

УДК 54.066:54-126

DOI: 10.17223/24135542/6/2

Г.В. Лямина^{1,2}, Ю.А. Зыкова², Е.П. Князева³

¹ *Томский политехнический университет (г. Томск, Россия)*

² *Томский государственный университет (г. Томск, Россия)*

³ *Томский государственный педагогический университет (г. Томск, Россия)*

Применение полимерного геля как модельной среды для оценки коррозионной устойчивости металлов

Проведена оценка возможности использования гелей на основе метакриловых сополимеров для оценки коррозионной устойчивости сплавов ВТ1-0 и ВТ6 с покрытиями из SiC, TiB₂, ZrO₂. Коррозионную устойчивость оценивали двумя способами: контроль морфологии поверхности сплавов до и после контакта с гелями и расчёт токов коррозии в ячейках с полимерным электролитом. Показано, что SiC увеличивает устойчивость сплавов к электрохимической коррозии, ZrO₂ и TiB₂ увеличивает устойчивость к химической коррозии ВТ6.

Ключевые слова: *титановые сплавы; коррозионная устойчивость; полимерный гель; электрохимия.*

В современной медицине широко используются металлы и сплавы для постоянной замены поврежденных участков костной ткани или для ее временной фиксации. Большую часть применяемых имплантатов изготавливают из титана и титановых сплавов. Этот выбор обусловлен высокой биосовместимостью, низким модулем упругости, низкой теплопроводностью, меньшим, по сравнению со сталью, удельным весом, хорошей коррозионной стойкостью в большинстве сред [1–3].

Перед введением в эксплуатацию необходимо протестировать ряд ключевых характеристик материалов, одной из которых является коррозионная устойчивость. Все коррозионные испытания медицинских сплавов проводят в растворах, близких по составу жидкой среде в организме человека, например хлорид натрия [4–7], раствор Рингера [8–9]. Однако условия реальной эксплуатации таких материалов предполагают их контакт как с жидкой средой, так и с мышечной тканью, костной тканью, полимерными молекулами. В простейшем случае такую среду можно представить как гель: жидкость, распределенная в каркасе твердого тела. Реакции в гелях принципиально отличаются от таковых в растворах: затруднение отвода продуктов окисления сплава, возможная каталитическая активность продуктов взаимодействия металла со средой и, как следствие, протекание дополнительных реакций, сильные кооперативные эффекты между функциональными группами полимеров и компонентов среды [10–13]. В связи с этим целесообразно коррозионные испытания медицинских металлов и

сплавов проводить, в том числе в среде гелей, помимо растворов. Мы предлагаем для этих целей использовать гель на основе метакриловых сополимеров, наполненных полиэтиленгликолем [12, 13]. Такой гель хорошо формуется в пленки, удобные для использования в анализе, которые за счет адгезии хорошо крепятся к поверхности исследуемого металла.

Целью данной работы является оценка возможности использования гель-электролитов на основе метакриловых сополимеров для оценки коррозионной устойчивости титана и титановых сплавов (BT1-0, BT6), используемых в медицине.

Экспериментальные методики

В качестве объектов исследования были выбраны: чистый технический титан BT 1-0, титановый сплав BT6, и BT1-0, BT6 с покрытиями из тугоплавких соединений (TiB_2 , SiC, ZrO_2) толщиной 30–35 мкм, полученными с помощью электровзрывного легирования [14, 15].

Для получения гелей использовали: метилметакрилат (ММА), метакриловую кислоту (МАК), полиэтиленгликоль (ПЭГ) и трифторуксусную кислоту в соотношении 25, 12,5, 50 и 12,5 % масс, соответственно. В качестве инициатора использовали перекись бензоила. Полимерные гели синтезировали методом радикальной полимеризации при 70°C в течение 24 часов. Полимерные пленки получали термопрессованием гелей при температуре 60°C по методике, описанной в [8].

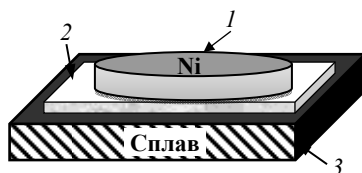


Рис. 1. Двухэлектродная ячейка: вспомогательный электрод (1); рабочий электрод (3); полимерный гель-электролит (2)

Коррозионную устойчивость с использованием гелей проводили двумя способами. Первый способ заключался в контроле морфологии поверхности сплавов до и после адгезионного контакта с полимерными гелями. Для этого полимерные пленки (5×5 мм) помещали на поверхность сплавов на 7 сут и на месяц. Для контроля изменений состояния поверхности сплавов использовали метод оптической металлографической микроскопии (МЕТАМ РВ-21-1).

Второй способ – это расчёт потенциалов и токов коррозии из поляризационных кривых. Для этого использовали ячейку специальной конструкции (рис. 1). В качестве электролита применяли полимерную пленку толщиной около 1 мм и размером 21×11 мм; индикаторного (рабочего) электрода – исследуемый титановый сплав (площадью $S = 165 \text{ мм}^2$); вспомогательного электрода – никелевый диск ($S = 572 \text{ мм}^2$). Кривые регистрировали в режи-

ме циклической вольтамперометрии при помощи полярографа ПУ-1 с интерфейсным блоком «GrafIt». Катодную развертку потенциалов осуществляли в диапазоне от 0,5 до $-1,5$ В, анодную от $-1,5$ до 1,0 В со скоростью развертки потенциалов 10 мВ/с. Вспомогательный электрод перед каждым измерением зачищали мелкозернистой шкуркой с последующей промывкой в растворе аммиака. Потенциалы и токи коррозии рассчитывали по методике, представленной в [16]. Для всех исследуемых сплавов регистрировали четыре последовательные ЦВА кривые.

Результаты и их обсуждение

После удаления полимерных гелей с поверхностей образуется четкая граница, разделяющая на металле области, где находилась пленка и, соответственно свободный участок [17]. Можно использовать изменения этой границы для идентификации изменений, проходящих на границе раздела гель – металл.

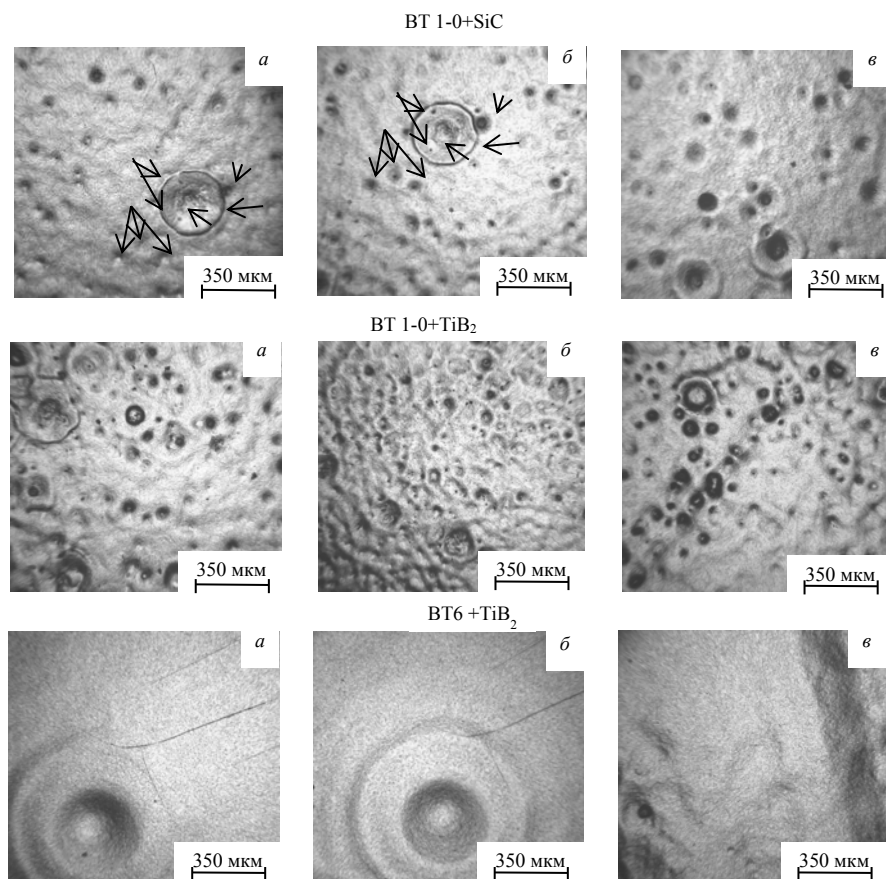


Рис. 2. Оптические изображения титановых образцов до нанесения полимерного геля (а); после нанесения полимерного гелей на 7 суток (б); на месяц (в)

Однако, в случае исследуемых в данной работе образцов, удобнее вести наблюдения по изменению морфологии поверхности, в частности по изменению формы кратеров и микровключений, которые появляются на поверхности металла после легирования. На рис. 2 представлены оптические изображения некоторых образцов в исходном состоянии (см. рис. 2, *а*) после воздействия полимерного геля в течении 7 сут (см. рис. 2, *б*) и месяца (см. рис. 2, *в*).

Т а б л и ц а 1

Значения наклонов Тафеля (*b*) катодных ветвей, токов и потенциалов коррозии титановых сплавов, рассчитанные для четырех последовательных ЦВА кривых

Сплав	№	$I_{корр}$, мкА	$E_{корр}$, мВ	b , В	Сплав	№	$I_{корр}$, мкА	$E_{корр}$, мВ	b , В
BT1-0	1	16,8±0,2	-196±7	0,675	BT6	1	17,8±0,8	-388,6±0,7	0,689
	2	16,7±0,3	-222±4	0,751		2	19±0,8	-442,9±0,9	0,692
	3	18,4±0,6	-222,6±0,9	0,776		3	22,2±0,3	-512,2±0,3	0,690
	4	17,5±0,5	-226±2	0,778		4	24,6±0,3	-573,2±0,4	0,683
BT1-0+SiC	1	12,3±0,4	-108±3	0,419	BT6+ SiC	1	11,8± 0,4	-443,8±0,3	0,475
	2	13,3±0,6	-100±5	0,416		2	21,7± 0,5	-565,8± 0,4	0,465
	3	15,2±0,5	-117±4	0,410		3	28,4± 0,4	-597±1	0,457
	4	14,3±0,5	-141±2	0,417		4	29±1	-613±2	0,454
BT1-0+ ZrO ₂	1	24,1±0,6	-233±2	0,454	BT6+ TiB ₂	1	22,5±0,8	-286±2	0,587
	2	24,3±0,5	-222±2	0,448		2	25,6±0,7	-350±2	0,535
	3	26,2±0,3	-235±1	0,443		3	32,5±0,5	-441,7±0,9	0,520
	4	29,1±0,9	-240,2±0,3	0,456		4	37,1±0,7	-556±1	0,526
BT1-0+ TiB ₂	1	142±2	-771±2	0,476	BT6+ ZrO ₂	1	103,9±0,8	-731,3±0,7	0,513
	2	142,7±0,9	-772±3	0,470		2	117,2±0,4	-755±3	0,505
	3	154,2±0,8	-785±3	0,469		3	126,4±0,4	-758±2	0,498
	4	155±1	-784,3±0,5	0,465		4	128,1±0,8	-767,2±0,5	0,500

По степени воздействия полимерного геля на поверхность, металлы можно разделить на три группы. Первая группа, это металлы, изменение морфологии поверхности которых заметны после 7 сут воздействия геля. На поверхностях этой группы сплавов наблюдается удаление точечных темных микровключений, увеличение и углубление «кратеров», а также увеличение четкости очертаний границ наплавов. В эту группу входят сплавы BT1-0, BT1-0+TiB₂ (см. рис. 2) и BT6+SiC. Вторая группа, это сплавы, для которых изменения становятся более явными спустя месяц после контакта с гелями. В эту группу входят сплавы BT6, BT1-0+SiC (см. рис. 2) и BT1-0+ZrO₂. Поверхность третьей группы сплавов практически не изменилась после эксперимента. В эту группу входят сплавы BT6+ZrO₂, BT6+TiB₂ (см. рис. 2). Очевидно, что эти группы можно использовать для классификации данных материалов по степени коррозионной устойчивости.

На втором этапе исследований были изучены поляризационные кривые сплавов на фоне полимерного геля для оценки их коррозионной устойчивости в режиме циклической вольтамперометрии. Результаты расчетов потенциалов, токов коррозии, наклона Тафеля b для катодных кривых в интервале потенциалов от -0,8 до -1 В приведены в табл. 1. В общем случае, сравнивая токи коррозии сплавов до и после легирования, можно отметить,

что модифицирование поверхности металлов эффективно сказывается только при использовании карбида кремния. Судя по значениям потенциалов коррозии поверхность металлов при модификации меняется значительно. Особенно это заметно при модификации BT1-0 боридом титана и BT6 оксидом циркония, потенциалы в этом случае смещаются в более электроотрицательную область почти на 500 мВ.

Показательным в данном исследовании является также изменение токов коррозии при последовательной регистрации (рис. 3). Руководствуясь данными значениями исследуемые металлы можно разделить на две группы.

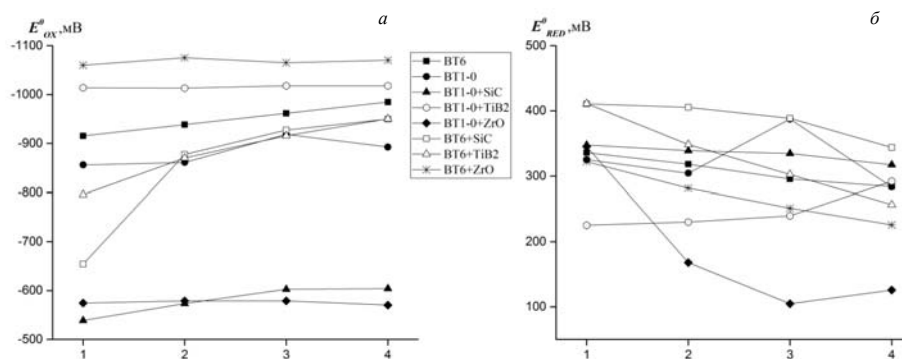


Рис. 3. Изменение значений равновесных потенциалов окислителя (а) и восстановителя (б) для титановых сплавов в ходе 4 последовательных регистрации ЦВА кривых

Первая группа – сплавы более стойкие к электрохимической коррозии. Это образцы, для которых потенциалы и токи коррозии не меняются в процессе последовательной регистрации нескольких кривых. Более того, значения токов, характеризующие скорость коррозии, для этой группы металлов меньше, чем для остальных сплавов. В эту группу попадают сплавы на основе легированного BT1-0, BT1-0+SiC, BT1-0+ZrO₂.

Ко второй группе относятся образцы, для которых значение силы тока коррозии растет, а потенциал коррозии сдвигается в область более электроотрицательных значений. Это сплавы BT1-0+TiB₂, BT6, BT6+SiC, BT6+TiB₂, BT6+ZrO₂. Они являются наиболее электрохимически активными, а, следовательно, наименее стойкими к электрохимической коррозии. При этом, значения $I_{корр}$ для BT1-0+TiB₂ и BT6+ZrO₂ на порядок выше значений для всех остальных сплавов.

Тугоплавкие покрытия (SiC, TiB₂, ZrO₂) являются керамикой, которая в свою очередь имеет высокую коррозионную устойчивость, следовательно, покрытие данными соединениями должно увеличивать стойкость к коррозии титановых сплавов. Однако, при методе электровзрывного легирования в зоне оплавления происходит перераспределение легирующих элементов, образуется ряд фаз более или менее прочных на глубине, в нашем случае, 30–35 мкм [14, 15]. Таким образом, полностью данные тугоплавкие

соединение не покрывают титановую подложку и не препятствует выходу ионов титана из кристаллической решетки на поверхность металла, а затем и в объем полимерного геля.

В процессе поляризации меняется скорость разрядки электролита. Более точный вывод о механизме восстановления окислителя дает наклон Тафеля (см. табл. 1). Возрастание значения коэффициента Тафеля свидетельствует об увеличении доли металлической составляющей на поверхности материала. Здесь модификация поверхности сыграла преимущественно положительную роль, так как скорости разрядки электролита на таких поверхностях ниже. Для сплавов, у которых наклон Тафеля уменьшается, снижается и скорость разрядки электролита в данном интервале изменения потенциалов, например для ВТ6, легированного карбидом кремния.

Сравнивая результаты, полученные при изучении химической и электрохимической коррозии, можно отметить, что устойчивость к химической коррозии не всегда совпадает с таковой в условиях внешней поляризации. Например, модификация сплава ВТ6 оксидом циркония увеличивает стойкость к химической коррозии, но существенно увеличивает значения токов коррозии этого сплава на фоне полимерного геля.

На основании вышеизложенного можно предложить основу для создания методики тестирования на коррозионную устойчивость сплавов, использующихся в медицинских целях, при помощи полимерных гелей. Гель в своем составе имеет функциональные группы, подобные тем, что находятся в организме человека. За счет присутствия жидкой среды в матрице состав геля можно менять, вводя в матрицу компоненты, необходимые для реальных условий эксплуатации. За счет адгезии пленки полимерного геля легко крепятся к поверхности металлического образца, что позволяет локализовать участок для исследования и проводить изучение поверхности любой формы и размера.

Выводы

1. При анализе оптических изображений исследуемых сплавов показано, что легирование поверхности сплава ВТ1-6 боридом титана и оксидом циркония увеличивает стойкость поверхности металла к химической коррозии.

2. Установлено, что использование борида титана для легирования поверхности титана ВТ1-0 и оксида циркония для ВТ6 снижает устойчивость металлов к электрохимической коррозии.

3. На основании анализа последовательных поляризационных кривых выявлено, что карбид кремния и оксид циркония увеличивают стойкость ВТ1-0 к длительной электрохимической коррозии.

Литература

1. Hidetomi Terai, Hiromitsu Toyoda, Akinobu Suzuki. A new corrective technique for adolescent idiopathic scoliosis: convex manipulation using 6.35 mm diameter pure titanium

- rod followed by concave fixation using 6.35 mm diameter titanium alloy // *Scoliosis*. 2015. № 10.
2. David F. Williams Titanium for Medical Applications // *Titanium in Medicine*. 2001. P. 13–24.
 3. Yong Luo, Li Yang, Maocai Tian. Application of biomedical-grade titanium alloys in trabecular bone and artificial joints // *Biomaterials and Medical Tribology*. 2013. P. 181–216.
 4. Mathew T. Mathew, Joshua J. Jacobs, Markus A. Wimmer Wear-Corrosion Synergism in a CoCrMo Hip Bearing Alloy Is Influenced by Proteins // *Clinical Orthopedics Related Research*. 2012. Vol. 470, № 11. P. 3109–3117.
 5. Lars C. Fitjer, Irmtrud E. Jonas, Heinrich F. Kappert Corrosion Susceptibility of Lingual Wire Extensions in Removable Appliances // *Journal of Orofacial Orthopedics*. 2002. Vol. 63, № 3. P. 212–226.
 6. Claire Manaranche, Helga Hornberger. A proposal for the classification of dental alloys according to their resistance to corrosion // *Dental Materials*. 2007. Vol. 23, № 11. P. 1428–1437.
 7. Masao Yoshinari, Shinobu Uzawa, Yataro Komiyama. Hybrid framework with cobalt–chromium alloy and gold cylinder for implant superstructure: Bond strength and corrosion resistance // *Journal of Prosthodontic Research*. 2016. Vol. 60, № 4. P. 274–281.
 8. Амирханова Н.А., Хасанов А.Р. Потенциодинамические и коррозионные исследования новых перспективных титановых сплавов с добавлением молибдена // *Вестник УГАТУ*. 2014. Т. 19, № 1. С. 85–91.
 9. Ильин А.А., Гусев Д.Е., Чернышова Ю.В. и др. Исследование коррозионной стойкости биоматериалов на основе титана и никелида титана // *Технология легких сплавов*. 2007. № 3. С. 123–130.
 10. Dubinina O.V., Mokrousov G.M., Lyamina G.V. Application of polymer gel-electrolytes for cleaning and restoration of steel objects // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040. P. 8–12.
 11. Изаак Т.И., Лямина Г.В., Мокроусов Г.М. Структура и свойства гель-электролитов на основе метакрилового сополимера // *Высокомолекулярные соединения*. 2005. Т. 47, № 11. С. 56–61.
 12. Лямина Г.В., Камчатная О.В., Акимов О.Л. и др. Полимерный гель-электролит как среда очистки восстановления и травления поверхности металла // *Бутлеровские сообщения*. 2011. Т. 24, № 2. С. 51–57.
 13. Камчатная О.В., Лямина Г.В., Тайыбов А.Ф. и др. Применение полимерных гелей для очистки поверхности стали от продуктов коррозии // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2011. Т. 54, № 9. С. 64–68.
 14. Иванов Ю.Ф., Карпий С.В., Морозов М.М., Коваль Н.Н., Будовских Е.А., Громов В.Е. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки. Новокузнецк : НПК, 2010. 173 с.
 15. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Соскова Н.А. и др. Фазовый состав поверхности технически чистого титана ВТ1-0 после электровзрывного карбоборирования // *Обработка металлов*. 2012. № 1. С. 77–80.
 16. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стереотип. М. : Альянс, 2006. 472 с.
 17. Зыкова, Ю.А., Лямина Г.В. Применение полимерного геля для оценки коррозионной устойчивости титановых сплавов // *Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении : сб. трудов Междунар. конф., г. Томск, 9–11 июня 2016 г.* С. 50–54.

Авторский коллектив:

Лямина Галина Владимировна, доцент Томского политехнического университета, с.н.с. Томского государственного университета (г. Томск, Россия). E-mail: lyamina@tpu.ru

Зыкова Юлия Александровна, студентка Томского политехнического университета (г. Томск, Россия). E-mail: zyкова_j@mail.ru

Князева Елена Петровна, доцент Томского государственного педагогического университета (г. Томск, Россия). E-mail: kena00@mail.ru

Tomsk State University Journal of Chemistry, 2016, 4 (6), 22-30. DOI: 10.17223/24135542/6/2

G.V. Lyamina^{1,2}, Yu.A. Zyкова², E.P. Knyazeva³

¹*Tomsk State University (Tomsk, Russia)*

²*Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)*

³*Tomsk State Pedagogical University (Tomsk, Russia)*

Polymer gel as a model to evaluate the corrosion protection of metals' stability

Corrosion testing of some medical alloys is carried out in solutions that have a similar composition to some liquid medium in the human body. However, if these alloys are located in a production environment they come in contact with not only some liquid medium but polymeric molecules, muscle tissue, and bone tissue. We can conceive of the environment as a gel: some liquid is distributed into the solid framework. The gel involves the functional groups that are similar to those in humans. The presence of a liquid phase in the polymer gel allows involving different modifiers in the polymer matrix and varying them over a wide range and changes in properties. The polymer film can be fixed on the surface with any shape and size due to adhesion.

The work investigated the possibility of using gels based on methacrylic copolymers for evaluating the corrosion resistance of commercially pure titanium of the brand VT 1-0 and the alloy of the brand VT6 with some coatings of SiC, TiB₂, and ZrO₂.

There are two techniques for the evaluation of corrosion resistance:

The first method is to test some morphological changes on the alloy surface after contact with the gel over 7 days and months. It can be traced by observing some changes in the craters' shape and microformations that are present on the metal surface after doping.

Based on our results, we divided the metals into three groups according to their chemical corrosion resistance in the gel. The first group is metals that changed in surface morphology after 7 days' exposure to the gel. We could observe the removal of dark micropoint, the increase and deepening of some craters, and a more distinct appearance of the boundaries of built-up layers on the alloys' surfaces. This group included VT1-0, VT1-0 doped with TiB₂, and VT6 doped with SiC. The second group of alloys had the same changes in morphology after a month. This group included the alloys VT6, VT1-0 doped with SiC and VT1-0 doped with ZrO₂. On the surfaces of the alloys of the third group, some changes were absent after the exposure. This group included alloys VT6 doped with ZrO₂ and VT6 doped with TiB₂.

The second technique is to register corrosive charts in a cell where the polymer gel is used instead of a liquid.

The corrosion currents of the metals before and after the doping showed that the modification of metal surfaces was high-performance only for silicon carbide. It was found that the use of titanium boride for doping the VT1-0 surface and zirconium oxide for doping the VT6 both reduced metal resistance to galvanic corrosion. The analysis of consecutive polarization curves revealed that the resistance to prolonged electrochemical corrosion of VT1-0 increased if we use silicon carbide and zirconium oxide as a coating for covering.

Keywords: titanium alloy; corrosion resistance; polymeric gel; corrosion resistance test.

References

1. Hidetomi Terai, Hiromitsu Toyoda, Akinobu Suzuki A new corrective technique for adolescent idiopathic scoliosis: convex manipulation using 6.35 mm diameter pure titanium rod followed by concave fixation using 6.35 mm diameter titanium alloy. *Scoliosis*. 2015;10
2. David F. Williams Titanium for Medical Applications. *Titanium in Medicine*. 2001;13-24
3. Yong Luo, Li Yang, Maocai Tian Application of biomedical-grade titanium alloys in trabecular bone and artificial joints. *Biomaterials and Medical Tribology*. 2013;181-216
4. Mathew T. Mathew, Joshua J. Jacobs, Markus A. Wimmer Wear-Corrosion Synergism in a CoCrMo Hip Bearing Alloy Is Influenced by Proteins. *Clinical Orthopedics Related Research*. 2012;470(11):3109-3117
5. Lars C. Fitjer, Irntrud E. Jonas, Heinrich F. Kappert Corrosion Susceptibility of Lingual Wire Extensions in Removable Appliances. *Journal of Orofacial Orthopedics*. 2002;63(3):212-226
6. Claire Manaranche, Helga Hornberger A proposal for the classification of dental alloys according to their resistance to corrosion. *Dental Materials*. 2007;23(11):1428-1437
7. Masao Yoshinari, Shinobu Uzawa, Yataro Komiyama Hybrid framework with cobalt-chromium alloy and gold cylinder for implant superstructure: Bond strength and corrosion resistance. *Journal of Prosthodontic Research*. 2016;60(4):274-281
8. Amirkhanova N.A., Khasanov A.R. Potentsiodinamicheskie I korrozionnye issledovaniya novykh perspektivnykh titanovykh splavov s dobavleniem molibdena. Vestnik UGATU. 2014;19(1):85-91. In Russian
9. Il'in A.A., Gusev D.E., Chernyshova Yu.V. I dr. Issledovanie korrozionnoy stoykosti biomaterialov na osnove titana I nikelida titana. Tekhnologiya legkikh splavov. 2007;3:123-130. In Russian
10. Dubinina O.V., Mokrousov G.M., Lyamina G.V. Application of polymer gel-electrolytes for cleaning and restoration of steel objects. *Advanced Materials Research*. 2014;1040:8-12.
11. Izaak T.I., Lyamina G.V., Mokrousov G.M. Struktura I svoystva gel-elektrolitov na osnove metakrilovogo sopolimera. Vysokomolekulyarnye soedineniya. 2005;47(11):56-61. In Russian
12. Lyamina G.V., Kamchatnaya O.V., Akimova O.L. I dr. Polimernyy gel-elektrolit, kak sreda ochistki vosstanovleniya I travleniya poverkhnosti metalla. Butlerovskie soobshcheniya. 2011;24(2):51-57. In Russian
13. Kamchatnaya O.V., Lyamina G.V., Taiybov A.F. I dr. Primenenie polimernykh geley dlya ochistki poverkhnosti stali ot produktov korrozii. Izvestiya vyschikh uchebnykh zavedenii. Fizika. 2011;54(9):64-68. In Russian
14. Ivanov Yu.F., Karpiy S.V., Morozov M.M., Koval' N.N., Budovskikh E.A., Gromov B.E. Struktura, fazoviy sostav I svoystva titana posle elektrovzryvnogo legirovaniya I elektronno-puchkovoy obrabotki. Novokuznetsk: NPK. 2010;173. In Russian
15. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Soskova N.A. I dr. Fazoviy sostav poverkhnosti tekhnicheskhi chistogo titana VT1-0 posle elektrovzryvnogo karboborirovaniya. Obrabotka metallov. 2012;1:77-80. In Russian
16. Zhuk N.P. Kurs teorii korozii I zashchity metallov: Uchebnoe posobie dlya vuzov. 2 izd. Moscow.: LTD TID "Al'yans". 2016;472. In Russian
17. Zykova Yu.A., Lyamina G.V. Primenenie polimernogo gelya dlya otsenki korrozionnoy ustoychivosti titanovykh splavov [Elektronnyi resurs]. Materialy I tekhnologii novykh pokoleniy v sovremennom materialovedenii: sbornik trudov Mezhdunarodnoy konf. Tomsk. 9-11 june 2016; 50-54. In Russian

Information about authors:

Lyamina Galina V., Senior Researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russia), Docent, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). E-mail: lyamina@tpu.ru

Zykova Yuliya A., student, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). E-mail: mail-to:zykova_j@mail.ru

Knyazeva Elena P., Docent, Tomsk State Pedagogical University (Tomsk, Russia). E-mail: mail-to:kena00@mail.ru