением параметров режимов обработки и, следовательно, мощности единичного импульса (первый

проход является черновым, а 2, 3 и 4 являются чистовыми или выхаживающими). Как видно из рис. 2, самая глубокая трещина распространяется на глубину 4,76 мкм. Также следует отметить, что после второго прохода сокращается число ветвящихся трещин, их ширина в целом меньше, чем у трещин, образовавшихся после первого про-

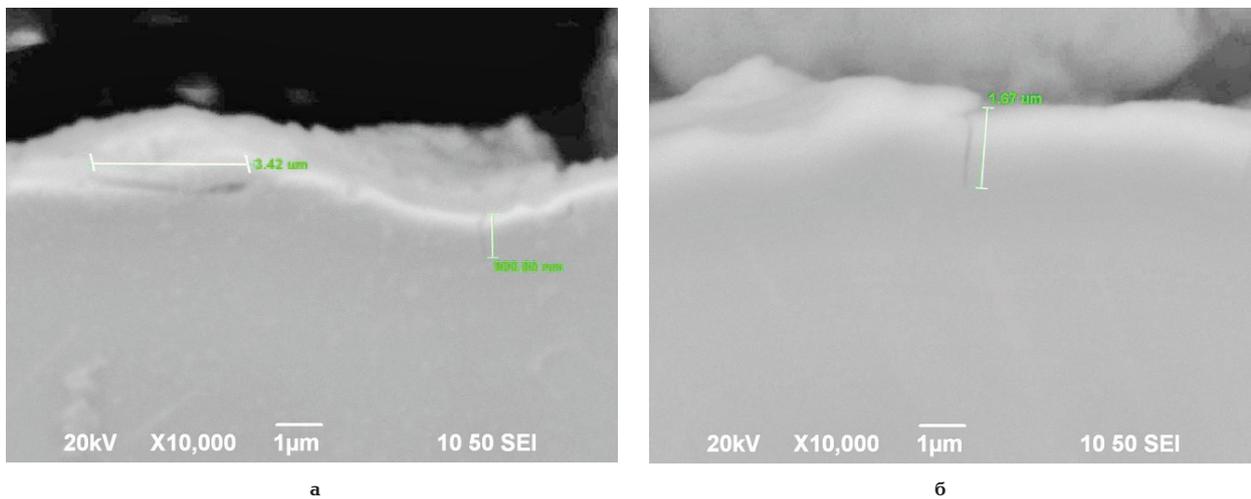


Рис. 4. Поперечные микрошлифы образцов из титанового сплава BT3-1 после четвертого прохода проволочно-вырезной электроэрозионной обработки,  $\times 10\ 000$

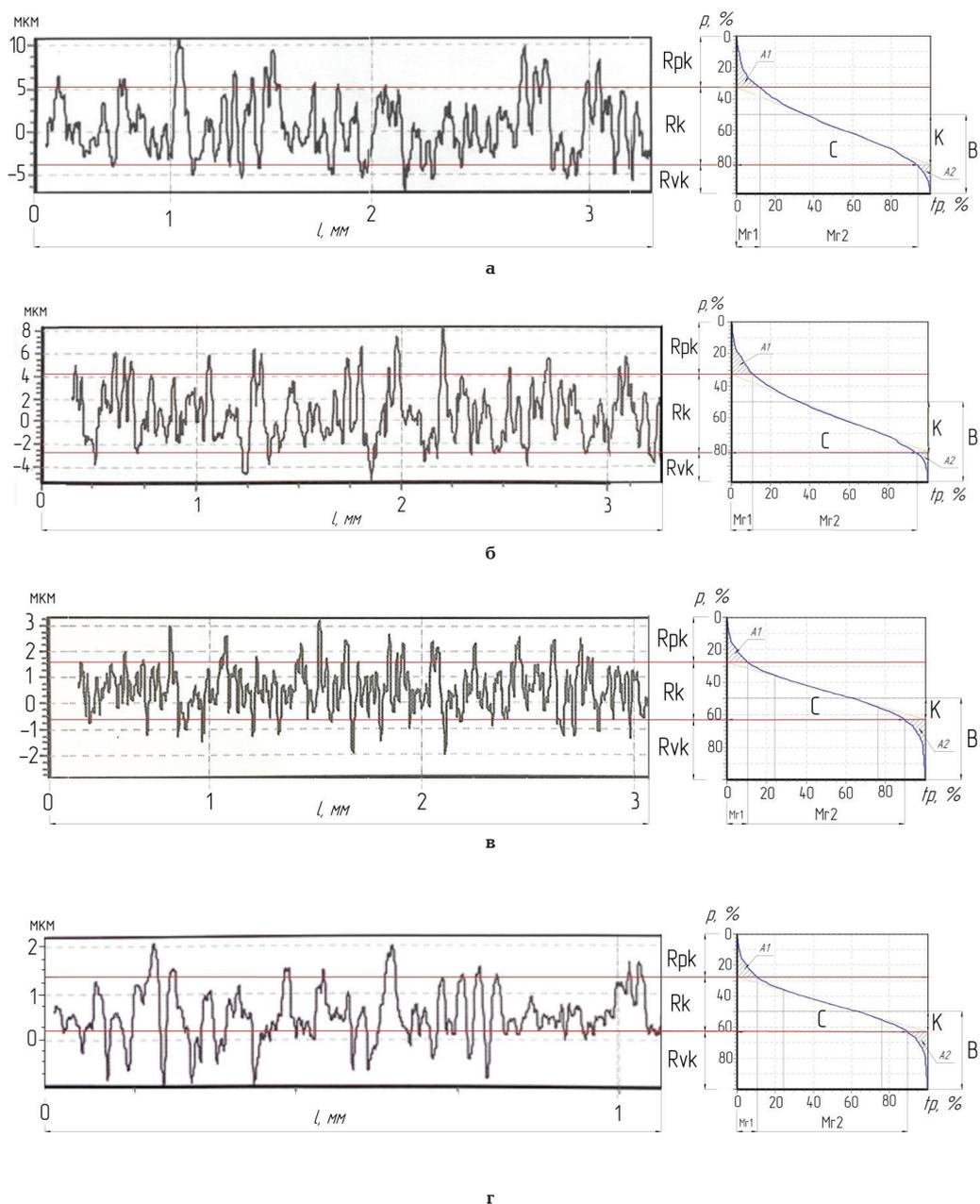


Рис. 5. Определение значений параметров  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$  по относительной опорной кривой и профилограмме: а) 1-й проход, б) 2-й проход, в) 3-й проход, г) 4-й проход

Шероховатость поверхности титанового сплава BT3-1

	1 проход	2 проход	3 проход	4 проход
$R_a$ , мкм	2,708	2,003	0,685	0,446
$R_{max}$ , мкм	18,470	13,790	6,044	3,496
$R_{pk}$ , мкм	4,8	3,75	1,35	0,26
$R_k$ , мкм	7,3	6,5	2,3	1,1
$R_{vk}$ , мкм	3	2,5	2,25	1,2
$M_{d1}$ , %	12	11	10	11
$M_{d2}$ , %	94	95	90	90

да. Значительный интерес представляет трещина на рис. 2в, поскольку она расположена горизонтально. В результате литературного обзора не было обнаружено упоминание о классификации таких трещин, поэтому она предлагается ниже. Наибольшую опасность представляют трещины, распространяющиеся вдоль нормали к поверхности. В случае работы детали в условиях знакопеременных нагрузок такая трещина может способствовать разрушению детали. Трещины, распространяющиеся параллельно поверхности, в меньшей степени опасны, поскольку могут способствовать повреждению не всей детали, а только поверхностного слоя (выкрашивание, скалывание, отслаивание).

После третьего прохода количество трещин значительно сокращается, направление их распространения чаще всего отличается от нормали к поверхности (рис. 3). Максимальная глубина обнаруженных трещин составляет 3,69 мкм. Трещины третьего прохода являются преимущественно магистральными, характеризуются отсутствием ответвлений и вторичных трещин второго типа, что свидетельствует о более низком уровне остаточных напряжений растяжения в обработанном поверхностном слое.

Глубина трещин после четвертого прохода сохраняет тенденцию к уменьшению, их изучение требует большего увеличения, поэтому представленные микрофотографии сделаны при увеличении 10000 крат. Для трещин, обнаруженных после четвертого прохода, наблюдается сходство с трещинами после третьего прохода. Трещины также преимущественно магистральные, без ответвлений и вторичных трещин второго типа. Как видно из рис. 4, их максимальная глубина составляет 1,67 мкм. Большинство микротрещин после четвертого прохода ориентированы под различными углами к нормали поверхности.

В целом, необходимо отметить, что для первого и второго прохода режимы обработки выше, и ширина трещин у основания достигает 0,1 мкм. После третьего и четвертого прохода трещины становятся менее заметными, а их ширина составляет не более 0,07 мкм.

3.2. Влияние количества проходов ЭЭО на параметры шероховатости (группа параметров  $R_k$ ).

В случае необходимости оценки микрорельефа поверхности по функциональному назначению (износостойкость, герметичность), высотных

и шаговых параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S$ ,  $S_m$ ,  $t_{pr}$  регламентированных ГОСТ 2789-73 оказывается недостаточно. Необходимо использование особой группы параметров  $R_k$ , отсутствующих в ГОСТ 2789-73, но представленных в DIN 4776 (ISO 13565-1:1998). Наибольшее распространение группа параметров  $R_k$  получила в автомобилестроении, но также представляет значительный интерес в области авиа- и ракетостроения. К ним относятся параметры, определяемые по относительной опорной кривой профиля:  $R_{pk}$  — это верхняя часть микронеровностей поверхности, которая подвержена быстрому износу в период приработки узла,  $R_k$  — так называемое «ядро профиля шероховатости» (core roughness depth); это один из параметров шероховатости основной рабочей поверхности, которая останется после срезания самых высоких пиков в период приработки и оказывает влияние на срок службы детали в узлах трения,  $R_{vk}$  — показатель, характеризующий маслоудерживающую способность канавок на поверхности детали.

На рис. 5 отражена графическая интерпретация этих параметров шероховатости поверхности титанового сплава BT3-1 для каждого из проходов с использованием профилограммы и относительной опорной кривой профиля.

Обработка профилограмм и опорных кривых проводилась по стандартной методике; ее результаты представлены в табл. 2. Для наглядного сопоставления группы параметров  $R_k$  в таблице приведены значения высотных параметров  $R_a$  и  $R_{max}$  по ГОСТ 2789-73.

#### 4. Выводы и заключение.

1. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка титанового сплава BT3-1 приводит к формированию поверхностного слоя с развитой сеткой микротрещин. Глубина, ширина и количество микротрещин уменьшаются с увеличением числа проходов и, следовательно, с уменьшением режимов обработки, поскольку на каждом последующем проходе режимы снижаются. Для деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, наличие микротрещин в поверхностном слое недопустимо, таким образом, ЭЭО не может являться методом финишной обработки поверхности, а весь дефектный диффузионный слой с микротрещинами должен быть удален.

В качестве методов удаления дефектного слоя могут применяться шлифование, полирование или

электрохимическая обработка. Для достижения соответствия параметров поверхности детали требованиям чертежа к размерам необходимо предусматривать припуск на операции электроэрозионной обработки с учетом глубины проникновения микротрещин на каждом проходе. Для надежности предпочтительно удалять двукратную величину дефектного слоя, содержащего микротрещины: для деталей, обработанных в 1 проход, необходимо удалять 25 мкм на всей поверхности, подвергнутой ЭЭО. Для 2, 3 и 4 проходов эти значения составят 10, 8 и 4 мкм соответственно.

2. Известен факт неудовлетворительных триботехнических характеристик титана, поэтому его редко используют в узлах трения. Анализ рис. 5 и табл. 2 позволяет сделать вывод о том, что объем удерживаемого масла будет больше всего у деталей, обработанных в 1 и в 3 прохода. Несколько меньше эти показатели будут у второго прохода. После четвертого прохода поверхность будет иметь меньшую шероховатость, а значит, меньшую глубину неровностей, поэтому и маслоудерживающие характеристики будут наименьшими. Таким образом, для работы в гидродинамическом режиме смазки, наиболее пригодна будет деталь, обработанная в 3 прохода, так как очевидно, что детали, обработанные в 1 и 2 прохода, будут иметь большую шероховатость и, как следствие, больший период приработки, а деталь, обработанная в 4 прохода, будет хуже удерживать масло на поверхности. Формирование на деталях из титановых сплавов маслоудерживающего микрорельефа может представлять потенциальный интерес при изготовлении узлов трения, работающих короткий период времени в условиях гидродинамического режима.

В будущих аналогичных исследованиях научно-практический интерес может представлять изучение влияния режимов проволочно-вырезной обработки на морфологию, шероховатость и трещинообразование  $\alpha$ -сплавов и  $\alpha+\beta$  сплавов титана.

#### Библиографический список

1. Yan B. H., Tsai H. C., Huang F. Y. The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45, Issue 2. P. 194–200. DOI: 10.1016/j.jmachtools.2004.07.006.
2. Cui C. Hu B., Zhao L. [et al.]. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development // *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, Issue 3. P. 1684–1691. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.09.011.
3. Nourbakhsh F., Rajurkar K. P., Malshe A. P. [et al.]. Wire electro-discharge machining of titanium alloy // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 5. P. 13–18. DOI: 10.1016/j.procir.2013.01.003.
4. Шейкин С. Е., Рутковский А. В., Росточкий И. Ю. [и др.]. Повышение работоспособности пары трения титан–хирулен // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. Т. 48, № 1. С. 106–110.
5. Jahan M. P., Kakavand P., Alavi F. A comparative study on micro-electro-discharge-machined surface characteristics of Ni-Ti and Ti-6Al-4V with respect to biocompatibility // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 10. P. 232–242. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.051.
6. Xu J-Yu, Chen X.-Sh., Zhang Ch.-Yu. [et al.]. Improved bioactivity of selective laser melting titanium: surface modification with micro-/nano-textured hierarchical topography and bone regeneration performance evaluation // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. Vol. 68. P. 229–240. DOI: 10.1016/j.msec.2016.05.096.

7. Доценко В. В., Ремизов Н. В., Вовкогон В. Б. [и др.]. Возможности высокоинформативных методов исследования для объективизации сращения поясничных позвонков при использовании имплантатов из титана // *Хирургия позвоночника*. 2005. № 4. С. 50–54.

8. The World's Leading Titanium Distributor // *Supra Alloys*. URL: <http://www.supraalloys.com> (дата обращения: 07.02.2020).

9. Haşçalık A., Çaydaş U. Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti–6Al–4V) // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253, Issue 22. P. 9007–9016. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.05.031.

10. Sarkar S., Mitra S., Bhattacharyya B. Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of  $\gamma$ -titanium aluminide alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 159, Issue 3. P. 286–294. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.10.009.

11. Kushwaha A. Jadam T., Datta S. [et al.]. Assessment of Surface Integrity During Electrical Discharge Machining of Titanium Grade 5 Alloys (Ti–6Al–4V) // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 18, Part 7. P. 2477–2485. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.097.

12. Pramanik A., Basak A. K., Prakash C. Understanding the wire electrical discharge machining of Ti6Al4V alloy // *Heliyon*. 2019. Vol. 5, Issue 4. e01473. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01473.

13. Федоров А. А., Блесман А. И., Полонянкин Д. А. [и др.]. Влияние режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию и шероховатость поверхности титанового сплава ВТ3-1 // *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность!* 2017. № 1. С. 62–66.

14. Жданова Ю. Е., Федоров А. А., Блесман А. И. [и др.]. Исследование поверхности образцов титанового сплава ВТ3-1, изготовленных с помощью электроэрозионной обработки // *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность!* 2019. № 1. С. 5–10. DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-5-10.

15. Fedorov A. A., Linovsky A. V., Morgunov A. P. The influence of steel 35 wire EDM parameters on the surface roughness and morphology // *Journal of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14 (2). P. 36–48.

**ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения».

SPIN-код: 4626-9660

AuthorID (РИНЦ): 610896

ORCID: 0000-0002-6681-087X

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

Адрес для переписки: fedot83@gmail.com

**ПОЛОНЯНИН Денис Андреевич**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры физики.

SPIN-код: 8251-9838

AuthorID (РИНЦ): 662910

ORCID: 0000-0001-6799-3105

AuthorID (SCOPUS): 57201867901

ResearcherID: B-3236-2014

**БЛЕСМАН Александр Иосифович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой физики.

SPIN-код: 6809-3460

AuthorID (РИНЦ): 144661

ORCID: 0000-0003-2837-3469

AuthorID (SCOPUS): 11539204200

ResearcherID: B-3079-2014

**БОБКОВ Николай Владимирович**, ассистент кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 5351-7755  
AuthorID (РИНЦ): 819427  
ORCID: 0000-0002-5831-282X  
AuthorID (SCOPUS): 57194829384  
ResearcherID: S-1503-2016

**ЛИНОВСКИЙ Александр Валерьевич**, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 1139-1651  
AuthorID (РИНЦ): 725285  
ORCID: 0000-0003-1487-7893  
AuthorID (SCOPUS): 57195570539  
ResearcherID: A-8090-2014

**БРЕДГАУЭР Юлия Олеговна**, учебный мастер кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 8551-8356  
AuthorID (РИНЦ): 1015524  
ORCID: 0000-0002-0267-8179  
Адрес для переписки: bredjulia9449@gmail.com

**ЖДАНОВА Юлия Евгеньевна**, аспирантка кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 6401-8101  
AuthorID (РИНЦ): 1000408

#### Для цитирования

Федоров А. А., Полонянкин Д. А., Блесман А. И., Бобков Н. В., Линовский А. В., Бредгауэр Ю. О., Жданова Ю. Е. Исследование влияния режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на трещинообразование и морфологию поверхностного слоя титанового сплава ВТЗ-1 // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 23–30. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-23-30.

Статья поступила в редакцию 17.02.2020 г.

© А. А. Федоров, Д. А. Полонянкин, А. И. Блесман,  
Н. В. Бобков, А. В. Линовский, Ю. О. Бредгауэр,  
Ю. Е. Жданова