

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

УДК 621.9.047.7

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>

Поступила в редакцию 05.07.2019

Received 05.07.2019

Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

**ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ КОБАЛЬТ-ХРОМОВЫХ СПЛАВОВ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Аннотация. При изготовлении имплантатов, подверженных повышенным циклическим нагрузкам, в последнее время широко используются кобальт-хромовые сплавы, обладающие высокой твердостью и износостойкостью. Шероховатость рабочих поверхностей является одной из важнейших характеристик таких изделий. Традиционные процессы финишной отделки поверхности имплантатов из кобальт-хромовых сплавов основаны на механических и электрохимических методах. Недостатками механических методов являются малая производительность, подверженность внедрению инородных частиц, затруднения при обработке сложных геометрических форм. Для электрохимических технологий рассматриваемые материалы труднообрабатываемые, в процессах их полирования используются вредные электролиты, состоящие из растворов кислот. В качестве альтернативы существующим методам предложено использование экологически безопасного метода электролитно-плазменного полирования, основным преимуществом которого является применение в качестве электролитов водных растворов солей концентрацией 3–5 %. По результатам отработки технологического процесса установлено, что на большинстве режимов электролитно-плазменного полирования кобальт-хромовых сплавов медицинского назначения на поверхности происходит формирование рельефа в виде сетки выступов, происхождение которых можно объяснить неоднородностью структуры материала, возникающей на стадии получения заготовки литьем. Причем высота образующихся рельефных выступов оказывает непосредственное влияние на величину шероховатости поверхности. В результате исследований определены режимы процесса электролитно-плазменного полирования, обеспечивающие формирование гладкой поверхности без присутствия рельефных выступов, сглаживание микрорельефа с удалением царапин, образуемых в результате предварительного шлифования, с достижением низкого значения шероховатости (Ra 0,057 мкм) и высокого коэффициента отражения (0,7), что полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к поверхности имплантатов.

Ключевые слова: кобальт-хромовый сплав, электролитно-плазменное полирование, шероховатость, рельеф, напряжение, плотность тока

Для цитирования: Алексеев, Ю. Г. Электролитно-плазменное полирование кобальт-хромовых сплавов медицинского назначения / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 296–303. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>

Yu. G. Aliakseyeu, A. Yu. Korolyov, V. S. Niss

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

ELECTROLYTIC-PLASMA POLISHING OF COBALT-CHROMIUM ALLOYS FOR MEDICAL PRODUCTS

Abstract. In the manufacture of implants that are subject to increased cyclic loads, cobalt-chromium alloys with high hardness- and wear resistance have recently been widely used. Roughness of working surfaces is one of the most important characteristics of such products. The traditional processes of finishing the surface of cobalt-chromium alloy implants are based on mechanical and electrochemical methods. The disadvantages of mechanical methods are low productivity, susceptibility to the introduction of foreign particles, difficulties in processing of complex geometric shapes. For electrochemical

technologies the treated materials are considered intractable, harmful electrolytes, consisting of solutions of acids, are used in the process of polishing. As an alternative to existing methods, it was proposed to use an environmentally safe method of electrolytic-plasma polishing, the main advantage of which is the use of aqueous solutions of salts with a concentration of 3–5 % as electrolytes. According to the results of the technological process, it has been established that at most electrolyte-plasma polishing modes of cobalt-chromium alloys for medical purposes, a relief in the form of a grid of protrusions occurs on the surface, the origin of which can be explained by the heterogeneity of the material structure that occurs at the stage of casting. Moreover, the height of the formed relief protrusions has a direct impact on the amount of surface roughness. As a result of studies, electrolyte-plasma polishing process modes were established, ensuring the formation of a smooth surface without the presence of embossed protrusions, smoothing the microrelief with the removal of scratches resulting from pre-grinding, achieving a low roughness value (Ra 0.057 micron) and a high reflection coefficient (0.7), which fully meets the requirements for the surface of the implants.

Keywords: cobalt-chrome alloy, electrolytic-plasma polishing, roughness, relief, voltage, current density

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S. Electrolytic-plasma polishing of cobalt-chromium alloys for medical products. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 296–303 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>

Введение. Кобальт-хромовые сплавы являются в настоящее время наиболее широко используемыми биоматериалами для изготовления искусственных имплантатов, которые подвергаются повышенным циклическим нагрузкам (эндопротезы коленного сустава, зубные протезы, коронарные стенты) [1, 2]. Кроме того, кобальт-хромовые сплавы обладают высокой биосовместимостью и обычно не вызывают аллергических реакций в организме.

Основу кобальт-хромовых сплавов составляет кобальт (66–67 %), обладающий высокими механическими характеристиками, а также хром (26–30 %), вводимый для придания сплаву твердости и повышения коррозионной стойкости [3]. Наряду с высокой износостойкостью другой важнейшей характеристикой поверхностей изделий из кобальт-хромовых сплавов является шероховатость поверхности. Поэтому качество рабочей поверхности имеет важное значение для повышения их надежности и долговечности. Например, в стандарте ISO 7206-2:2011 «Implants for surgery – Partial and total hip joint prosthesis. Part 2» предусмотрено, что шарнирные поверхности металлических или керамических протезов коленного сустава из кобальт-хромового сплава должны иметь параметр шероховатости Ra не более 0,1 мкм.

Поверхность заготовок имплантатов из кобальт-хромовых сплавов, полученных ковкой, литьем, лазерной резкой обычно подвергается предварительной обработке (резание, шлифование, дробеструйная обработка). Для финишной отделки поверхности медицинских изделий из кобальт-хромовых сплавов используются механические, электрохимические методы полирования или их сочетание. При этом наиболее качественное полирование изделий из кобальт-хромовых сплавов с достижением высокой однородности поверхности, удалением загрязнений, инородных включений, продуктов износа инструмента, образованных в результате предварительной обработки, достигается с применением электрохимического полирования [4, 5].

В качестве электролитов для электрохимического полирования кобальт-хромовых сплавов используют электролиты на основе растворов кислот, прежде всего серной и соляной, и этиленгликоля. В патенте WO 2014159747A1 «Electropolishing of cobalt-based alloys containing platinum» для качественного полирования коронарных стентов из нитинола предлагается использовать электролит на основе серной, соляной и ортофосфорной кислот с добавлением гликолей для повышения вязкости. Аналогичный состав, только с добавлением этилового спирта и дистиллированной воды предлагается использовать для полирования зубных протезов из кобальт-хром-никелевых сплавов [6]. В патенте US 80800148B2 «Electropolishing process for cobalt and cobalt alloys» для полирования кобальт-хромовых сплавов, в том числе стеллитов, предлагаются более сложные составы. Электролит состоит из гликолевой кислоты и алкинсульфоновой кислоты с алкильным остатком, который имеет от 1 до 3 атомов углерода.

В качестве альтернативы существующим методам электрохимического полирования возможно использование электролитно-плазменной обработки, широко применяемой для полирования (электролитно-плазменное полирование – ЭПП), удаления заусенцев и очистки металлических изделий, в том числе изделий медицинского назначения [7, 8]. ЭПП по сравнению с механическим и электрохимическим полированием обладает рядом существенных преимуществ: высокая

Таблица 1. Химический состав кобальт-хромового сплава ASTM F75

Table 1. Chemical composition of ASTM F75 alloy

Элемент	Si	Cr	Mn	Co	Cu	Mo
мас.%	0,41	26,87	1,19	65,06	0,14	6,34

Рис. 1. Внешний вид исходного образца
Fig. 1. Appearance of initial sample

экологическая безопасность за счет применения электролитов на основе водных растворов солей концентрацией 3–5 %; возможность обработки деталей и изделий любой конфигурации; возможность получения зеркальной поверхности с высотой микронеровностей вплоть до $Ra = 0,01$ мкм; устранение в процессе обработки некондиционного 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 [9–13]. Производительность и экономическая эффективность технологических операций процесса ЭПП в 5–6 раз выше, чем при традиционном электрохимическом полировании в растворах кислот [13]. Применение метода при полировании изделий медицинского назначения из коррозионноустойчивых сталей и титановых сплавов показало его высокую эффективность [13]. Достижимый параметр шероховатости Ra при обработке этих материалов составлял 0,02 мкм.

Учитывая изложенное, а также принимая во внимание мировые тенденции по сокращению производственных процессов, использующих опасные электрохимические технологии, и замену их на более экологичные и эффективные, актуальными представляются работы, направленные на разработку и исследование процессов ЭПП изделий из кобальт-хромовых сплавов. Целью данной работы являлись разработка и исследование режимов ЭПП кобальт-хромовых сплавов, применяемых для изготовления изделий медицинского назначения сложной формы.

Материалы, методика и оборудование для исследований. Для выполнения исследований использовался кобальт-хромовый сплав ASTM F75, широко применяемый для изготовления изделий медицинского назначения (табл. 1).

Размер образцов составлял около $25 \times 8 \times 5$ мм. Полученные образцы предварительно шлифовались шлифовальной бумагой с размерностью P1 200. Исходная шероховатость полученных образцов составляла $Ra 0,12$ мкм. Внешний вид исходных образцов представлен на рис. 1.

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

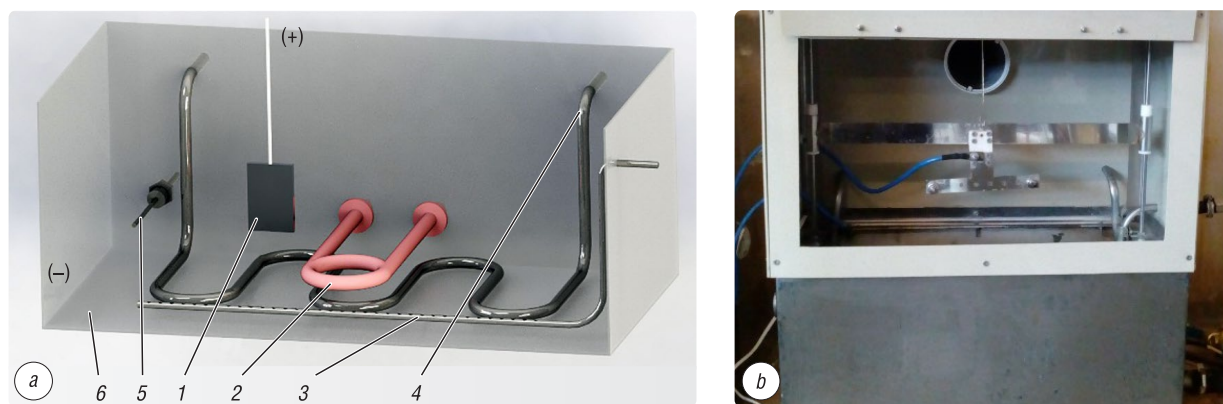


Рис. 2. Экспериментальное оборудование для выполнения исследований: а – схема рабочей ванны: 1 – образец (анод), 2 – нагреватель, 3 – система перемешивания электролита, 4 – теплообменник, 5 – датчик температуры, 6 – ванна (катод); б – общий вид оборудования

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

Обработка образцов выполнялась при различных значениях напряжения и температуры электролита (70 °С, 80 и 90 °С). Напряжение обработки регулировалось с помощью трехфазного ЛАТРа и составляло 240 В, 270 и 300 В. В качестве электролита использовался водный раствор сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ концентрацией 4 %.

Сила тока при обработке определялась с помощью токовых клещей UNIT-203. Плотность тока устанавливалась как отношение силы тока к площади обрабатываемой поверхности. Микроструктура поверхности обработанных образцов оценивалась с помощью светового металлографического микроскопа Altami. Шероховатость поверхности образцов измерялась профилометром MarSurfPS1. Для выполнения измерений коэффициента отражения применялись специально разработанные методика и приспособление. Разработанная методика основана на измерении яркости параллельного пучка света, отраженного от исследуемой поверхности. За отражение 100 % принималась поверхность эталонного оптического зеркала. Схема измерения коэффициента отражения представлена на рис. 3.

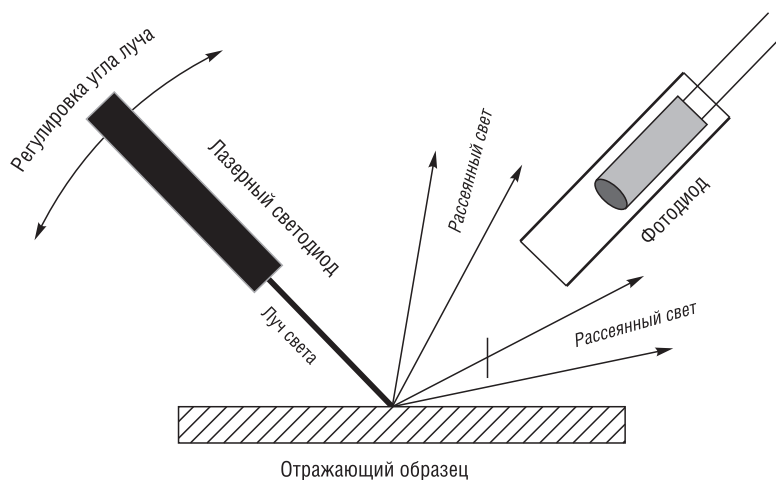


Рис. 3. Схема измерения коэффициента отражения

Fig. 3. Measurement of the reflection coefficient

Результаты исследований и их обсуждение. Основными параметрами, оказывающими влияние на плотность тока в процессе ЭПП, являются температура электролита и рабочее напряжение. Они определяют толщину образующейся вокруг обрабатываемого образца парогазовой оболочки и, соответственно, производительность процесса [13]. На рис. 4 представлены экспериментально установленные зависимости, характеризующие влияние напряжения на плотность тока в процессе ЭПП кобальт-хромового сплава ASTM F75 при различных значениях температуры электролита. Наибольшая плотность тока 0,27–0,32 А/см² и, соответственно, максимальная производительность процесса достигаются при температуре электролита 70 °С. С повышением температуры электролита до 90 °С плотность тока снижается до значений 0,12–0,17 А/см², что связано с существенным увеличением толщины парогазовой оболочки, отделяющей обрабатываемую поверхность от электролита.

Фотографии поверхности полученных образцов, обработанных в соответствии с исследуемыми режимами при продолжительности

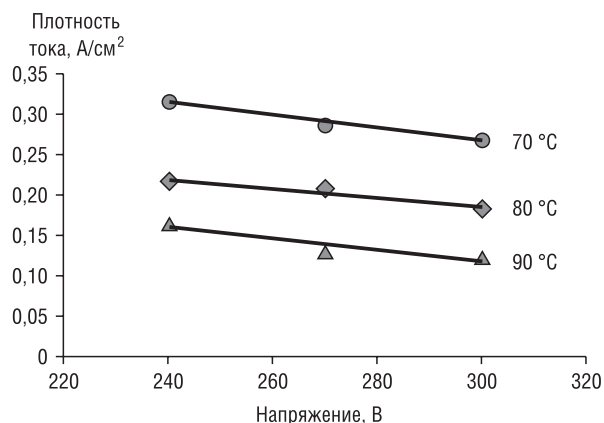


Рис. 4. Влияние напряжения на изменение плотности тока в процессе ЭПП кобальт-хромового сплава при различных значениях температуры электролита

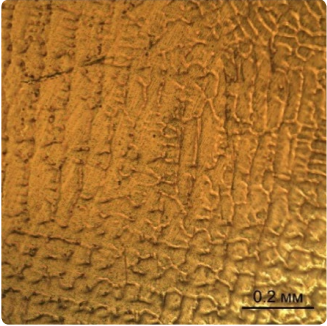
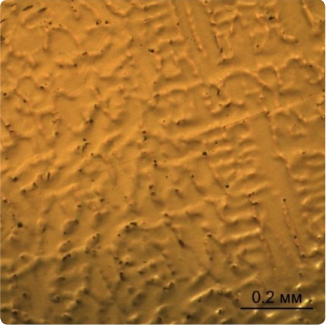
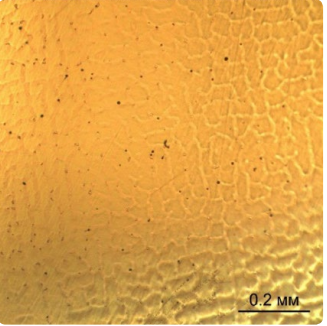
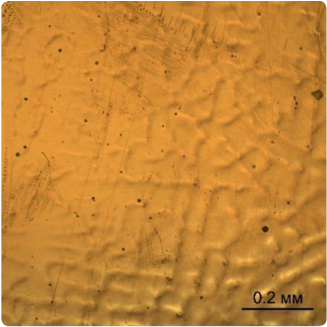
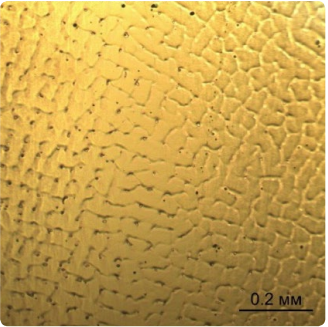
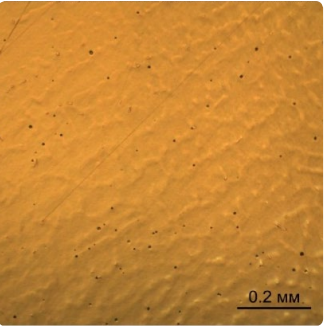
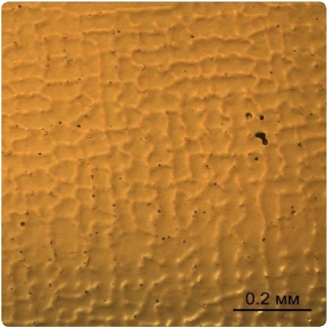
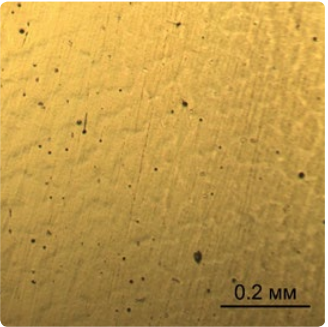
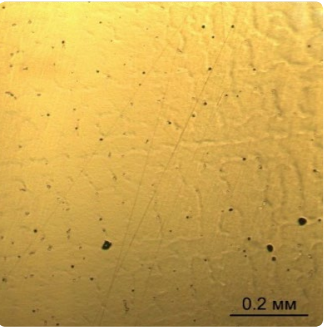
Fig. 4. The effect of voltage on the change in current density in EPP of a cobalt-chrome alloy at different values of the electrolyte temperature

обработки 3 мин, приведены в табл. 2. В результате обработки на всех исследуемых режимах на поверхности образцов наблюдается формирование рельефа в виде сетки выступов, происхождение которых можно объяснить неоднородностью структуры материала, возникающей на стадии получения заготовки литьем. Очевидно, что наличие рельефных выступов оказывает неблагоприятное влияние на шероховатость поверхности.

Из полученных результатов видно, что чем выше плотность тока, тем сильнее выражен формируемый в процессе ЭПП рельеф. Так, при повышении плотности тока (выше $0,22 \text{ A/cm}^2$), а также при снижении рабочего напряжения (меньше 300 В) на обработанной поверхности происходит более интенсивное образование рельефных выступов по сравнению с остальными режимами. Лучшие результаты по состоянию и качеству поверхности достигаются при напряжении 300 В и плотности тока не более $0,22 \text{ A/cm}^2$.

Т а б л и ц а 2. Микроструктура поверхности и значения параметра шероховатости поверхности Ra после обработки образцов из кобальт-хромовых сплавов при различных электрических режимах

T a b l e 2. The surface microstructure and values of the surface roughness parameter Ra after processing samples from cobalt-chromium alloys under various electrical conditions

Напряжение, В	Температура/плотность тока		
	70 °C / 0,27–0,32 A/cm ²	80 °C / 0,18–0,22 A/cm ²	90 °C / 0,12–0,17 A/cm ²
240	 <p>Ra 0,184 мкм</p>	 <p>Ra 0,106 мкм</p>	 <p>Ra 0,075 мкм</p>
270	 <p>Ra 0,108 мкм</p>	 <p>Ra 0,094 мкм</p>	 <p>Ra 0,068 мкм</p>
300	 <p>Ra 0,116 мкм</p>	 <p>Ra 0,068 мкм</p>	 <p>Ra 0,064 мкм</p>

На рис. 5 представлена зависимость шероховатости поверхности Ra после обработки образцов кобальт-хромового сплава от плотности тока. С увеличением плотности тока значительно снижается качество поверхности – достигаемое значение параметра шероховатости Ra увеличивается с 0,054 мкм при плотности тока 0,12 А/см² до 0,184 мкм при плотности тока 0,32 А/см². Таким образом, для получения минимального значения шероховатости поверхности Ra необходимо выполнять обработку с использованием режима, обеспечивающего наименьшее значение плотности тока – 0,12 А/см² (напряжение 300 В, температура электролита – 90 °С). Этот режим применялся в дальнейшем для исследования влияния продолжительности ЭПП на качество поверхности.

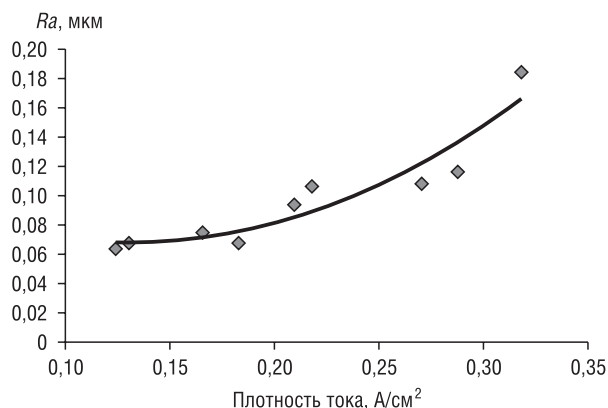


Рис. 5. Влияние плотности тока на шероховатость поверхности Ra в процессе ЭПП кобальт-хромового сплава
 Fig. 5. Effect of current density on the surface roughness Ra in the process of EPP of a cobalt-chrome alloy

На рис. 6 представлены фотографии поверхности образцов после обработки с различной продолжительностью. На начальном этапе (до 1 мин) происходит существенное снижение шероховатости поверхности до Ra 0,031 мкм. Однако после такой обработки визуально все еще различимы царапины, сформированные в результате предварительного шлифования образцов. В результате дальнейшей обработки происходит сглаживание микрорельефа с постепенным удалением царапин. Полное удаление царапин достигается после обработки продолжительностью 2,0–2,5 мин. При этом на поверхности начинают проявляться рельефные выступы, в итоге повышается шероховатость поверхности (до Ra 0,061 при продолжительности обработки 2,5 мин).

Зависимости шероховатости поверхности и коэффициента отражения образцов из кобальт-хромового сплава от продолжительности ЭПП, построенные на основании полученных экспериментальных данных, представлены на рис. 7. Как уже было отмечено, минимальные значения шероховатости поверхности достигаются при обработке с продолжительностью до 1 мин. Наибольший коэффициент отражения имеют образцы после 2,0–2,5 мин обработки.

Сопоставление зависимостей на рис. 7 показывает, что для достижения высокого качества ЭПП кобальт-хромовых сплавов необходимая продолжительность обработки составляет 2 мин. При этом обеспечивается: формирование гладкой поверхности без присутствия царапин, образуемых в результате предварительного шлифования, и рельефных выступов; снижение шероховатости до Ra 0,057 мкм и существенное повышение коэффициента отражения поверхности (до 0,7). Результат ЭПП феморального компонента эндопротеза коленного сустава из кобальт-хромового сплава с использованием установленных режимов обработки представлен на рис. 8.

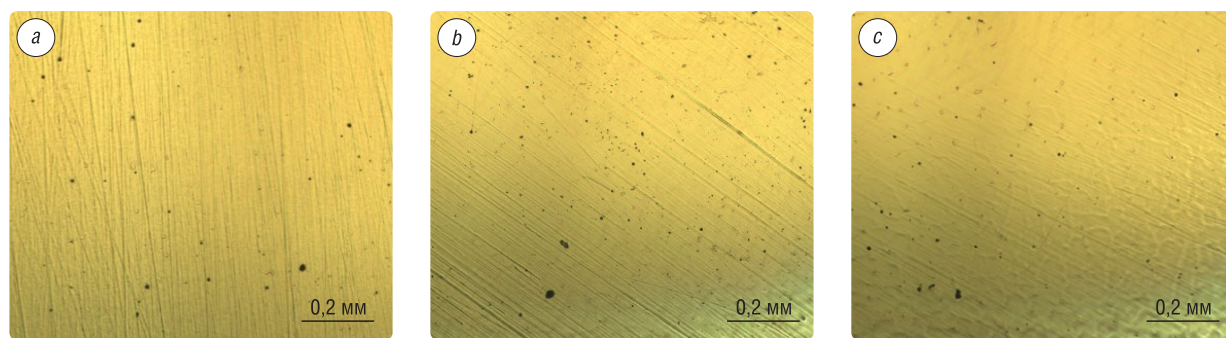


Рис. 6. Состояние поверхности образцов из кобальт-хромового сплава после ЭПП с различной продолжительностью: a – 0,5 мин, b – 1,5 мин, c – 2,5 мин

Fig. 6. The surface condition of samples from a cobalt-chromium alloy after EPP with different duration: a – 0.5 min, b – 1.5 min, c – 2.5 min

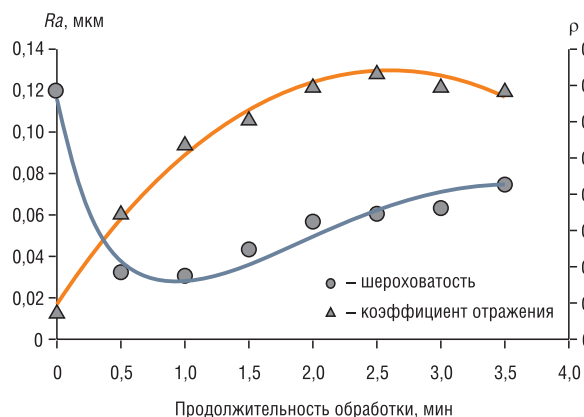


Рис. 7. Влияние продолжительности ЭПП на изменение шероховатости поверхности и коэффициента отражения
Fig. 7. Effect of EPP duration on change the surface roughness and reflection coefficient



Рис. 8. Результат ЭПП феморального компонента эндопротеза коленного сустава из кобальт-хромового сплава
Fig. 8. The result of EPP of the femoral component of a cobalt-chrome alloy knee joint endoprosthesis

Заключение. По результатам разработки электрических режимов процесса электролитно-плазменного полирования кобальт-хромовых сплавов для изготовления имплантатов сложной формы, подверженных повышенным циклическим нагрузкам, установлено, что при высоких значениях плотности тока, а также при низком рабочем напряжении на обработанной поверхности происходит интенсивное образование рельефных выступов. Наименьшая высота рельефа может быть получена при напряжении 300 В и плотности тока не более $0,22 \text{ А/см}^2$. Минимальное значение шероховатости поверхности (Ra до $0,031 \text{ мкм}$) достигается при использовании режима с наименьшим значением плотности тока – $0,12 \text{ А/см}^2$ (напряжение 300 В, температура электролита – $90 \text{ }^\circ\text{C}$).

Определено, что наиболее приемлемое сочетание характеристик поверхности кобальт-хромового сплава обеспечивается в результате обработки продолжительностью 2 мин. При этом формируется гладкая поверхность без царапин, образуемых в результате предварительного шлифования, и рельефных выступов, а также снижается шероховатость до $Ra 0,057 \text{ мкм}$ и существенно повышается коэффициент отражения поверхности (до 0,7).

Список использованных источников

1. Cobalt-chromium alloys in fixed prosthodontics in Sweden / M. Kassapidou [et al.] // Acta Biomaterialia Odontologica Scandinavica. – 2017. – Vol. 3, iss. 1. – P. 53–62. <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>
2. Высокие технологии на службе отечественной медицины / В. Минченя [и др.] // Наука и инновации. – 2018. – №5 (183). – С. 21–23.
3. Surface properties and corrosion behavior of Co–Cr alloy fabricated with selective laser melting technique / Xianzhen Xin [et al.] // Cell Biochem. Biophys. – 2013. – Vol. 67. – P. 983–990. <https://doi.org/10.1007/s12013-013-9593-9>
4. The effect of microstructure on the wear of cobalt-based alloys used in metal-on-metal hip implants / R. Varano [et al.] // Proc. IME H.J. Eng. Med. – 2006. – Vol. 220, iss. 2. – P. 145–159. <https://doi.org/10.1243/09544119jeim110>
5. Alvarez, E. Surface Damage in Retrieved Total Knee Replacement Femoral Components / E. Alvarez. – Clemson: Clemson Univ., 2012. – 222 p.
6. Жулев, Е. Н. Несъемные протезы. Теория, клиника и лабораторная техника / Е. Н. Жулев. – М.: Мед. информ. агентство, 2010. – 488 с.
7. 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>
8. Особенности электролитно-плазменного нагрева при электрохимико-термической обработке стали / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2013. – №6. – С. 20–24.
9. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH 2006: Proceeding of the Abstracts of 14th International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 October 2006. – Trnava, 2006. – P. 6.
10. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т / И. В. Фомихина [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – №3. – С. 24–29.
11. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2012. – №3. – С. 3–6.

12. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника – 2017. – № 5. – С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>
13. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. – 2018. – № 3. – С. 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>

References

1. Kassapidou M., Stenport V., Hjalmarsson L., Johansson C. Cobalt-chromium alloys in fixed prosthodontics in Sweden. *Acta Biomaterialia Odontologica Scandinavica*, 2017, no. 3, iss. 1, pp. 53–62. <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>
2. Minchenya V., Aliakseyeu Yu., Olgomets I., Avtushko A. High Technologies in the service of domestic medicine. *Nauka i innovatsii = Science and Innovation*, 2018, no. 5 (183), pp. 21–23 (in Russian).
3. Xian-zhen Xin, Jie Chen, Nan Xiang, Bin Wei. Surface properties and corrosion behavior of Co–Cr alloy fabricated with selective laser melting technique. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 2013, vol. 67, pp. 983–990. <https://doi.org/10.1007/s12013-013-9593-9>
4. Varano R., Boby J. D., Medley J. B., Yue S. The effect of microstructure on the wear of cobalt-based alloys used in metal-on-metal hip implants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2006, vol. 220, iss. 2, pp. 145–159. <https://doi.org/10.1243/09544119jeim110>
5. Alvarez E. *Surface Damage in Retrieved Total Knee Replacement Femoral Components*. Clemson, Clemson Univ., 2012. 222 p.
6. Zhulev E. N. *Fixed Prostheses. Theory, Clinic and Laboratory Equipment*. Moscow, Medical Information Agency, 2010. 488 p. (in Russian).
7. Zeidler H., Boettger-Hiller F., Edelmann J., Schubert A. Surface finish machining of medical parts using plasma electrolytic polishing. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 49, pp. 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>
8. Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E. Characteristics of electrolytic-plasma heating at electrochemical-heat treatment of steel. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2013, vol. 6, pp. 20–24 (in Russian).
9. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. 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, 2006, p. 6.
10. Fomikhina I. V., Lisovskaya Yu. O., Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S. Effect of electrolytic-plasma treatment on the structure and properties of the surface layer of authentic stainless steel. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2008, vol. 3, pp. 24–29 (in Russian).
11. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E. Model of metal removal in electrolytic-plasma treatment of the cylindrical surfaces. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2012, vol. 3, pp. 3–6 (in Russian).
12. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E. Electrolyte-plasma treatment under non-stationary mode in a high-gradient electric field. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2017, vol. 5, pp. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399> (in Russian).
13. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitski A. S. Electrolyte-Plasma Polishing of Titanium and Niobium Alloys. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2018, vol. 3, pp. 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219> (in Russian).

Информация об авторах

Алексеев Юрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, генеральный директор – проректор по производственной деятельности, Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (ул. Я. Коласа, 24, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: y.aliakseyeu@bntu.by

Королёв Александр Юрьевич – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательским сектором перспективных технологий, Государственное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (ул. Я. Коласа, 24, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korolyov@park.bntu.by

Нисс Владимир Семёнович – кандидат технических наук, доцент, заведующий инновационно-производственным центром медицинского оборудования и изделий, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: niss@park.bntu.by

Information about the authors

Yuri G. Aliakseyeu – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, General Manager – Vice-rector on production activity, State Enterprise “Scientific and Technological Park BNTU “Polytechnic” (24, Ya. Kolas Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alekseev@icm.by

Aleksandr Yu. Korolyov – Ph. D. (Engineering), Head of Prospective Technologies Department, State Enterprise “Scientific and Technological Park BNTU “Polytechnic” (24, Ya. Kolas Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korolyov@park.bntu.by

Vladimir S. Niss – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Head of the Innovation and Production Center of Medical Equipment and Products, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: niss@park.bntu.by