

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-111-121



## ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА НА ОБРАЗОВАНИЕ НАНО- И МИКРОТРЕЩИН В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

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

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Аннотация.** В статье изложены результаты экспериментального исследования влияния фазового состава на образование микро- и наноразмерных трещин в приповерхностном слое одно( $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Ti)- и двухфазных ( $\alpha+\beta$ )-сплавов титана, подвергнутых проволочно-вырезной электроэрозионной обработке на станке Sodick VZ300L. Выполненный в ходе работы сравнительный анализ трещинообразования в однофазных сплавах титана, недостаточно описанный в литературе, с хорошо изученным образованием трещин в двухфазных титановых сплавах обуславливает актуальность данного исследования. Научная новизна работы заключается в установленном методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии отсутствии качественного и количественно-го влияния фазового состава на трещинообразование в приповерхностном слое титановых сплавов BT3-1, BT5 и BT6. Практическая значимость полученных результатов заключается в определении преимущественной ориентации, а также характерных размеров микротрецчин и магистральных нанотрецчин в приповерхностном слое титановых сплавов BT3-1, BT5 и BT6, подвергнутых электроэрозионной обработке в 1, 2, 3 и 4 прохода, которые составили порядка 20, 12, 7 и 1 мкм соответственно. Полученные результаты являются основой рекомендаций по выбору метода финишной обработки поверхности: удаление дефектного «белого слоя» предлагается производить механической или электрохимической обработкой. Для полного удаления сетки микротрецчин рекомендуется удалять припуск, превышающий глубину проникновения микротрецчин не менее чем в 2 раза: для первого прохода – 40 мкм, для второго – 25 мкм, для третьего – 15 мкм, для четвертого – прохода 2 мкм.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, фазовый состав, нанотрецчины, микротрецчины, приповерхностный слой, электроэрозионная обработка

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90219.

© Федоров А.А., Полонянкин Д.А., Бредгауэр Ю.О., Жданова Ю.Е., Линовский А.В., Бобков Н.В., 2022

### Для цитирования

Влияние фазового состава на образование нано- и микротрецчин в приповерхностном слое титановых сплавов, подвергнутых электроэрозионной обработке / Федоров А.А., Полонянкин Д.А., Бредгауэр Ю.О., Жданова Ю.Е., Линовский А.В., Бобков Н.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 111-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-111-121>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# EFFECT OF A PHASE COMPOSITION ON NANO- AND MICROCRAK FORMATION IN THE NEAR-SURFACE LAYER OF TITANIUM ALLOYS AFTER ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Fedorov A.A., Polonyankin D.A., Bredgauer Iu.O., Zhdanova Iu.E., Linovsky A.V., Bobkov N.V.

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Abstract.** The article presents the experimental study on the effect of a phase composition on micro- and nanocrack formation in the near-surface layer of a single( $\alpha$ -Ti and  $\beta$ -Ti)- and two-phase ( $\alpha+\beta$ ) titanium alloys after wire-cut electrical discharge machining on Sodick VZ300L machine. A comparative analysis performed during the study on cracking in single-phase titanium alloys, insufficiently described in literature, with the well-studied crack formation in two-phase titanium alloys determines the relevance of this study. Scientific novelty of the study consists in the absence of a qualitative and quantitative impact of the phase composition on cracking in the near-surface layer of titanium alloys VT3-1, VT5 and VT6, established by optical, scanning and transmission electron microscopy. Practical relevance of the achieved results lies in establishing the preferred orientation, as well as the characteristic sizes of microcracks and mainline nanocracks in the near-surface layer of VT3-1, VT5 and VT6 titanium alloys after electrical discharge machining in 1, 2, 3 and 4 passes, being 20, 12, 7 and 1  $\mu\text{m}$ , respectively. The achieved results are the basis for recommendations for selecting a surface finishing method: the defective «white layer» is proposed to be removed by mechanical or electrochemical treatment. To completely remove the network of microcracks, it is recommended to take off an allowance exceeding the penetration depth of microcracks by twice or higher: for the first pass is 40  $\mu\text{m}$ , for the second one is 25  $\mu\text{m}$ , for the third one is 15  $\mu\text{m}$  and for the fourth one is 2  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** titanium alloys, phase composition, nanocracks, microcracks, near-surface layer, electrical discharge machining

*This research was funded by the Russian Foundation for Basic Research under Research Project No. 20-38-90219.*

## For citation

Fedorov A.A., Polonyankin D.A., Bredgauer Iu.O., Zhdanova Iu.E., Linovsky A.V., Bobkov N.V. Effect of a Phase Composition on Nano- and Microcrack Formation in the Near-Surface Layer of Titanium Alloys after Electrical Discharge Machining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 111-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-111-121>

## Введение

Повышение физико-механических свойств и функциональных характеристик изделий из сталей и сплавов является актуальной задачей в различных областях промышленности. Общеизвестно, что рабочий поверхностный слой деталей, узлов и агрегатов оказывает значительное влияние на их эксплуатационные характеристики, что особенно важно при производстве ответственных изделий, таких как авиационные двигатели. Воздействие высоких температур, агрессивных сред, а также больших динамических нагрузок определяет соответствующие требования к физико-химическим свойствам материалов и функциональным характеристикам конструкционных элементов, используемых в производстве изделий данного типа. Высокие коррозионная и теплостойкость, отношение прочности к весу обуславливают широкое применение титана и сплавов на его основе в авиа- и ракетостроении, а также автомобильной промышленности и биомедицине. Вместе с тем вы-

сокая вязкость, химическая активность и высокотемпературная прочность наряду с относительно низкой теплопроводностью значительно усложняют обрабатываемость титана лезвийными методами [1], что подчеркивает актуальность применения альтернативных методов обработки титановых сплавов.

Электроэррозионная обработка (ЭЭО) относится к группе нетрадиционных электрофизических методов, обеспечивающих возможность повышения обрабатываемости титановых сплавов благодаря сочетанию следующих возможностей и преимуществ.

Так, методом ЭЭО реализуется высокоточная обработка любых токопроводящих материалов (в том числе сложной геометрической формы) вне зависимости от их физико-механических характеристик. Важной особенностью ЭЭО является возможность бездеформационной обработки тонкостенных заготовок, которая достигается за счет отсутствия непосредственного контакта между электродом-инструментом и деталью и, как следствие, силы резания [2].

К недостаткам ЭЭО титановых сплавов, обладающих различным исходным фазовым составом и микроструктурой, относится образование так называемого дефектного слоя, анализ состояния которого обладает важным прикладным значением [3-17]. Сверхбыстрый нагрев и последующее быстрое охлаждение и, как следствие, действие возникающих напряжений растяжения и сжатия приводят к возникновению сетки микро- и наноразмерных трещин, при этом трещинообразование в приповерхностном слое является неотъемлемой частью процесса ЭЭО и не может быть полностью исключено посредством подбора соответствующего режима обработки.

Как свидетельствует литературный обзор, большинство опубликованных работ посвящено исследованию состояния приповерхностного слоя самого распространенного класса ( $\alpha+\beta$ )-сплавов титана [1, 4, 6, 7, 11-17], тогда как подвергнутые электроэрозионной обработке сплавы однофазного состава остаются менее изученными. Ранее нами рассматривалось влияние режимов проволочно-вырезной ЭЭО на морфологию, шероховатость и глубину залегания микротрещин титанового сплава BT3-1 ( $\beta$ -сплав) [8, 9].

В данной работе представлены результаты исследования влияния проволочной электроэрозионной обработки (ПЭЭО) на образование микро- и наноразмерных трещин в приповерхностном слое одно( $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Ti)- и двухфазных ( $\alpha+\beta$ )-сплавов титана.

### Материалы и методы исследования

В ходе эксперимента использовались титановые сплавы следующих марок: BT3-1 ( $\beta$ -сплав), BT5 ( $\alpha$ -сплав) и BT6 ( $\alpha+\beta$ -сплав). Образцы ви-

де дисков толщиной 5 мм изготавливались из сортового проката вышеуказанных сплавов цилиндрической формы диаметром 42 мм. Проволочно-вырезная обработка проводилась в 1, 2, 3 и 4 прохода на электроэрозионном станке Sodick VZ300L. В качестве диэлектрической жидкости использовалась деионизированная вода. ПЭЭО выполнялась с применением латунной проволоки (Cu 65%, Zn 35%) в качестве электродоинструмента, диаметр проволоки составлял 0,2 мм. В ходе экспериментальной части работы эмпирически подбирались режимы, удовлетворяющие требованию стабильности обработки и обеспечивающие минимальное количество обрывов проволоки (табл. 1).

Для аналитического исследования трещинообразования в приповерхностном слое методами оптической и электронной микроскопии по стандартным методикам изготавливались попечные микрошлифы образцов титановых сплавов. Для анализа микроструктуры и фазового состава образцов методами оптической микроскопии (ОМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) микрошлифы подверглись травлению длительностью ~3 секунды в спиртовом растворе азотной и плавиковой кислот (2% HNO<sub>3</sub> + 2% HF). Исследование микрошлифов после травления методом ОМ проводилось на микроскопе AxioObserver A1 (Carl Zeiss) с увеличением ×500 крат. Анализ микрошлифов также выполнялся методом РЭМ на микроскопе JEOL JCM-5700 с увеличением ×10000 крат. Исследование образцов в виде тонких фольг реализовано методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEOL JEM-2100 с увеличением от ×15000 до ×50000 крат.

Таблица 1. Режимы ПЭЭО обработки титановых сплавов

Table 1. WEDM (wire-cut electrical discharge machining) modes of titanium alloys

Марка сплава	Количество проходов	Длина импульса On, мкс	Пауза между импульсами Off, мкс	Средний ток I <sub>cp</sub> , А	Среднее напряжение U <sub>cp</sub> , В	Сила натяжения проволоки, Н
BT3-1	1	3,5	7	3,2	42	12
	2	1,5	6	2,2	62	16
	3	1	1,2	0,9	30	
	4	1	1,2	0,4	20	
BT5	1	3,5	7	3,2	40	12
	2	1,5	6	2,2	61	16
	3	1	1,2	0,9	30	
	4	1	1,2	0,4	25	
BT6	1	3,5	7	3,2	42	12
	2	1,5	6	2,2	62	16
	3	1	1,2	0,9	30	
	4	1	1,2	0,4	20	

## Результаты и их обсуждение

### 1. Оптическая микроскопия.

На **рис. 1** представлены оптические микрофотографии приповерхностного слоя поперечных микрошлифов титанового сплава ВТ3-1 ( $\beta$ -сплав), подвергнутого ПЭО в 1, 2, 3 и 4 прохода. На оптических микрофотографиях (**рис. 1, а, б**) вблизи обработанных поверхностей хорошо заметен так называемый «белый слой» [17], обозначенный параллельными пунктирными линиями. Значительно меньшая травимость границ зерен и (или) нанокристаллическая структура отличает «белый слой» от остального объема приповерхностного слоя. В ЭЭО приповерхностный слой образцов подвергается воздействию импульсов тока и претерпевает быстрый нагрев и локальное плавление с последующим резким охлаждением и кристаллизацией за счет прокачки диэлектрической жидкости.

При ПЭО в 1 и 2 прохода толщина «белого слоя» является практически одинаковой (см. **рис. 1**,

**а, б**). На оптических микрофотографиях образцов, обработанных в 3 (**рис. 1, в**) и 4 прохода (**рис. 1, г**) «белый слой» не визуализируется методом ОМ, что объясняется более низкими значениями действующей силы тока по сравнению с величиной тока, используемого при обработке в 1 и 2 прохода, и, следовательно, значительно меньшим количеством выделяемого тепла. Следует отметить, что микротрешины в приповерхностном слое образцов титанового сплава ВТ3-1, обработанных в 1, 2, 3 и 4 прохода, также не идентифицируются методом оптической микроскопии. Как свидетельствуют оптические микрофотографии на **рис. 1**, микроструктура приповерхностного слоя образцов после ПЭО типична для игольчатой  $\alpha$ -фазы мартенсита и представлена колониями ламелей, ориентированных преимущественно параллельно друг другу и расположенных внутри крупных первичных  $\beta$ -зерен, достигающих размеров в несколько сотен микрометров.

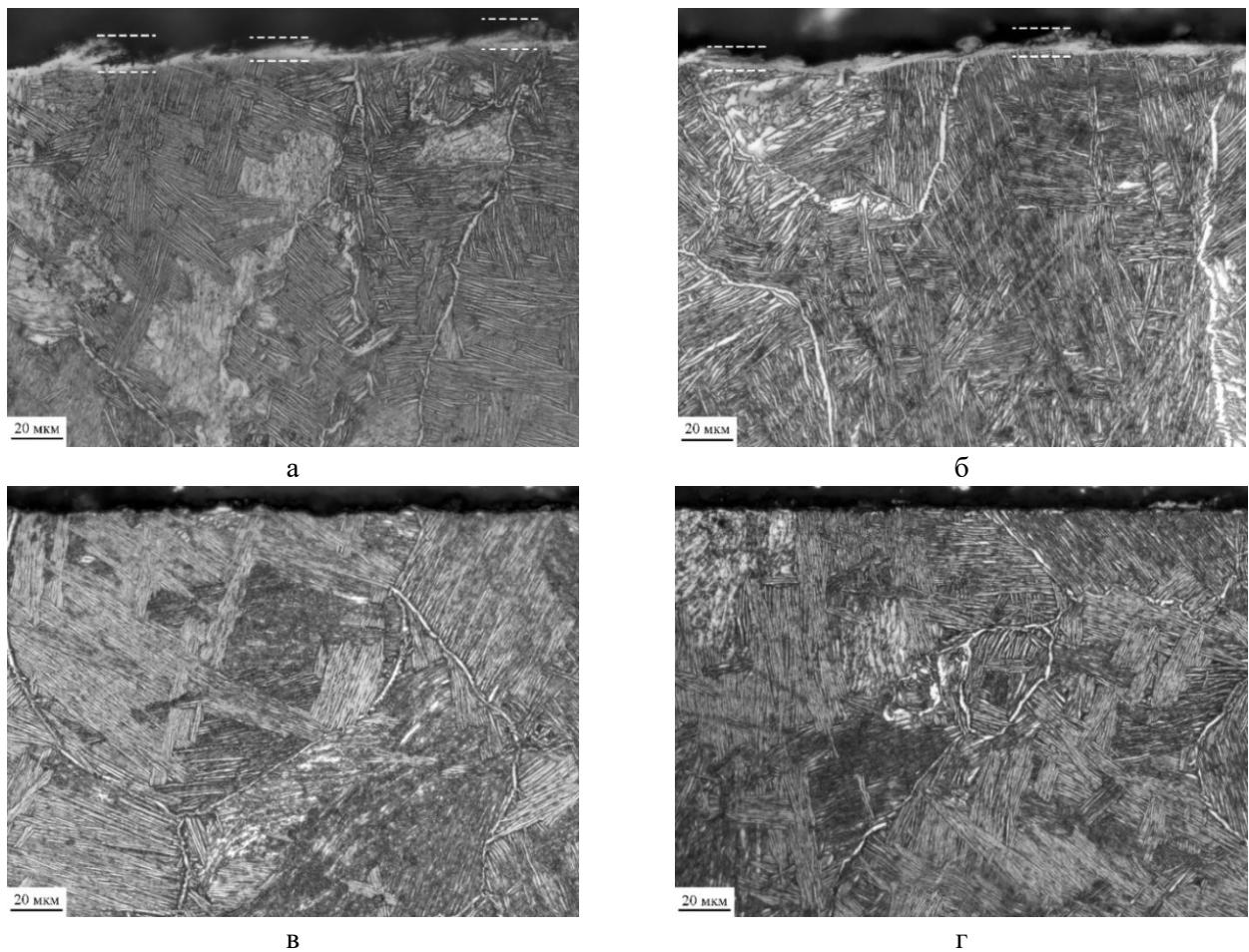
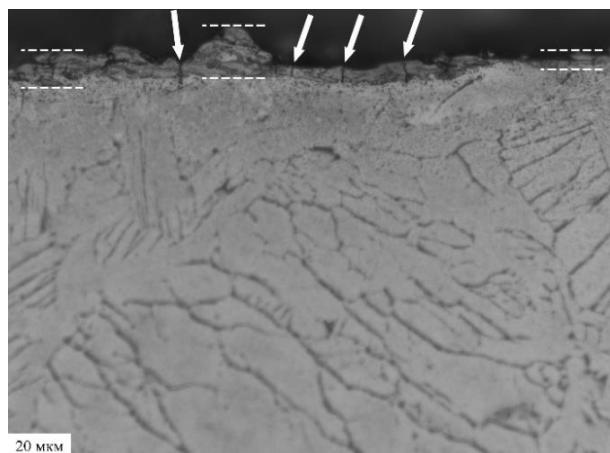


Рис. 1. Оптические микрофотографии поперечных микрошлифов титанового  $\beta$ -сплава ВТ3-1, подвергнутого ПЭО: а – после 1-го прохода; б – после 2-го прохода; в – после 3-го прохода; г – после 4-го прохода  
Fig. 1. Optical micrographs of the cross-sections of  $\beta$ -Ti alloy samples (titanium grade VT3-1) after WEDM (wire-cut electrical discharge machining): a is after the 1st pass; б is after the 2nd pass; в is after the 3rd pass; г is after the 4th pass

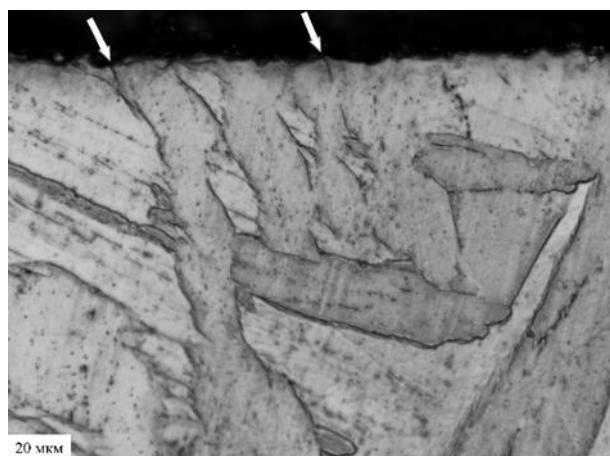
На рис. 2 представлены оптические микрофотографии приповерхностного слоя поперечных микрошлифов титанового сплава BT5 ( $\alpha$ -сплав) после ПЭЭО в 1, 2, 3 и 4 прохода. После обработки в 1 (рис. 2, а) и 2 (рис. 2, б) прохода на оптических микрофотографиях наблюдается «белый слой», содержащий значительное количество микротрещин (указаны стрелками белого цвета), ориентированных преимущественно в направлении нормали к поверхности и в основном пересекающих всю глубину дефектного слоя. Микротрещины обладают различной протяженностью, при этом их длина не превышает 10 мкм. После ПЭЭО в 3 (рис. 2, в) и 4 (рис. 2, г) прохода «белый слой» не визуализируется методом ОМ, тогда как возможность идентификации микротре-

щин данным методом сохраняется. Микроструктура сплава BT5 (твердый раствор алюминия в титане) является однофазной ( $\alpha$ -фаза) и представлена зернами полиэдрической формы.

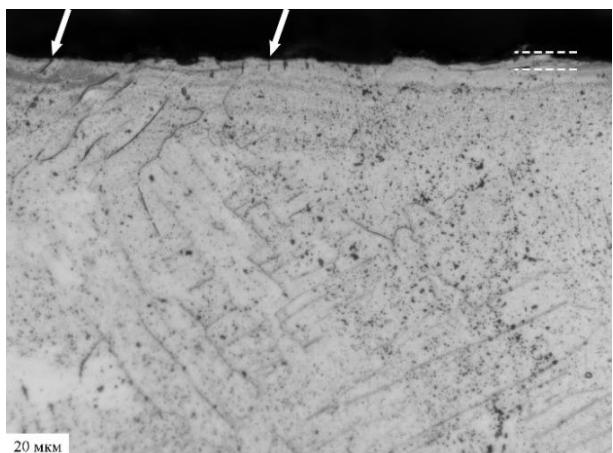
На рис. 3 представлены оптические микрофотографии микрошлифов титанового ( $\alpha+\beta$ )-сплава BT6, подвергнутого ПЭЭО. На оптической микрофотографии образца, обработанного в 1 проход (рис. 3, а), визуализируется сравнительно тонкий дефектный слой, при этом возникновение микротрещин в нем методом ОМ не установлено. После ПЭЭО титанового ( $\alpha+\beta$ )-сплава в 2 (рис. 3, б), 3 (рис. 3, в) и 4 (рис. 3, г) прохода «белый слой», равно как и микротрещины в приповерхностном слое, не визуализируются методом ОМ.



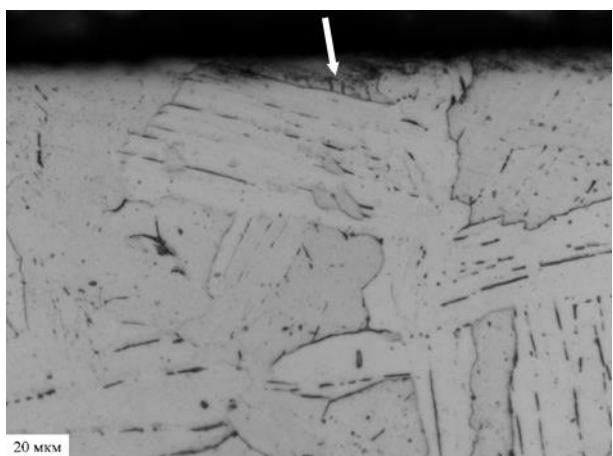
а



б



в



г

Рис. 2. Оптические микрофотографии поперечных микрошлифов титанового  $\alpha$ -сплава BT5, подвергнутого ПЭЭО: а – после 1-го прохода; б – после 2-го прохода; в – после 3-го прохода; г – после 4-го прохода  
Fig. 2. Optical micrographs of the cross-sections of  $\alpha$ -Ti alloy samples (titanium grade VT5) after WEDM: а is after the 1st pass; б is after the 2nd pass; в is after the 3rd pass; г is after the 4th pass

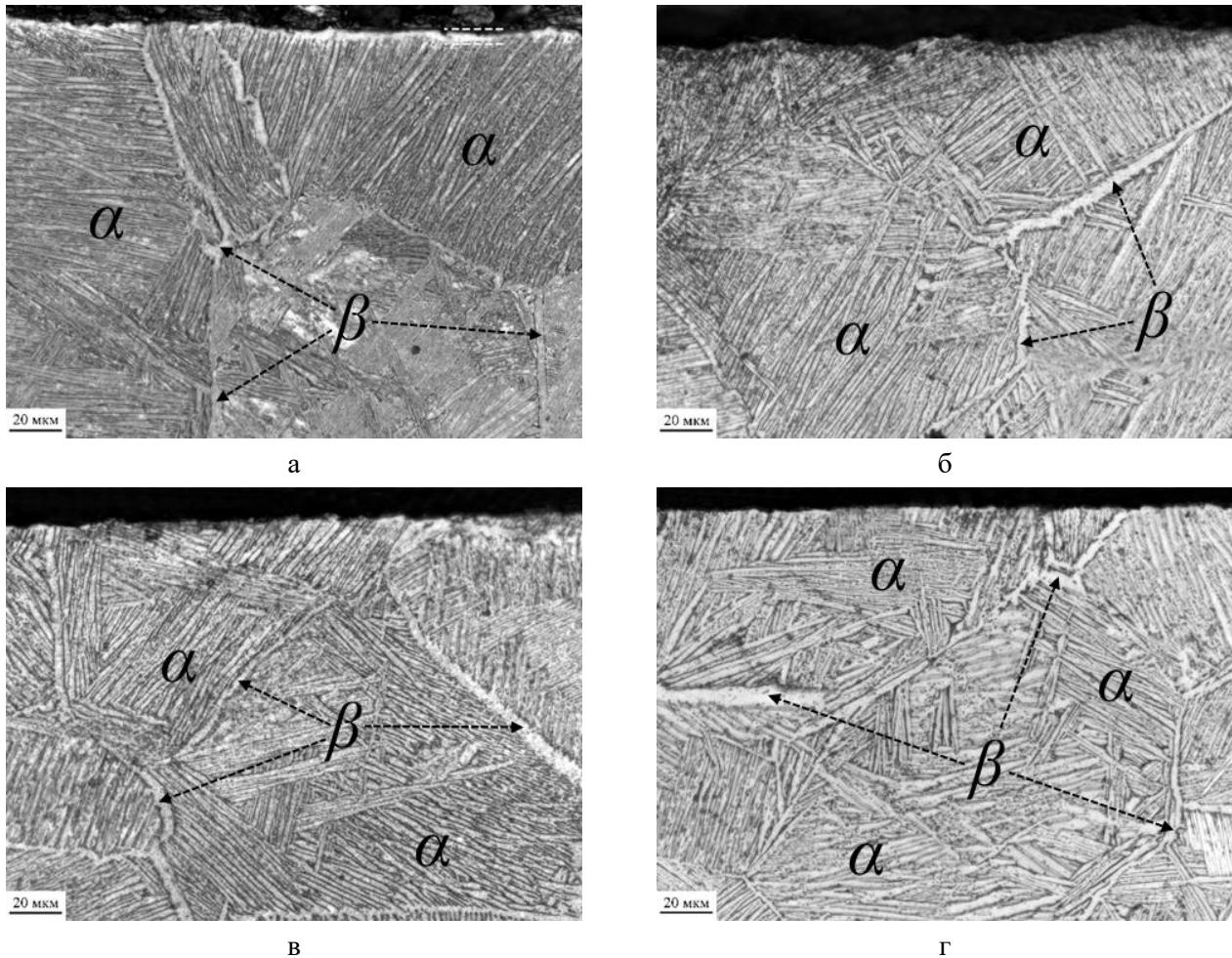


Рис. 3. Оптические микрофотографии поперечных микрошлифов титанового ( $\alpha+\beta$ )-сплава ВТ6, подвергнутого ПЭЭО: а – после 1-го прохода; б – после 2-го прохода; в – после 3-го прохода; г – после 4-го прохода

Fig. 3. Optical micrographs of the cross-sections of ( $\alpha+\beta$ )-Ti alloy samples (titanium grade VT6) after WEDM: a is after the 1st pass; b is after the 2nd pass; c is after the 3rd pass; d is after the 4th pass

Как свидетельствуют оптические микрофотографии (см. рис. 3), микроструктура приповерхностного слоя образцов ВТ6 после ПЭЭО типична для титановых ( $\alpha+\beta$ )-сплавов мартенситного класса и представлена равноосными зернами с ламеллярной структурой. Внутренние области зерен, содержащие пластинчатую  $\alpha$ -фазу и колонии  $\alpha$ -ламелей, отделяются друг от друга межзеренной  $\beta$ -фазой. Размеры зерен варьируются в широком диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров.

Таким образом, метод оптической микроскопии с увеличением  $\times 500$  крат обеспечивает возможность визуализации микротрещин в приповерхностном слое титанового сплава ВТ5 после его ЭЭО в 1, 2, 3 и 4 прохода. Метод оптической микроскопии с увеличением  $\times 500$  крат не обеспечивает возможность визуализации микро-

наноразмерных трещин в дефектном приповерхностном слое титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ6, что исключает возможность его применения для анализа трещинообразования после электроэрозионной обработки сплавов этих марок и обуславливает необходимость использования альтернативных электронно-микроскопических методов исследования.

#### 2. Растворная электронная микроскопия.

Поперечные микрошлифы образцов титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 после ПЭЭО также анализировались методом растворной электронной микроскопии.

Методом РЭМ не установлены характерные различия в ориентации, ширине и глубине проникновения микротрещин в приповерхностный слой образцов титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 после ПЭЭО в 1, 2 и 3 прохода. Наибольшее

количество микротрещин обнаруживается при анализе микрошлифов образцов исследуемых сплавов, обработанных в 1 проход. Значения силы тока и напряжения, используемые в этом режиме, обеспечивают максимальную производительность обработки, при этом величина возникающих в приповерхностном слое термонапряженй превышает его предел прочности, способствуя образованию развитой сетки микротрещин. После первого прохода ПЭЭО максимальная длина микротрещин не превышает 20 мкм, а ширина достигает порядка 3 мкм, что свидетельствует о наибольшей интенсивности трещинообразования в приповерхностном слое титановых сплавов, подвергнутых электроэрозионной обработке в 1 проход. По мере увеличения числа проходов ПЭЭО уменьшаются размеры и количество микротрещин в приповерхностном слое титановых сплавов BT3-1, BT5 и BT6, при этом

сохраняется их преимущественная ориентация в направлении нормали к обработанной поверхности. По данным РЭМ после 2-го и 3-го проходов не были обнаружены микротрещины длиной более 12 и 7 мкм соответственно.

После 4-го прохода ПЭЭО в приповерхностном слое титановых сплавов BT3-1, BT5 и BT6 образуется микро- и нанотрещины, которые визуализируются методом РЭМ недостаточно хорошо даже при увеличении 10,000 крат (**рис. 4**).

После 4-го прохода ПЭЭО наибольшее количество трещин зафиксировано в приповерхностном слое титанового сплава BT3-1 (**рис. 4, а**), тогда как микротрещины наибольшей длины образуются в приповерхностном слое титанового сплава BT5 (**рис. 4, б**). Как и после ПЭЭО в 1, 2 и 3 прохода, после 4-го прохода трещины преимущественно ориентированы в направлении нормали к обработанной поверхности.

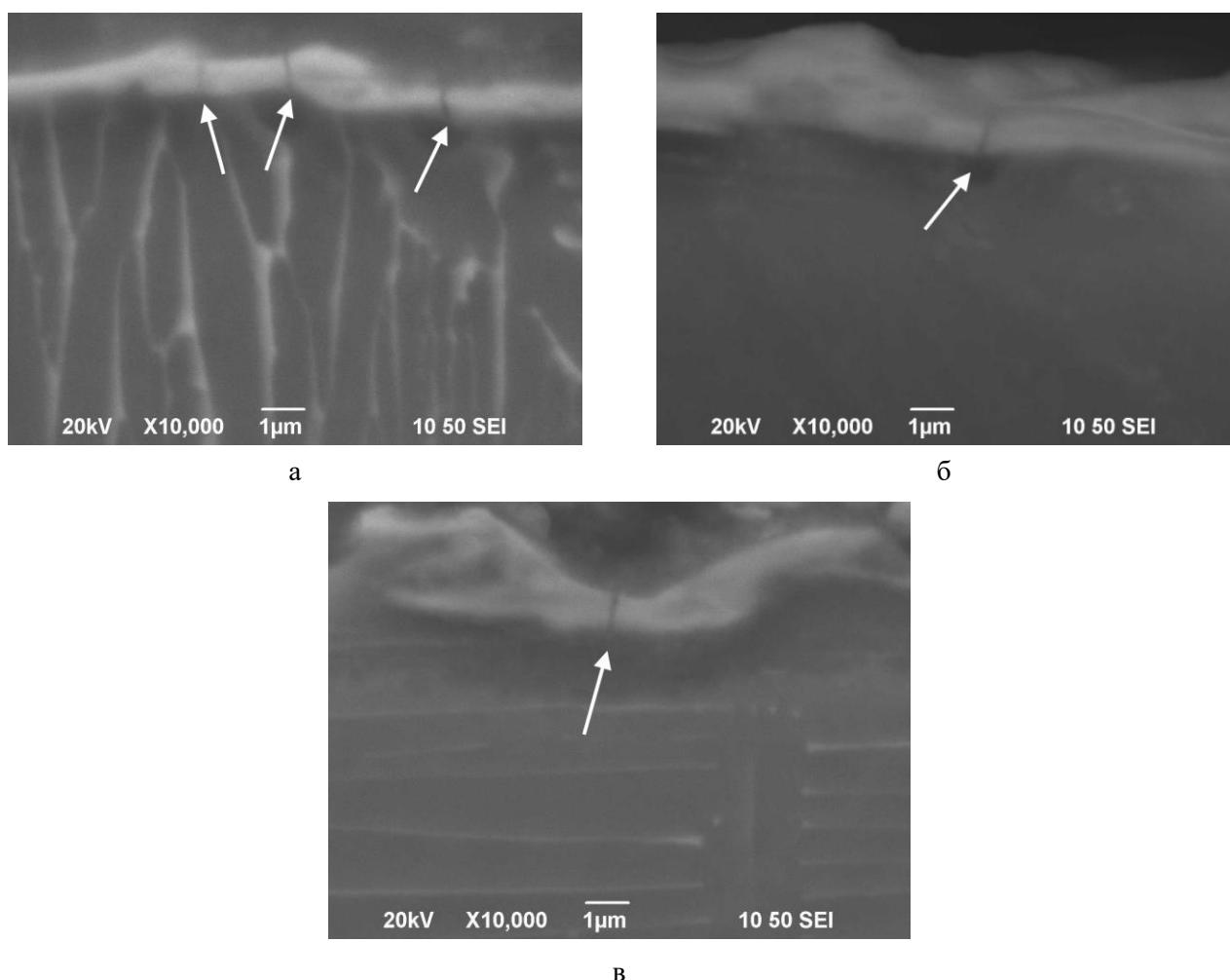


Рис. 4. РЭМ-микрофотографии поперечных микрошлифов титановых сплавов после 4-го прохода ПЭЭО:  
а – ВТ3-1; б – ВТ5; в – ВТ6

Fig. 4. SEM micrographs of the cross-sections of Ti alloys after the 4th pass of WEDM: a is VT3-1; б is VT5; в is VT6

Сложность визуализации трещин субмикронных размеров, образующихся в приповерхностном слое титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6, подвергнутых ПЭЭО в 4 прохода, обуславливает целесообразность их анализа с применением метода ПЭМ.

3. Просвечивающая электронная микроскопия.

На рис. 5 представлены светлопольные ПЭМ-изображения участков приповерхностного слоя титановых сплавов, подвергнутых ПЭЭО в 4 прохода.

Как свидетельствует рис. 5, а, после 4-го прохода ПЭЭО приповерхностный слой титанового сплава ВТ3-1 содержит ориентированную перпендикулярно поверхности сужающуюся магистральную нанотрещину длиной ~700 нм и шириной, не превышающей 90 нм практически на всем своем протяжении. На рис. 5, а также наблюдается вторичная нанотрещина, являющаяся ответвлением от первичной нанотрещины. Длина и ширина вторичной нанотрещины значительно меньше, чем соответствующие размеры первичной магистральной нанотрещины.

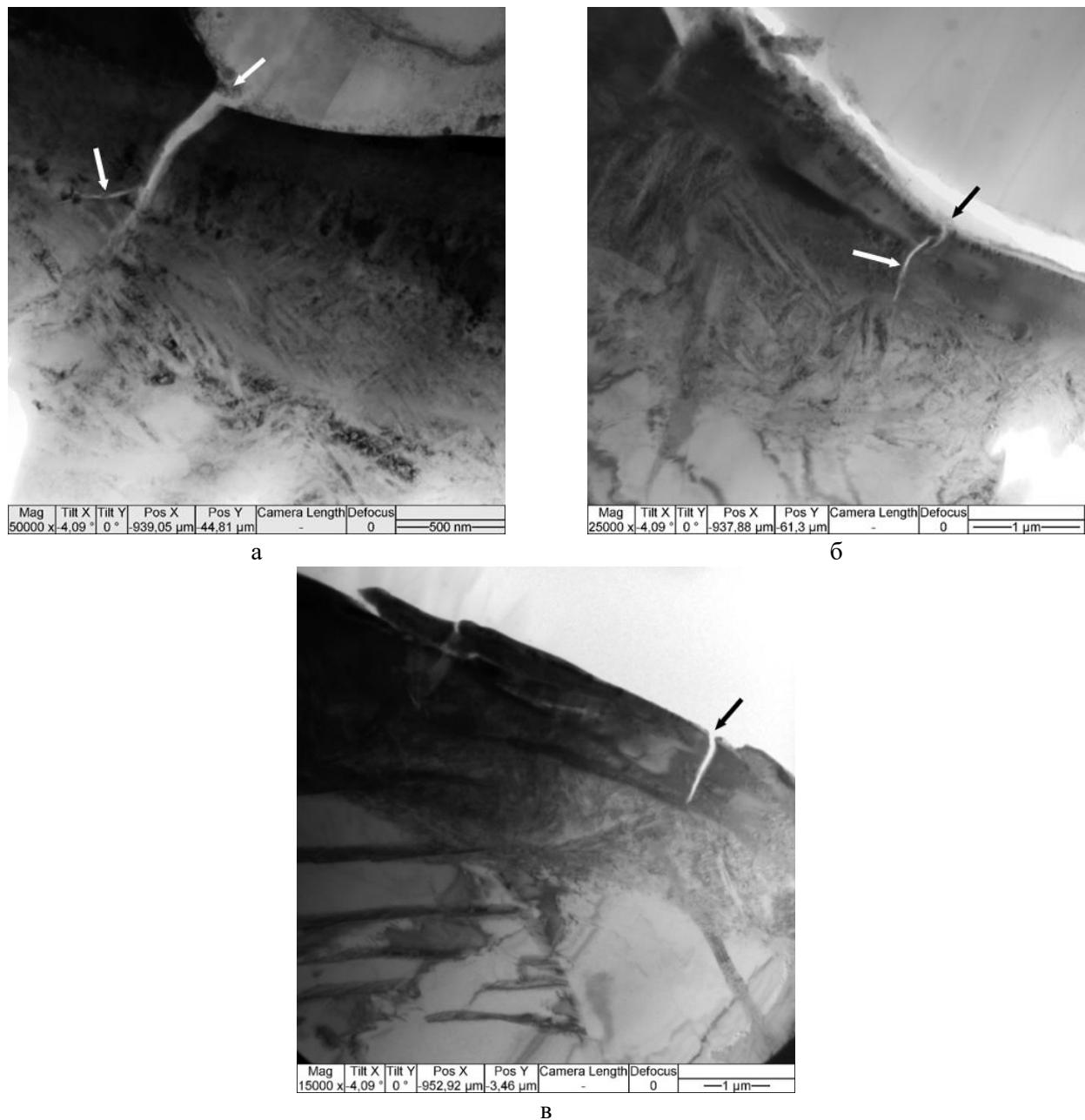


Рис. 5. ПЭМ-микрофотографии титановых сплавов ВТ3-1 (а), ВТ5 (б) и ВТ6 (в) после 4-го прохода ПЭЭО (светлопольные изображения)

Fig. 5. TEM micrographs of Ti alloys VT3-1 (a), VT5 (b) and VT6 (v) after the 4th pass of WEDM (bright-field images)

**Рис. 5, 6** демонстрирует ветвление нанотрешин в приповерхностном дефектном слое сплава ВТ5, обработанного ПЭЭО в 4 прохода: в середине первичной нанотрешины длиной порядка 250 нм и не превышающей 80 нм шириной образуется значительно более протяженная (~750 нм) вторичная нанотрешина. Первичная и вторичная нанотрешинны ориентированы перпендикулярно обработанной поверхности и обладают сопоставимой шириной.

Как свидетельствует **рис. 5, в**, после 4-го прохода ПЭЭО приповерхностный слой титанового сплава ВТ6 содержит ориентированную перпендикулярно поверхности сужающуюся магистральную нанотрешину длиной ~1 мкм и шириной, не превышающей 100 нм практически на всем своем протяжении.

Установленные методом ПЭМ результаты подтверждают данные, полученные методами ОМ и РЭМ: магистральные нанотрешинны в приповерхностном слое сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 ориентированы перпендикулярно обработанной поверхности, а их длина не превышает характерные размеры дефектного слоя.

### Заключение

Полученные в ходе выполнения работы результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Приповерхностный слой подвергнутых электроэрозионной обработке титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 подвержен образованию микро- и нанотрешин независимо от фазового состава и режима ПЭЭО (номера прохода).

2. Метод оптической микроскопии обеспечивает возможность визуализации микротрешин в приповерхностном слое титанового сплава ВТ5 после его ПЭЭО в 1, 2, 3 и 4 прохода.

3. Методом РЭМ не установлены характерные различия в ориентации, ширине и глубине проникновения микротрешин в дефектный приповерхностный слой титановых сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 после ПЭЭО в 1, 2 и 3 прохода, составляющий не более 20, 12 и 7 мкм соответственно.

4. Установленные методом ПЭМ результаты подтверждают данные, полученные методами ОМ и РЭМ: магистральные нанотрешинны в приповерхностном слое сплавов ВТ3-1, ВТ5 и ВТ6 после ПЭЭО в 4 прохода ориентированы перпендикулярно поверхности обработки, а их протяженность не превышает характерных размеров дефектного слоя, который составил порядка 1 мкм.

Удаление дефектного слоя, содержащего сетку микротрешин, может быть осуществлено шлифованием, полированием или электрохимической обработкой. При этом рекомендуется удалять припуск, превышающий глубину проникновения микротрешин не менее чем в 2 раза. Для первого прохода – 40 мкм, для второго – 25 мкм, для третьего – 15 мкм и для четвертого – 2 мкм.

### Список источников

1. Karkalos N.E., Galanis N.I., Markopoulos A.P. Surface roughness prediction for the milling of Ti-6Al-4V ELI alloy with the use of statistical and soft computing techniques // Measurement. 2016. Vol. 90. P. 25-35. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.04.039.
2. Шлыков Е.С., Абляз Т.Р., Муратов К.Р. Обеспечение точности проволочно-вырезной электроэрозионной обработки изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 3. С. 6-17. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-6-17.
3. The World's Leading Titanium Distributor // Supra Alloys. URL: <http://www.supralalloys.com> (дата обращения: 07.02.2020).
4. HaCalik A., Caydas U. Electrical discharge machining of titanium alloy // Appl. Surf. Sci. 2007. T. 253. C. 9007-9016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.05.031>
5. 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.jmatprot.2004.10.009.
6. 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: Proc. 2019. Vol. 18, Part 7. P. 2477-2485. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.097.
7. 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.2019.01473.
8. Влияние режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию и шероховатость поверхности титанового сплава ВТ3-1 / А.А. Федоров, А.И. Блесман, Д.А. Полонянкин [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2017. № 1. С. 62-66.
9. Исследование поверхности образцов титанового сплава ВТ3-1, изготовленных с помощью электроэрозионной обработки / Ю.Е. Жданова, А.А. Федоров, А.И. Блесман [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2019. № 1. С. 5-10. DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-5-10.
10. Исследование влияния режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на трещинообразование и морфологию поверхностного

- слоя титанового сплава ВТ3-1 / А.А. Федоров, Д.А. Полонянкин, А.И. Блесман [и др.] // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 23-30. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-23-30.
11. Soo S.L., Antar M.T., Aspinwall D.K. [et al.]. The effect of wire electrical discharge machining on the fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aerospace alloy // Procedia CIRP. 2013. Vol. 6. P. 215-219. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.043.
12. Tonday H.R., Tigga A.M. Characterization of surface integrity of Ti6Al4V alloy machined by using wire electrical discharge machining process // Materials Today: Proc. 2019. Vol. 11, Part 2. P. A8-A14. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.049.
13. Kumar R., Roy S., Gunjan P. [et al.]. Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 20. P. 358-364. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.052.
14. Patnaik P., Datta S., Mahapatra S.S. WEDM performance of Ti-6Al-4V: emphasis on multi-cut strategy, effects of electrode wire // Materials Today: Proc. 2019. T. 18, Part 7. P. 4102-4110. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.354.
15. Jain S.P., Ravindra H.V., Ugrasen G. [et al.]. Study of surface roughness and AE signals while machining titanium grade-2 material using ANN in WEDM // Materials Today: Proc. 2017. Vol. 4, Issue 9. P. 9557-9560. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.223.
16. Arikatla S.P., Mannan K.T., Krishnaiah A. Surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of titanium alloy during main cut and trim cuts // Materials Today: Proc. 2017. Vol. 4, Issue 2, Part A. P. 1500-1509. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.01.172.
17. Mouralova K., Kovar J., Klakurkova L. [et al.]. Analysis of surface and subsurface layers after WEDM for Ti-6Al-4V with heat treatment // Measurement. 2018. Vol. 116. P. 556-564. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.11.053.
5. 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, 159, 3, 286-294 (2005). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.10.009
6. 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: Proc., 18, 7, 2477-2485 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.097
7. Pramanik A., Basak A.K., Prakash C. Understanding the wire electrical discharge machining of Ti6Al4V alloy. Heliyon, 5, 4, e01473 (2019). DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01473
8. Fedorov A.A., Blesman A.I., Polonyankin D.A. et al. Influence of modes of wire-cut EDM on the morphology and roughness of the surface of titanium alloy VT3-1. Rossiya moloda: peredovye tekhnologii – v promyshlennost [Russia is young: advanced technologies for industry], 2017, no. 1, pp. 62-66. (In Russ.)
9. Zhdanova Yu.E., Fedorov A.A., Blesman A.I. et al. Study on the surface of samples of titanium alloy VT3-1 manufactured using electroerosion machining. Rossiya moloda: peredovye tekhnologii – v promyshlennost [Russia is young: advanced technologies for industry], 2019, no. 1, pp. 5-10. (In Russ.) DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-5-10
10. Fedorov A.A., Polonyankin D.A., Blesman A.I. et al. Study on the influence of wire-cut EDM modes on crack formation and morphology of the surface layer of titanium alloy VT3-1. Omskiy nauchnyi vestnik [Omsk Scientific Bulletin], 2020, no. 2 (170), pp. 23-30. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-23-30
11. Soo S.L., Antar M.T., Aspinwall D.K. et al. The effect of wire electrical discharge machining on the fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aerospace alloy. Procedia CIRP, 6, 215-219 (2013). DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.043
12. Tonday H.R., Tigga A.M. Characterization of surface integrity of Ti6Al4V alloy machined by using wire electrical discharge machining process. Materials Today: Proc., 11, 2, A8-A14 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.049
13. Kumar R., Roy S., Gunjan P. et al. Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process. Procedia Manufacturing, 20, 358-364 (2018). DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.052
14. Patnaik P., Datta S., Mahapatra S.S. WEDM performance of Ti-6Al-4V: emphasis on multi-cut strategy, effects of electrode wire. Materials Today: Proc., 18, 7, 4102-4110 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.354
15. Jain S.P., Ravindra H.V., Ugrasen G. et al. Study of surface roughness and AE signals while machining titanium grade-2 material using ANN in WEDM. Materials Today: Proc., 4, 9, 9557-9560 (2017). DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.223

### References

1. Karkalos N.E., Galanis N I., Markopoulos A.P. Surface roughness prediction for the milling of Ti-6Al-4V ELI alloy with the use of statistical and soft computing techniques. Measurement, 90, 25-35 (2016). DOI: 10.1016/j.measurement.2016.04.039
2. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Muratov K.R. Ensuring the accuracy of wire-cutting EDM processing of products made of hard-to-handle materials. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) [Metal Working and Material Science], 2020, vol. 22, no. 3, pp. 6-17. (In Russ.) DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-6-17
3. The world's leading titanium distributor. Supra Alloys. Available at: <http://www.supralloys.com> (Accessed on February 07, 2020).
4. Hascalik A., Caydas U. Electrical discharge machining of titanium alloy. Appl. Surf. Sci., 253, 9007-9016 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.05.031>
5. 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, 159, 3, 286-294 (2005). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.10.009
6. 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: Proc., 18, 7, 2477-2485 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.097
7. Pramanik A., Basak A.K., Prakash C. Understanding the wire electrical discharge machining of Ti6Al4V alloy. Heliyon, 5, 4, e01473 (2019). DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01473
8. Fedorov A.A., Blesman A.I., Polonyankin D.A. et al. Influence of modes of wire-cut EDM on the morphology and roughness of the surface of titanium alloy VT3-1. Rossiya moloda: peredovye tekhnologii – v promyshlennost [Russia is young: advanced technologies for industry], 2017, no. 1, pp. 62-66. (In Russ.)
9. Zhdanova Yu.E., Fedorov A.A., Blesman A.I. et al. Study on the surface of samples of titanium alloy VT3-1 manufactured using electroerosion machining. Rossiya moloda: peredovye tekhnologii – v promyshlennost [Russia is young: advanced technologies for industry], 2019, no. 1, pp. 5-10. (In Russ.) DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-5-10
10. Fedorov A.A., Polonyankin D.A., Blesman A.I. et al. Study on the influence of wire-cut EDM modes on crack formation and morphology of the surface layer of titanium alloy VT3-1. Omskiy nauchnyi vestnik [Omsk Scientific Bulletin], 2020, no. 2 (170), pp. 23-30. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-23-30
11. Soo S.L., Antar M.T., Aspinwall D.K. et al. The effect of wire electrical discharge machining on the fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo aerospace alloy. Procedia CIRP, 6, 215-219 (2013). DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.043
12. Tonday H.R., Tigga A.M. Characterization of surface integrity of Ti6Al4V alloy machined by using wire electrical discharge machining process. Materials Today: Proc., 11, 2, A8-A14 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.03.049
13. Kumar R., Roy S., Gunjan P. et al. Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process. Procedia Manufacturing, 20, 358-364 (2018). DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.052
14. Patnaik P., Datta S., Mahapatra S.S. WEDM performance of Ti-6Al-4V: emphasis on multi-cut strategy, effects of electrode wire. Materials Today: Proc., 18, 7, 4102-4110 (2019). DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.354
15. Jain S.P., Ravindra H.V., Ugrasen G. et al. Study of surface roughness and AE signals while machining titanium grade-2 material using ANN in WEDM. Materials Today: Proc., 4, 9, 9557-9560 (2017). DOI: 10.1016/j.matpr.2017.06.223

16. Arikatla S.P., Mannan K.T., Krishnaiah A. Surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of titanium alloy during main cut and trim cuts. *Materials Today: Proc.*, 4, 2, A, 1500-1509 (2017). DOI: 10.1016/j.matpr.2017.01.172
17. Mouralova K., Kovar J., Klakurkova L. et al. Analysis of surface and subsurface layers after WEDM for Ti-6Al-4V with heat treatment. *Measurement*, 116, 556-564 (2018). DOI: 10.1016/j.measurement.2017.11.053

Поступила 06.07.2022; принята к публикации 08.08.2022; опубликована 26.09.2022  
Submitted 06/07/2022; revised 08/08/2022; published 26/09/2022

**Федоров Алексей Аркадьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.  
Email: fedot83@gmail.com. ORCID 0000-0002-6681-087X

**Полонянкин Денис Андреевич** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Физика», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.  
Email: polonjan@mail.ru. ORCID 0000-0001-6799-3105

**Бредгауэр Юлия Олеговна** – ассистент кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.  
Email: bredjulia9449@gmail.com. ORCID 0000-0002-0267-8179

**Жданова Юлия Евгеньевна** – аспирант кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.  
Email: gdanovajulia@mail.ru. ORCID 0000-0002-9129-1450

**Линовский Александр Валерьевич** – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.  
Email: alexlinovsky@mail.ru. ORCID 0000-0003-1487-7893

**Бобков Николай Владимирович** – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Омский государственный технический университет, Омск, Россия.  
Email: bobkov-n@mail.ru. ORCID 0000-0002-5831-282X

**Alexey A. Fedorov** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.  
Email: fedot83@gmail.com. ORCID 0000-0002-6681-087X

**Denis A. Polonyankin** – PhD (Pedagogy), Associate Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.  
Email: polonjan@mail.ru. ORCID 0000-0001-6799-3105

**Iuliia O. Bredgauer** – Teaching Assistant of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.  
Email: bredjulia9449@gmail.com. ORCID 0000-0002-0267-8179

**Iuliia E. Zhdanova** – postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.  
Email: gdanovajulia@mail.ru. ORCID 0000-0002-9129-1450

**Alexander V. Linovsky** – Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.  
Email: alexlinovsky@mail.ru. ORCID 0000-0003-1487-7893

**Nikolay V. Bobkov** – Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Omsk State Technical University, Omsk, Russia.  
Email: bobkov-n@mail.ru. ORCID 0000-0002-5831-282X