

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>

УДК 621.9.047.7

Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов

Канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, канд. техн. наук А. Ю. Королёв¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. С. Нисс¹⁾, инж. А. Э. Паршута¹⁾, асп. А. С. Будницкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Титановые и ниобиевые сплавы широко применяются в настоящее время в самолетостроении, атомной энергетике, СВЧ-технике, космической и ультразвуковой технике, а также при производстве изделий медицинского назначения. В большинстве случаев технология изготовления таких изделий предусматривает выполнение качественного полирования поверхности. Традиционно для полирования изделий из титановых и ниобиевых сплавов используются механические и электрохимические методы. Недостатки механических методов – малая производительность, подверженность внедрению инородных частиц, затруднения при обработке сложных геометрических форм. Для электрохимических технологий указанные материалы являются труднообрабатываемыми, а процессы их полирования требуют применения токсичных электролитов. Традиционно электрохимическое полирование титановых и ниобиевых сплавов осуществляют в кислотных электролитах, состоящих из токсичной плавиковой (20–25 %), серной азотной и хлорной кислот. Недостатки таких растворов – их высокая агрессивность и вред, наносимый производственному персоналу и окружающей среде. Предлагается использовать принципиально новые, разработанные авторами статьи режимы электролитно-плазменной обработки с целью электролитно-плазменного полирования и очистки изделий из титановых и ниобиевых сплавов с применением электролитов простого состава на основе водного раствора фторида аммония, обеспечивающие существенное повышение качества поверхности с высокой отражательной способностью. За счет применения водного электролита технология обладает высокой экологической безопасностью по сравнению с традиционным электрохимическим полированием. Приводятся результаты исследования влияния характеристик процесса электролитно-плазменного полирования титана и ниобия с применением разработанного режима на производительность, эффективность обработки, качество поверхности, а также на структуру и свойства обрабатываемой поверхности. На основании полученных результатов отработаны процессы электролитно-плазменного полирования ряда изделий из титановых сплавов ВТ6 (Grade 5), применяемых в медицине и авиастроении.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, полирование, очистка, титан, ниобий, электролит, шероховатость, производительность, плотность тока, напряжение

Для цитирования: Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>

Electrolyte-Plasma Polishing of Titanium and Niobium Alloys

Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, V. S. Niss¹⁾, A. E. Parshuto¹⁾, A. S. Budnitskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Titanium and niobium alloys are widely used at present in aircraft, nuclear energy, microwave technology, space and ultrasonic technology, as well as in manufacture of medical products. In most cases production technology of such products involves an implementation of a quality polishing surface. Mechanical and electrochemical methods are conventionally

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

used for polishing products made of titanium and niobium alloys. Disadvantages of mechanical methods are low productivity, susceptibility to introduction of foreign particles, difficulties in processing complex geometric shapes. These materials are hard-to-machine for electrochemical technologies and processes of their polishing require the use of toxic electrolytes. Traditionally, electrochemical polishing of titanium and niobium alloys is carried out in acid electrolytes consisting of toxic hydrofluoric (20–25 %), sulfuric nitric and perchloric acids. The disadvantage of such solutions is their high aggressiveness and harmful effects for production personnel and environment. This paper proposes to use fundamentally new developed modes of electrolytic-plasma treatment for electrolyte-plasma polishing and cleaning products of titanium and niobium alloys while using simple electrolyte composition based on an aqueous ammonium fluoride solution providing a significant increase in surface quality that ensures high reflectivity. Due to the use of aqueous electrolyte the technology has a high ecological safety in comparison with traditional electrochemical polishing. The paper presents results of the study pertaining to the effect of titanium and niobium electrolytic-plasma polishing characteristics using the developed mode for productivity, processing efficiency, surface quality, and structure and properties of the surface to be treated. Based on the obtained results, processes of electrolytic-plasma polishing of a number of products made of titanium alloys BT6 (Grade 5), used in medicine and aircraft construction, have been worked out in the paper.

Keywords: electrolyte-plasma treatment, polishing, cleaning, titanium, niobium, electrolyte, roughness, productivity, current density, voltage

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitskiy A. S. (2018) Electrolyte-Plasma Polishing of Titanium and Niobium Alloys. *Science and Technique*. 17 (3), 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219> (in Russian)

Введение

Благодаря особым свойствам титановые и ниобиевые сплавы получили в настоящее время широкое распространение при производстве ряда ответственных изделий [1, 2]. Так, титановые и ниобиевые сплавы применяются в самолетостроении, атомной энергетике, СВЧ-технике, космической и ультразвуковой технике, а также при производстве изделий медицинского назначения [3–5]. В большинстве случаев технология изготовления изделий предусматривает выполнение качественного полирования поверхности. К таким изделиям относятся, например, зубные и костные имплантаты, имплантаты для травматологии, черепные пластины, фиксаторы позвоночника; турбинные лопатки авиационных двигателей из титановых сплавов; листы, фольга и проволока, используемые для скрепления тканей, нервов, наложения швов, изготовления протезов; детали тепловыделяющих и теплообменных элементов ядерно-энергетических систем; детали ускоряющих структур коллайдеров.

Традиционно для полирования изделий из титановых и ниобиевых сплавов используются механические и электрохимические методы. Недостатки механических методов – малая производительность, подверженность внедрению инородных частиц, затруднения при обработке сложных геометрических форм [6]. Для электрохимических технологий указанные материалы являются труднообрабатываемыми, а процессы их полирования требуют применения токсичных

электролитов. Электрохимическое полирование титановых и ниобиевых сплавов осуществляют в кислотных электролитах, состоящих из токсичной плавиковой (20–25 %), серной азотной и хлорной кислот [7]. Недостатки таких растворов – их высокая агрессивность и вред, наносимый производственному персоналу и окружающей среде. В последние годы были разработаны электролиты на основе растворов солей фтора в органических растворителях, таких как метанол или диметилформамид [8], которые также небезопасны и токсичны.

Для снижения экологической нагрузки в качестве альтернативы существующим методам электрохимического полирования возможно использование электролитно-плазменной обработки, которая применяется для полирования (электролитно-плазменное полирование – ЭПП), удаления заусенцев и очистки металлических изделий, а также с целью повышения физико-механических и химических свойств поверхности [9]. Кроме того, электролитно-плазменная обработка может применяться для электролитного нагрева и электрохимикотермического упрочнения поверхности [10]. Электролитно-плазменная обработка выполняется при напряжении более 200 В. Режим электролитно-плазменной обработки соответствует участку ВС на вольтамперной характеристике анодного процесса в электролите (рис. 1). На практике рабочее напряжение составляет 280–300 В при плотности тока 0,1–0,4 А/см². В качестве электролитов обычно используются растворы солей концентрацией 3–6 %.

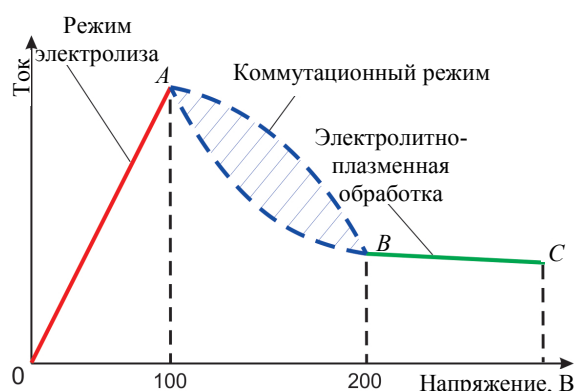


Рис. 1. Вольтамперная характеристика анодного процесса в электролите (участок BC соответствует режиму электролитно-плазменной обработки)

Fig. 1. Voltage-current characteristic of anode process in electrolyte (segment BC corresponds to electrolyte-plasma treatment mode)

ЭПП по сравнению с механическим и электрохимическим полированием обладает рядом существенных преимуществ: высокая экологическая безопасность по сравнению с классическим электрохимическим полированием за счет применения электролитов на основе водных растворов солей; возможность обработки деталей и изделий любой конфигурации; возможность получения зеркальной поверхности с высотой микронеровностей вплоть до $Ra = 0,01$ мкм; устранение в процессе обработки некondиционного поверхностного слоя и остаточных напряжений, что улучшает физико-механические и химические свойства поверхности; достаточно короткая продолжительность процесса полирования; существенное снижение ручного труда; возможность обработки высокотвердых и вязких материалов [11–14]. Однако массовое использование технологии ЭПП ограничивается тем, что в промышленных масштабах к настоящему времени освоены процессы ЭПП только небольшого перечня материалов: низкоуглеродистые и коррозионностойкие стали, алюминиевые сплавы, бронзы и латуни. Технологии обработки таких материалов, как, например, титан и ниобий, отработаны лишь в лабораторных условиях [15] и не получили распространения в промышленности.

Для решения указанных проблем предлагается использовать принципиально новые, разработанные авторами статьи режимы электролитно-плазменного полирования и очистки изделий из титановых и ниобиевых сплавов с применением электролитов простого состава на основе водного раствора фторида аммония,

обеспечивающие существенное повышение качества поверхности с высокой отражательной способностью. За счет применения водного электролита технология обладает высокой экологической безопасностью по сравнению с традиционным электрохимическим полированием. Разработанный электролит легко корректируется, что позволяет применять процесс для обработки изделий из титановых и ниобиевых сплавов в промышленных масштабах.

Цель работы – исследование влияния характеристик ЭПП титана и ниобия с применением разработанного режима на производительность, эффективность обработки, качество поверхности, а также структуру и свойства обрабатываемой поверхности.

Материалы, оборудование и методы исследований

Исследования проводили на плоских образцах технически чистого титана ВТ1-0 (Grade 2) размерами $30 \times 15 \times 1,5$ мм и технически чистого ниобия ВН (Nb-1) размерами $20 \times 30 \times 2$ мм. Образцы из титана предварительно были обработаны шлифовальной бумагой SiC зернистостью Р600, образцы из ниобия – шлифовальной бумагой размерностью Р300. Среднее значение шероховатости поверхности Ra исходных образцов из титана и ниобия составило 0,365 и 0,706 мкм соответственно.

Для выполнения ЭПП использовалась специально разработанная экспериментальная установка, включающая рабочую ванну (катод), нагреватель, теплообменник, датчик температуры, систему перемешивания электролита (рис. 2).

ЭПП образцов выполняли в водном растворе фторида аммония (NH_4F) концентрацией 4 %. Значение рабочего напряжения изменялось в диапазоне от 260 до 300 В с шагом 10 В. Продолжительность обработки каждого образца 2 мин. При исследовании влияния напряжения на эффективность обработки, качество поверхности, производительность обработки температура электролита составляла 90°C , продолжительность обработки 1, 3 и 5 мин. При исследовании влияния плотности тока на эффективность обработки, качество поверхности, производительность обработки регулирование плотности тока осуществлялось путем изменения температуры электролита в диапазоне от 75 до 95°C (величина напряжения составляла 300 В, продолжительность обработки 3 мин).



Рис. 2. Экспериментальное оборудование для выполнения исследований: а – схема рабочей ванны:

1 – образец (анод); 2 – нагреватель; 3 – система перемешивания электролита; 4 – теплообменник; 5 – датчик температуры; 6 – ванна (катод); б – фотография оборудования

Fig. 2. Experimental equipment for research: a – working bath scheme: 1 – sample (anode); 2 – heater; 3 – electrolyte mixing system; 4 – heat exchanger; 5 – temperature sensor; 6 – bath (cathode); б – equipment photo

Оценка производительности выполнялась по изменению массы образцов в результате обработки. Массу образцов до и после обработки определяли с помощью аналитических весов Ohaus Pioneer PA214. Силу тока находили с помощью токовых клещей UNIT-203. Плотность тока устанавливалась как отношение силы тока к площади обрабатываемой поверхности. Эффективность обработки при различных режимах определялась как отношение изменения шероховатости к удельной массе удаленного материала в процессе обработки ($\Delta Ra/\Delta m_{уд}$).

Микрофотографии поверхности образцов до и после ЭПП получены с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU с микроанализатором INCA350.

Результаты и обсуждение

Фотографии образцов титана и ниобия до и после обработки представлены на рис. 3.

Зависимости плотности тока от рабочего напряжения (вольтамперные характеристики) в процессе ЭПП титана и ниобия, полученные при различных значениях температуры электролита, представлены на рис. 4. Из графиков

видно, что с увеличением напряжения плотность тока незначительно уменьшается. Это в целом характерно для процессов электролитно-плазменной обработки и связано с тем, что с повышением рабочего напряжения возрастает энергия, выделяющаяся в парогазовой оболочке. Это приводит к росту температуры анода и увеличению толщины парогазовой оболочки. Плотность тока для ниобия соответствует аналогичным значениям плотности тока при обработке коррозионностойких сталей в 4%-м растворе сульфата аммония согласно данным, полученным в [13]. Сравнение зависимостей на рис. 4а, б показывает, что для образцов из титана плотность тока больше, чем для образцов из ниобия. Так, из экспериментальных данных следует, что, например, при температуре электролита 90 °С плотность тока при обработке образцов из титана в среднем больше на 20,3 %, чем при обработке ниобия. Кроме того, вольтамперные характеристики для титана являются более пологими, чем для ниобия. Соответственно влияние напряжения на плотность тока для титана менее выраженное.



Рис. 3. Внешний вид образцов титана (а) и ниобия (б) до и после электролитно-плазменного полирования

Fig. 3. Appearance of titanium (a) and niobium (b) samples before and after electrolyte-plasma polishing

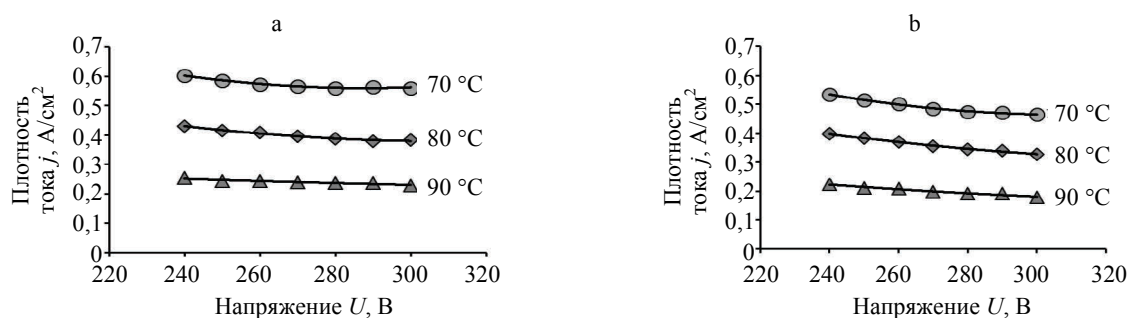


Рис. 4. Вольтамперные характеристики электролитно-плазменного полирования титана (а) и ниобия (б) при различных значениях температуры электролита

Fig. 4. Voltage-current characteristics of titanium (a) and niobium (b) electrolyte-plasma polishing at different values of electrolyte temperature

Экспериментальные зависимости удельного съема $\Delta m_{уд}$ от рабочего напряжения, полученные для образцов из титана и ниобия при обработке с различной продолжительностью, представлены на рис. 5. С увеличением напряжения уменьшается производительность обработки. Зависимости удельного съема от напряжения для титана (рис. 5а), как и в случае с зависимостями для плотности тока от напряжения (рис. 4а), являются более пологими по сравнению с аналогичными зависимостями для ниобия (рис. 4б, 5б),

т. е. соблюдается корреляция между плотностью тока и съемом металла в соответствии с законом Фарадея.

Снижение производительности ЭПП с увеличением рабочего напряжения не обуславливает ухудшения качества формируемой поверхности, в частности параметра шероховатости Ra . Экспериментальные зависимости, демонстрирующие динамику изменения шероховатости поверхности Ra при обработке образцов из титана и ниобия, представлены на рис. 6.

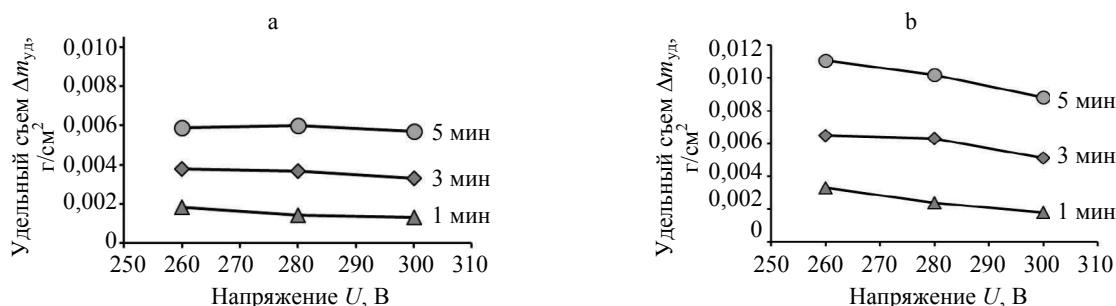


Рис. 5. Влияние напряжения электролитно-плазменного полирования на удельный съем: а – титан; б – ниобий

Fig. 5. Effect of electrolyte-plasma polishing voltage on specific removal: a – titanium; b – niobium

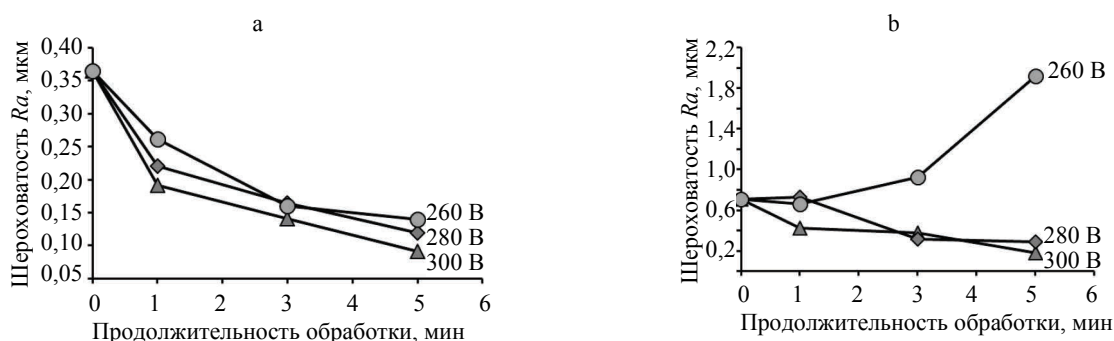


Рис. 6. Влияние продолжительности электролитно-плазменного полирования на шероховатость поверхности образцов при различных значениях напряжения: а – титан; б – ниобий

Fig. 6. Effect of electrolyte-plasma polishing duration on surface roughness of samples at different voltage values: a – titanium; b – niobium

Из графиков следует, что с увеличением рабочего напряжения в исследуемом диапазоне (от 260 до 300 В) обеспечивается снижение достигаемых значений параметра шероховатости поверхности Ra . При этом в результате обработки ниобия при значении напряжения 260 В вместо полирования происходит растравливание поверхности с увеличением шероховатости, а значение параметра шероховатости Ra интенсивно увеличивается с повышением продолжительности обработки (рис. 6b).

В процессах электрохимической обработки (в том числе электролитно-плазменной) съем металла с поверхности выполняется по закону Фарадея, согласно которому объем (или масса) металла, удаленного с заготовки, прямо пропорционален электрическому заряду, прошедшему через электролит. Таким образом, чем больше плотность тока, тем выше производительность обработки. Экспериментальные зависимости удельного съема от плотности тока для титана и ниобия представлены на рис. 7. Полученные зависимости имеют линейный характер. Съем металла увеличивается с повышением плотности тока. При этом удельный съем для образцов из ниобия почти в два раза превышает удельный съем для титана, что связано с более высокими значениями электрохимического эквивалента ($Ti - 0,162$ мг/К, $Nb - 0,192$ мг/К) [16] и, вероятно, коэффициента выхода по току.

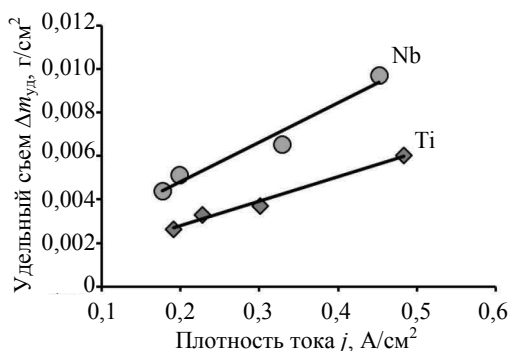


Рис. 7. Влияние плотности тока на удельный съем
Fig. 7. Effect of current density on specific removal

Зависимости изменения шероховатости поверхности образцов титана и ниобия от плотности тока представлены на рис. 8. В исследуемом диапазоне значений плотности тока (для титана –

0,18–0,45 А/см², для ниобия – 0,19–0,48 А/см²) экспериментально установленные значения величины изменения шероховатости поверхности ΔRa имеют существенный разброс как для образцов из титана, так и для образцов из ниобия. При этом наблюдается тенденция к незначительному росту величины изменения шероховатости поверхности с увеличением плотности тока. Значения ΔRa для ниобия существенно выше аналогичных значений для титана.

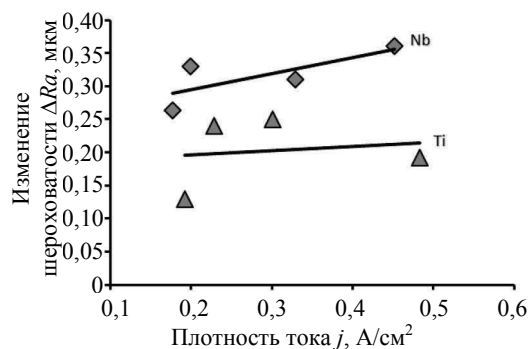


Рис. 8. Влияние плотности тока на изменение шероховатости поверхности ΔRa образцов титана и ниобия
Fig. 8. Effect of current density on surface roughness change ΔRa of titanium and niobium samples

Диаграммы, характеризующие влияние рабочего напряжения и плотности тока на эффективность обработки титана и ниобия по изменению шероховатости, представлены на рис. 9. Показатели эффективности обработки поверхности $\Delta Ra/\Delta m_{уд}$ как для титана, так и для ниобия имеют примерно равные значения, за исключением значения, полученного для ниобия при напряжении 260 В, когда эффективность является отрицательной. Анализ представленных диаграмм показывает, что для достижения высоких значений эффективности одновременно необходимо выполнять обработку при следующих режимах: для титана – напряжение 300 В, плотность тока 0,18–0,30 А/см², для ниобия – напряжение 280–300 В, плотность тока 0,18–0,20 А/см².

Микрофотографии поверхности образцов титана и ниобия до и после обработки представлены на рис. 10. Поверхность титана до ЭПП (рис. 10а) характеризуется наличием продольных полос, образованных в результате предварительного шлифования образцов. После

ЭПП поверхность сглаживается, присутствуют только следы от наиболее глубоких царапин (рис. 10b). Поверхность исходных образцов из ниобия, кроме продольных полос, полученных при шлифовании, характеризуется также наличием достаточно крупных задиrow с размерами в плане до 12 мкм (рис. 10c). В результате ЭПП ниобия формируется гладкая поверх-

ность с присутствием незначительного количества питтингов размерами до 5 мкм (рис. 10d).

На основании полученных результатов отработаны процессы ЭПП ряда изделий из титановых сплавов ВТ6 (Grade 5), применяемых в медицине и авиастроении. Примеры обработки деталей с помощью разработанной технологии представлены на рис. 11.

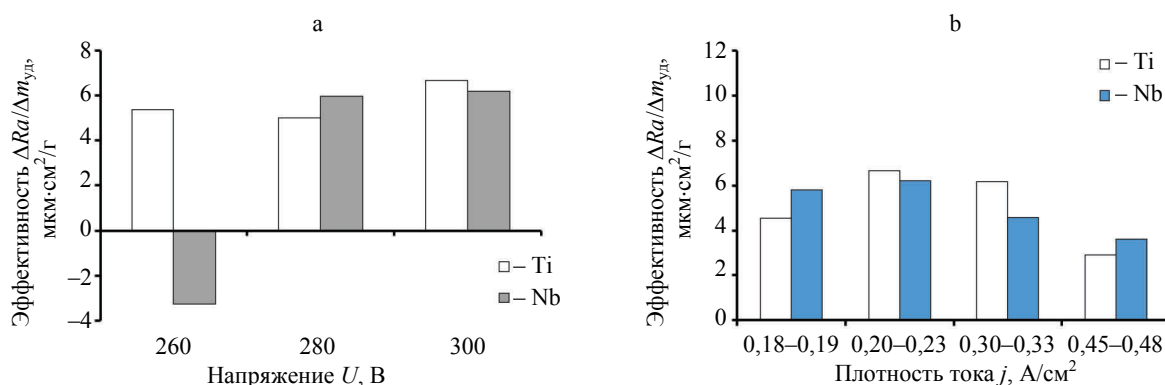


Рис. 9. Влияние электрических параметров на эффективность электролитно-плазменного полирования титана и ниобия: а – напряжения; б – плотности тока

Fig. 9. Influence of electrical parameters on electrolyte-plasma polishing efficiency of titanium and niobium: а – voltage; б – current density

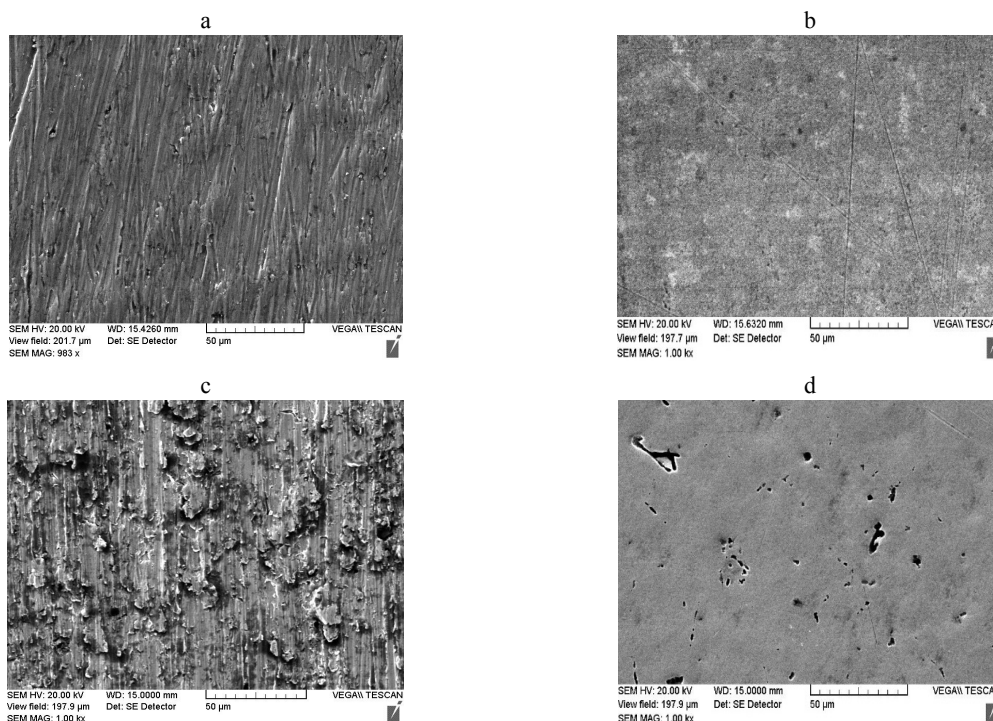


Рис. 10. Микрофотографии поверхности образцов титана и ниобия до и после электролитно-плазменного полирования (ЭПП): а, б – титан до и после ЭПП; с, d – ниобий до и после ЭПП

Fig. 10. Surface microphotographs of titanium and niobium samples before and after electrolyte-plasma polishing (EPP): а, б – titanium before and after EPP; с, d – niobium before and after EPP



Рис. 11. Примеры электролитно-плазменного полирования изделий из титанового сплава BT6 (Grade 5)

Fig. 11. Examples of electrolyte-plasma polishing (EPP) products made of titanium alloy BT6 (Grade 5)

ВЫВОДЫ

1. Разработан новый метод электролитно-плазменного полирования титановых и ниобиевых сплавов, обладающий высокой экологической безопасностью по сравнению с классическим электрохимическим полированием за счет применения безвредных электролитов на основе водных растворов солей общей концентрацией не более 6 %. Для сравнения, традиционное полирование, например, титановых сплавов выполняется в электролитах с температурой не ниже 80 °С, содержащих помимо серной, азотной и хлорной кислот токсичную плавиковую кислоту концентрацией 20–25 %.

2. Установлено, что с увеличением рабочего напряжения в исследуемом диапазоне (от 260 до 300 В) в процессе электролитно-плазменного полирования обеспечивается снижение достигаемых значений параметра шероховатости поверхности Ra . При этом в результате обработки ниобия при значении напряжения 260 В вместо полирования происходит растравливание поверхности с увеличением шероховатости, а значение параметра шероховатости Ra интенсивно возрастает с повышением продолжительности обработки. При электролитно-плазменном полировании титана с увеличением рабочего напряжения во всем исследуемом диа-

пазоне наблюдается постепенный рост величины изменения шероховатости поверхности ΔRa . Наибольшее изменение шероховатости ΔRa при обработке ниобия достигается в диапазоне значений напряжения от 280 до 300 В.

3. По результатам исследования влияния плотности тока на качество электролитно-плазменного полирования титана и ниобия установлено, что с увеличением плотности тока в исследуемом диапазоне значений (для титана – 0,18–0,45 А/см², для ниобия – 0,19–0,48 А/см²) наблюдается тенденция к незначительному росту величины изменения шероховатости поверхности ΔRa как для титана, так и для ниобия. При этом значения ΔRa для ниобия существенно больше аналогичных значений для титана.

4. Наибольшие значения эффективности электролитно-плазменного полирования достигаются при следующих режимах: для титана – напряжение 300 В, плотность тока 0,18–0,30 А/см², для ниобия – напряжение 280–300 В, плотность тока 0,18–0,20 А/см².

ЛИТЕРАТУРА

1. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry / I. Inagaki [et al.] // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. 2014. Vol. 106. P. 22–27.
2. Nikishina, E. E. Niobium and Tantalum: State of the World Market, Fields of Application, and Raw Sources. Part I / E. E. Nikishina, D. V. Drobot, E. N. Lebedeva // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2013. Vol. 54, No 6. P. 446–452.
3. Froes, F. H. Cost Affordable Developments in Titanium Technology and Applications / F. H. Froes, A. M. Imam // Key Engineering Materials. 2010. Vol. 436. P. 1–11. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.436.1>
4. Zardiackas, L. D. Titanium, Niobium, Zirconium, and Tantalum for Medical and Surgical Applications / L. D. Zardiackas, M. J. Kraay, H. L. Freese. Astm, 2006.
5. Veiga, C. Properties and Applications of Titanium Alloys: a Brief Review / C. Veiga, J. P. Davim, A. J. R. Loureiro // Rev. Adv. Mater. Sci. 2012. Vol. 32, No 2. P. 133–148.
6. Axinte, D. A. Workpiece Surface Integrity of Ti-6-4 Heat-Resistant Alloy when Employing Different Polishing Methods / D. A. Axinte, J. Kwong, M. C. Kong // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209, No 4. P. 1843–1852. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.046>.
7. The Mechanism of Electropolishing of Niobium in Hydrofluoric-Sulfuric Acid Electrolyte / H. Tian [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. 2008. Vol. 155, No 9. P. D563–D568. <https://doi.org/10.1149/1.2945913>.

8. Electropolishing of CP Titanium and its Alloys in an Alcoholic Solution-Based Electrolyte / K. Tajima [et al.] // *Dental Materials Journal*. 2008. Vol. 27, No 2. P. 258–265. <https://doi.org/10.4012/dmj.27.258>.
9. Surface Finish Machining of Medical Parts using Plasma Electrolytic Polishing / H. Zeidler [et al.] // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 49. P. 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>.
10. Особенности электролитно-плазменного нагрева при электрохимико-термической обработке стали / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2013. № 6. С. 20–24.
11. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // 14 International Scientific Conference “CO-MAT-TECH-2006”, Slovakia, Trnava, 19–20 oct. 2006. P. 6.
12. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12X18H10T / И. В. Фомихина [и др.] // *Вестні Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 2008. № 3. С. 24–29.
13. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2012. № 3. С. 3–6.
14. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
15. Многоэтапная электролитно-плазменная обработка изделий из титана и титановых сплавов / А. М. Смыслов [и др.] // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2009. Т. 13, № 1. С. 141–145.
16. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 719 с.
- Поступила 23.11.2017
Подписана в печать 19.01.2018
Опубликована онлайн 29.05.2018
- REFERENCES
1. Inagaki I., Takechi T., Shirai Y., Ariyasu N. (2014) Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 106, 22–27.
2. Nikishina E. E., Drobot D. V., Lebedeva E. N. (2013) Niobium and Tantalum: State of the World Market, Fields of Application, and Raw Sources. Part I. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 54 (6), 446–452. <https://doi.org/10.3103/s1067821213060187>.
3. Froes F. H., Imam A. M. (2010) Cost Affordable Developments in Titanium Technology and Applications. *Key Engineering Materials*, 436, 1–11. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.436.1>.
4. Zardiackas L. D., Kraay M. J., Freese H. L. (2006) *Titanium, Niobium, Zirconium, and Tantalum for Medical and Surgical Applications*. ASTM International. 265. <https://doi.org/10.1520/stp1471-eb>.
5. Veiga C., Davim J. P., Loureiro A. J. R. (2012) Properties and Applications of Titanium Alloys: a Brief Review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 32 (2), 133–148.
6. Axinte D. A., Kwong J., Kong M. C. (2009) Workpiece Surface Integrity of Ti-6-4 Heat-Resistant Alloy when Employing Different Polishing Methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (4), 1843–1852. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.046>.
7. Tian H., Corcoran S. G., Reece C. E., Kelley M. J. (2008) The Mechanism of Electropolishing of Niobium in Hydrofluoric-Sulfuric Acid Electrolyte. *Journal of the Electrochemical Society*, 155 (9), D563–D568. <https://doi.org/10.1149/1.2945913>.
8. Tajima K., Hironaka M., Chen K.-K., Nagamatsu Y., Kakigawa H., Kozono Y. (2008) Electropolishing of CP Titanium and its Alloys in an Alcoholic Solution-Based Electrolyte. *Dental Materials Journal*, 27 (2), 258–265. <https://doi.org/10.4012/dmj.27.258>.
9. Zeidler H., Boettger-Hiller F., Edelmann J., Schubert A. (2016) Surface Finish Machining of Medical Parts using Plasma Electrolytic Polishing. *Procedia CIRP*, 49, 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>.
10. Alekseev Yu. G., Niss V. S., Korolev A. Yu., Parshuto A. E. (2013) Peculiar Features of Electrolytic-Plasma Heating at Electrochemical-Heat Treatment of Steel. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (6), 20–24.
11. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. (2006) Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *CO-MAT-TECH-2006: Proceeding of the Abstracts of 14th International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 October 2006*. Slovakia, Trnava, 6.
12. Fomikhina I. V., Litovskaya Yu. O., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S. (2008). Influence of Electrolytic-Plasma Treatment on Structure and Properties in Surface Layer of Authentic Stainless 12X18H10T – Steel. *Vestni Natsionalnoy Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fiz.-Tekhn. Navuk = Bulletin of National Academy of Science of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, (3), 24–29 (in Russian).
13. Alekseev Yu., Korolev A., Parshuta A., Niss V. (2012). Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
14. Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Y., Parshuto A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Mode in a High-Gradient Electric Field. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 391–399 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
15. Smyslov A. M., Smyslova M. K., Mingazhev A. D., Selivanov K. S. (2009) Multistage Electrolytic-Plasma Treatment of Products from Titan and Titanic Alloys. *Vestnik Ufimskogo Gosudarstvennogo Aviatzionnogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of Ufa State Aviation Technical University], 13 (1), 141–145 (in Russian).
16. Amitan G. L., Baisupov I. A., Baron Yu. M., Volosatov V. A. (ed.) (1988) *Reference Book on Electrochemical and Electro-Physical Processing Methods*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch. 719 (in Russian).

Received: 23.11.2017

Accepted: 19.01.2018

Published online: 29.05.2018