

## ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ В ПРОЦЕССЕ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В работе исследована шероховатость титановых  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  и  $\beta$  сплавов, полученная проволочной электроэрозионной обработкой (ЭЭО) латунным электродом-инструментом в дистиллированной воде. Цель статьи — установить взаимосвязь электрических параметров проволочной электроэрозионной обработки с шероховатостью поверхностного слоя  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  и  $\beta$  титановых сплавов, в особенности с группой параметров  $R_k$ . Методом контактной профилометрии установлено, что фазовый состав титановых сплавов существенно влияет на высотные параметры шероховатости обработанных поверхностей, включая параметры группы  $R_k$ , по которым оцениваются функциональные свойства поверхностей — герметичность и износостойкость.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, титановый сплав, шероховатость, маслоудерживающая способность.

**Введение.** Титан широко распространен в авиационной, ракетно-космической, химической и медицинской промышленности благодаря своей превосходной коррозионной стойкости, жаропрочности, высокой удельной прочности и криогенным свойствам [1–7]. Лезвийная обработка титана вызывает затруднения вследствие его высокой вязкости и низкой теплопроводности, что приводит к большим тепловыделениям в процессе резания и делает титан и его сплавы трудно обрабатываемыми [8].

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) титана и его сплавов в ряде случаев является хорошей альтернативой, имеющей ряд преимуществ, таких как обработка сверхтвердых материалов без потери в производительности; изготовление узких прорезей и щелей (от 0,05 мм), недоступные для лезвийных методов; бездеформационная обработка жестких и тонкостенных деталей.

Влиянию режимов ЭЭО на производительность и качество поверхностного слоя титановых сплавов посвящено значительное количество работ [9–23], в которых установлено влияние пикового тока, длительности импульса, давления прокачки и натяжения проволоки на шероховатость поверхности. Однако подавляющее количество полученных в них данных связано с исследованиями двухфазных  $\alpha+\beta$  сплавов. Имеется крайне ограниченное количество научных работ, связанных

с исследованием шероховатости однофазных сплавов после ЭЭО, а влияние режимов и числа проходов на параметры  $R_{pk}$ ,  $R_k$  и  $R_{vk}$  практически не изучены, что обуславливает новизну и актуальность данной работы.

**1. Теория.** Морфология поверхности, формируемая в процессе электроэрозионной обработки, принципиально отличается от морфологии, получаемой лезвийными методами (точение, строгание, фрезерование, шлифование и др.) (рис. 1). Эти различия вызваны особенностями удаления припуска в каждом из процессов. Например, в процессе точения удаление припуска сопровождается пластической деформацией поверхностного слоя и его интенсивным нагревом вследствие трения. Как видно из рис. 1а, поверхность стали, полученная точением, образована канавками, расположенными параллельно направлению обработки. При ЭЭО удаление слоя материала основано на эрозионном эффекте от разрядов, протекающих между электродами в жидком диэлектрике. Последовательные электрические разряды происходят на высоких частотах, вызывая плавление и испарение металла и его последующее резкое охлаждение. В результате каждого разряда образуется крошечный кратер и на инструменте, и на поверхности заготовки. Этот процесс создает поверхность, образованную кратерами (рис. 1б).

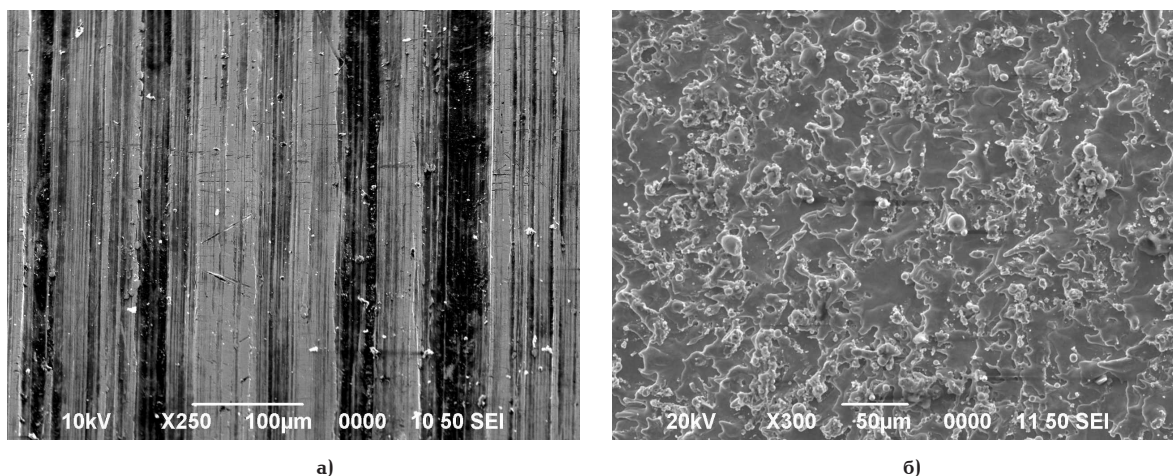


Рис. 1. Морфология поверхности: а) стали 12Х18Н10Т после точения,  $\times 250$ ;  
б) титанового сплава ВТ3-1 после ЭЭО,  $\times 300$

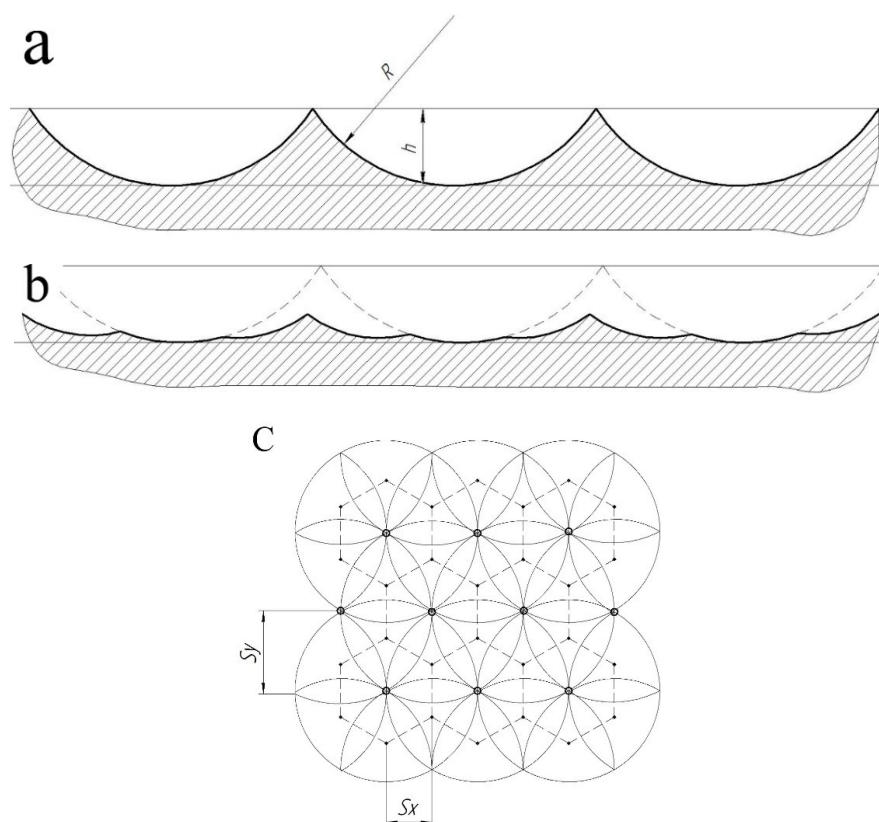


Рис. 2. Теоретическая схема формирования шероховатости в процессе ЭЭО:  
а) профиль поверхности после первого прохода;  
б) профиль поверхности после второго прохода;  
с) морфология поверхностного слоя

Шероховатость в процессе ЭЭО формируется как совокупность эрозионных кратеров и может быть описана схемой, показанной на рис. 2.

Возможно также наличие шлама на поверхности, который является нормальным для ЭЭО, но может вызвать отличия от теоретической схемы, вызывая нехарактерные максимумы на профилограммах.

Теоретически материал удаляется в результате ЭЭО следующим образом: после 1-го прохода поверхность образована рядом кратеров определенного радиуса и глубины (рис. 2а), после второго прохода материал удаляется с вершин лунок, образованных после первого прохода, что приводит к уменьшению величины неровностей (рис. 2б).

При третьем и последующих проходах материал удаляется по той же схеме. Общий вид поверхности должен представлять собой совокупность пересекающихся кратеров, ограниченных выступами (рис. 2с).

**2. Методика и аппаратура экспериментального исследования.** Образцами для экспериментальных исследований являлись титановые прутки диаметром 42 мм марок ВТ3–1 ( $\beta$ -сплав), ВТ5 ( $\alpha$ -сплав) и ВТ6 ( $\alpha + \beta$ -сплав), от которых отрезались диски толщиной 5 мм. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка осуществлялась на электроэрозионном станке SODICK VZ300L в 1, 2, 3 и 4 прохода с последующим измерением шероховатости

Режимы обработки титановых сплавов

| Сплав<br>№ прохода | On,<br>мкс | Off,<br>мкс | ЕРА | $I_{cp}$ , А | $U_{cp}$ , В | Сила натяжения<br>проволоки, Н |
|--------------------|------------|-------------|-----|--------------|--------------|--------------------------------|
| BT3–1<br>1 проход  | 3,5        | 7           | –4  | 3,2          | 42           | 12                             |
| BT3–1<br>2 проход  | 1,5        | 6           | –4  | 2,1          | 62           | 16                             |
| BT3–1<br>3 проход  | 1          | 1,2         | –4  | 0,9          | 30           | 16                             |
| BT3–1<br>4 проход  | 1          | 1,2         | –4  | 0,4          | 20           | 16                             |
| BT5<br>1 проход    | 3,5        | 7           | –4  | 3,1          | 40           | 12                             |
| BT5<br>2 проход    | 1,5        | 6           | –4  | 2,2          | 61           | 16                             |
| BT5<br>3 проход    | 1          | 1,2         | –4  | 0,9          | 30           | 16                             |
| BT5<br>4 проход    | 1          | 1,2         | –4  | 0,4          | 25           | 16                             |
| BT6<br>1 проход    | 3,5        | 7           | –4  | 3            | 42           | 12                             |
| BT6<br>2 проход    | 1,5        | 6           | –4  | 2,1          | 62           | 16                             |
| BT6<br>3 проход    | 1          | 1,2         | –4  | 0,9          | 30           | 16                             |
| BT6<br>4 проход    | 1          | 1,2         | –4  | 0,4          | 20           | 16                             |

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

Таблица 2

Шероховатость поверхности титанового сплава BT3–1 ( $\beta$ -сплав)

|                    | 1 проход | 2 проход | 3 проход | 4 проход |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|
| $R_a$ , мкм        | 2,793    | 2,546    | 0,747    | 0,288    |
| $R_{max}$ ,<br>мкм | 19,1     | 16,870   | 6,718    | 2,207    |
| $R_{pk}$ , мкм     | 3,486    | 3,472    | 0,989    | 0,472    |
| $R_k$ , мкм        | 9,359    | 8,774    | 2,284    | 0,971    |
| $R_{vk}$ , мкм     | 2,281    | 1,464    | 0,998    | 0,319    |
| $M_{z1}$ , %       | 10,3     | 10,4     | 9,8      | 6,7      |
| $M_{z2}$ , %       | 91,3     | 93,1     | 86,6     | 89,4     |

поверхности. Для исследования было изготовлено 12 образцов. Диэлектриком в процессе обработки являлась дистиллированная вода с сопротивлением 55–65 кОм. Проволочным электродом-инструментом являлась твердая латунная проволока диаметром 0,2 мм (Cu 60 %, Zn 40 %). Стабильные режимы обработки с минимальным количеством обрывов проволоки, удовлетворяющие критерию максималь-

ной производительности, были подобраны экспериментально (табл. 1).

Исследование шероховатости обработанной поверхности, в том числе параметров  $R_{pk}$ ,  $R_k$  и  $R_{vk}$  в соответствии со стандартом DIN4776 (ISO 13565-1:1998) осуществляли контактным профилометром TR-220 (TimeGroup, КНР) при базовых длинах 0,8 и 0,25 мм. Каждый образец был измерен 5 раз, да-

Шероховатость поверхности титанового сплава ВТ5 ( $\alpha$ -сплав)

|                   | 1 проход | 2 проход | 3 проход | 4 проход |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| $R_{a'}$ мкм      | 2,606    | 2,666    | 0,775    | 0,327    |
| $R_{max'}$<br>мкм | 18,670   | 19,62    | 5,742    | 2,382    |
| $R_{pk'}$ мкм     | 3,419    | 4,312    | 0,929    | 0,443    |
| $R_{k'}$ мкм      | 8,402    | 8,636    | 2,583    | 1,072    |
| $R_{vk'}$ мкм     | 3,120    | 2,040    | 0,837    | 0,453    |
| $M_{r1'}$ %       | 10,6     | 12,6     | 9,2      | 7,2      |
| $M_{r2'}$ %       | 91,0     | 92,7     | 91,0     | 87,6     |

Таблица 4

Шероховатость поверхности титанового сплава ВТ6 ( $\alpha+\beta$ -сплав)

|                   | 1 проход | 2 проход | 3 проход | 4 проход |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| $R_{a'}$ мкм      | 3,130    | 2,478    | 0,667    | 0,291    |
| $R_{max'}$<br>мкм | 21,340   | 24,580   | 6,015    | 2,519    |
| $R_{pk'}$ мкм     | 5,247    | 4,984    | 1,009    | 0,26     |
| $R_{k'}$ мкм      | 9,873    | 7,131    | 2,165    | 0,932    |
| $R_{vk'}$ мкм     | 3,434    | 2,316    | 0,881    | 0,509    |
| $M_{r1'}$ %       | 11,2     | 11,5     | 9,7      | 8,4      |
| $M_{r2'}$ %       | 91,6     | 85,3     | 89,2     | 89,4     |

лее рассчитаны средние значения, которые сведены в табл. 2–4. Каждое измерение осуществлялось на пяти базовых длинах, при этом в расчет брались три, так как первый и последний отрезок учитываются прибором как «разгон» и «торможение» датчика и в расчет не берутся.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение.

3.1. Влияние фазового состава титановых сплавов на шероховатость поверхности при черновой и чистой обработке.

Полученные параметры шероховатости для исследованных титановых сплавов ВТ3-1 (табл. 2), ВТ5 (табл. 3) и ВТ6 (табл. 4) после одного, двух, трех и четырех проходов целесообразно сравнивать с аналогичными параметрами шероховатости для сталей, которые считаются эталонными и имеют следующие значения: первый проход —  $R_a \approx 2,5$  мкм, второй проход —  $R_a \approx 1,25$  мкм, третий проход —  $R_a \approx 0,63$  мкм, четвертый проход —  $R_a \approx 0,41$ – $0,32$  мкм.

Сопоставляя параметры шероховатости (табл. 2–4) различных титановых сплавов после первого (чернового) прохода необходимо отметить, что все значения  $R_a$  выше, чем величина  $R_a$  для сталей при одинаковых режимах обработки (табл. 1). Минимальное значение параметра  $R_a$  имеет  $\alpha$ -сплав, а максимальное  $\alpha+\beta$  сплав. Различие между макси-

мальным и минимальным значением параметра  $R_a$  в 20,1 % свидетельствует о существенном влиянии фазового состава титановых сплавов на полученную с помощью ЭЭО шероховатость поверхностного слоя. Максимальное и минимальное значения  $R_{max}$  при этом отличались на 14,3 %.

Следующие за первым (черновым) проходом второй, третий и четвертый проходы считаются чистовыми (выхаживающими). Их главная цель — повысить точность получаемого размера и снизить шероховатость обработанной поверхности. Как видно из табл. 1, режимы обработки для второго прохода характеризовались сниженными значениями длины импульса, паузы между импульсами и среднего тока. Это связано с целью снижения энергии импульса, что приводит к снижению объема удаляемого материала за один импульс и, следовательно, должно приводить к снижению шероховатости поверхности. Анализируя значения параметров шероховатости (табл. 2–4) после второго прохода можно заключить, что для  $\beta$ -сплава  $R_a$  снизилась на 9,7 %, для  $\alpha+\beta$ -сплава — на 26,3 % а для  $\alpha$ -сплава произошел рост данного показателя на 2,3 %, тогда как для сталей после второго прохода достигается снижение шероховатости на 100 %. Данный факт свидетельствует о недостаточной оптимизации параметров обработки титановых спла-

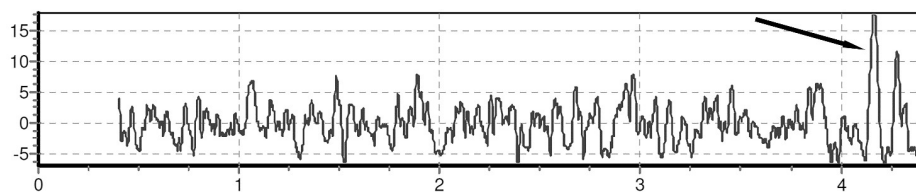


Рис. 3. Профилграмма титанового сплава VT6 после второго прохода ЭЗО (черной стрелкой указан аномальный пик)

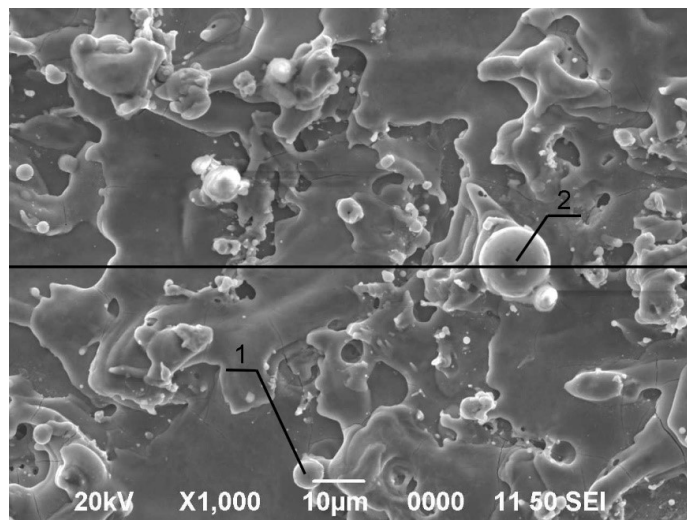


Рис. 4. Морфология поверхности образца из титанового сплава VT6 после второго прохода ЭЗО,  $\times 1000$

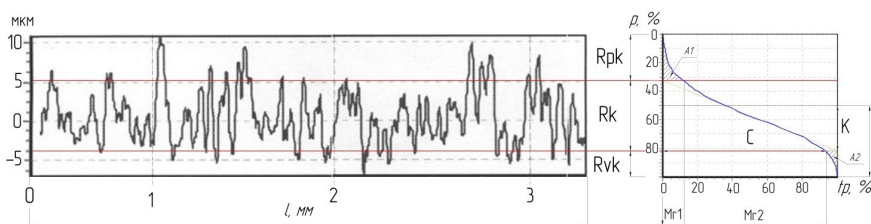


Рис. 5. Расчет величин параметров группы  $R_k$  по профилграмме и относительной опорной кривой

вов на втором проходе и требует дополнительного исследования.

Как было отмечено в теоретической части, наличие шлама может вызывать нехарактерные максимумы на профилграммах. Это было подтверждено экспериментально (рис. 3). Для объяснения причин появления нехарактерного максимума было проведено дополнительное исследование морфологии поверхности, при котором был обнаружен шлам в виде сфер (рис. 4, позиции 1, 2), предположительно являющийся причиной аномального пика.

Третий проход, с точки зрения энергии импульса, более «щадящий», чем второй (табл. 1). Обработка происходит частыми короткими импульсами со сниженной энергией. Условия обработки приводят к тому, что пробы осуществляются преимущественно в пики, оставшиеся после второго прохода. В результате на третьем проходе происходит значительное снижение шероховатости. Значения параметра  $R_a$  снизились по сравнению со вторым проходом для  $\beta$ -сплава на 240,83 %, для  $\alpha$ -сплава на 244 %, а для  $\alpha + \beta$ -сплава на 271,51 %. Этот результат превосходит данные для стали, у которой снижение шероховатости после третьего прохода составляет 98 % от второго.

На четвертом проходе энергия импульса минимальна, поэтому для используемого оборудования SODICK VZ300L четвертый проход является финишным. Обработка на данном проходе происходит также частыми короткими импульсами, отличающимися минимальными средним током и напряжением. Таблицы 2–4 показывают, что однофазный  $\alpha$ -сплав имел шероховатость, сопоставимую со сталями, а  $\beta$ -сплав и  $\alpha + \beta$ -сплав — меньшую, чем у сталей, что свидетельствует об оптимально подобранных режимах обработки. Значения параметра  $R_a$  снизились по сравнению с третьим проходом для  $\beta$ -сплава на 159,38%, для  $\alpha$ -сплава на 137%, а для  $\alpha + \beta$ -сплава на 129,21%.

3.2. Влияние фазового состава титановых сплавов на параметры шероховатости группы  $R_k$ , получаемые в процессе ЭЗО.

Оценка параметров шероховатости группы  $R_k$  осуществляется при необходимости оценки функциональных свойств поверхности — герметичности, износостойкости и др. Данные параметры не регламентируются ГОСТом 2789-73, но учитываются в стандарте DIN 4776 (ISO 13565-1:1998).

Определение параметров  $R_{pk}$  — верхней трети микронеровностей поверхности, подверженной



мгновенному истиранию в начальный период приработки пары трения,  $R_k$  — «ядра профиля шероховатости» и  $R_{vk}$  — нижней трети микронеровностей, отвечающей за маслосъемность поверхности, проводили по стандартной методике.

Анализировали сопоставленные профилограммы для каждого прохода и относительные опорные кривые профилей (кривые Эббота—Файерстоуна) (рис. 5). Полученные результаты сведены в табл. 2–4.

Следует отметить, что при одинаковых для каждого сплава режимах обработки максимальное значение параметра  $R_{pk}$  имел  $\alpha + \beta$ -сплав, что, очевидно, должно неблагоприятно сказываться на показателях прирабатываемости данного сплава. Минимальное значение параметра  $R_{pk}$  имел  $\alpha$ -сплав, что, по всей вероятности, должно обеспечить максимально быструю его приработку,  $\beta$ -сплав имел промежуточное значение параметра  $R_{pk}$ .

После износа верхней трети микронеровностей начинается износ так называемого «ядра профиля шероховатости», характеризуемого параметром  $R_k$ . С этой точки зрения, наилучшие показатели будет иметь сплав, обладающий максимальным значением  $R_k$ . В данном исследовании максимальное значение  $R_k$  имел  $\alpha + \beta$ -сплав, минимальное  $\alpha$ -сплав, а промежуточное  $\beta$ -сплав. При этом различия между максимальным и минимальным значениями составили 17,5 %.

Параметр  $R_{vk}$ , характеризующий маслосодерживающую способность поверхности, также представляет повышенный интерес среди исследователей в области триботехники. Максимальное значение данного параметра имел  $\alpha + \beta$ -сплав, что свидетельствует о максимальной маслосъемности поверхности, минимальное —  $\beta$ -сплав,  $\alpha$ -сплав имел промежуточное значение.

#### 4. Выводы и заключение.

1. Изменение фазового состава исследованных титановых сплавов (BT3-1, BT5, BT6) существенно влияет на высотные параметры шероховатости обработанных поверхностей, при сопоставимых электрических параметрах обработки. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка титановых  $\beta$  ( $R_a = 0,288$  мкм) и  $\alpha + \beta$  ( $R_a = 0,291$  мкм) сплавов в четыре прохода позволяет получить шероховатость меньше, чем у сталей (для сталей, обработанных в четыре прохода, параметр  $R_a \approx 0,32$  мкм). Для  $\alpha$ -сплава параметр  $R_a$  оказался равным среднеарифметическому отклонению профиля для сталей.

2. Фазовый состав оказывает существенное влияние на параметры шероховатости группы  $R_k$ , получаемые в процессе ЭЭО. Возможность изменять данную группу параметров за счет режимов ЭЭО представляет интерес для специалистов в области триботехники и инженерии поверхностей вследствие возможности задания маслосодерживающих характеристик поверхности.

#### Благодарности

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

#### 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.ijmachtools.2004.07.006.

2. 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.

3. Xu J., Chen X., Zhang Ch. [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.

4. 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.

5. 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.

6. Шейкин С. С., Рутковский А. В., Ростоцкий И. Ю., Єфросінін Д. В., Бондар В. К. Підвищення роботоздатності пари тертя титан—хірулен // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2012. Т. 48, № 1. С. 106–110.

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. 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.

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

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Федоров А. А., Блесман А. И., Полонянкин Д. А. [и др.]. Влияние режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию и шероховатость поверхности титанового сплава BT3-1 // Россия молодая: передовые технологии — в промышленность. 2017. № 1. С. 62–66.

15. Жданова Ю. Е., Федоров А. А., Блесман А. И. [и др.]. Исследование поверхности образцов титанового сплава BT3-1, 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.

16. Федоров А. А., Полонянкин Д. А., Блесман А. И. [и др.]. Исследование влияния режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на трещинообразование и морфологию поверхностного слоя титанового сплава BT3-1 // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 23–30. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-23-30.

17. 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.

18. Tondy 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

**ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 4626-9660

AuthorID (РИНЦ): 610896

ORCID: 0000-0002-6681-087X

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

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

SPIN-код: 6401-8101

AuthorID (РИНЦ): 1000408

**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

**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

**БРЕДГАУЭР Юлия Олеговна**, аспирант кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 8551-8356

AuthorID (РИНЦ): 1015524

ORCID: 0000-0002-0267-8179

AuthorID (SCOPUS): 57208868308

ResearcherID: ABF-3261-2020

Адрес для переписки: fedot83@gmail.com

#### Для цитирования

Федоров А. А., Жданова Ю. Е., Линовский А. В., Бобков Н. В., Бредгауэр Ю. О. Влияние фазового состава титановых сплавов на параметры шероховатости, получаемые в процессе проволоочной электроэрозионной обработки // *Омский научный вестник*. 2021. № 4 (178). С. 18–24. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-18-24.

Статья поступила в редакцию 06.07.2021 г.

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