

- ской системой // Строительство и техногенная безопасность. – 2021. – № 22 (74). – С. 91–100.
17. Abdali L.M., Issa H.A., Ali Q.A., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. Analysis and simulation off-grid pv panels by using matlab/simulink environment // Construction and industrial safety. – 2021. – № 21. – P. 73.
 18. Abdali L.M., Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A. Simulation of a model photovoltaic power system to generate electricity. – 2019. – 234–240.
 19. Kuvshinov V.V., Abd Ali L.M., Morozova N.V., Krit B.L., Al-Rufae F.M., Issa H.A. Experimental studies on receiving surfaces of flat solar collectors // Surface engineering and applied electrochemistry. – 2021. – № 57. – P. 715–720.
 20. Исса Х.А., Абдали Л.М., Аль-Малики М.Н., Якимович Б.А., Кувшинов В.В. Разработка гибридной системы для уличного освещения в программе MATLAB // Возобновляемые источники энергии и приоритеты научно-технологического развития энергетики России. – 2022. – Р. 66–77.
 21. Абдали Л.М., Аль-Руфай Ф.М., Исса Х.А., Якимович Б.А. Моделирование и управление системой ветроэнергетики, связанной с сетью с использованием синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ) // Актуальные проблемы электроэнергетики. – 2021. – Р. 299–308.

Ли Цзе (Китай), Букал Владислав Романович (Россия)

Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: Твердохлебов Сергей Иванович, к.ф.-м.н., доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИЭФИРКЕТОНКЕТОНОВЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ТИ ПОДЛОЖКЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛЕНИЯ

Аннотация: В работе рассматривается новый метод создания покрытий для медицинских изделий. Целью работы являлась разработка биоинертных покрытий, потенциально предотвращающих развитие у пациентов аллергических реакций на титановые сплавы. Представлены результаты исследования микроструктуры поверхности образцов методом сканирующей электронной микроскопии и результаты расчета поверхностной энергии.

Ключевые слова: полиэфиркетонкетон, электрораспыление, покрытия, морфология, поверхностная энергия.

Введение

Полиарилэфиркетоны (ПАЭК) являются перспективными термопластичными полимерами. Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) достаточно хорошо исследован и применяется для 3Д-печати различных изделий, в частности, костных имплантатов, деталей для аэрокосмической техники и других ответственных узлов [1]. Полиэфиркетонкетон (ПЭКК) относится к группе ПАЭК и представляет собой новый высокопрочный полимер. ПЭКК обладает отличными механическими свойствами, химической стойкостью, термостойкостью и износостойкостью [1].

Титановые сплавы являются биоинертными и широко используются для изготовления имплантатов, но у некоторых пациентов возникают аллергические реакции на титановые медицинские изделия, поэтому на них в некоторых случаях необходимо делать защитные покрытия [2]. Следовательно, разработка новых биоинертных полимерных покрытий для титановых имплантатов является актуальной задачей.

Целью данной работы являлось формирование на поверхности Ti образцов ПЭКК покрытий методом электрораспыления.

Материалы и методы

Для приготовления растворов полимеров использовались ПЭКК (Kepstan[®], Arkema, Франция) и гексафторизопропанол ((CF₃)₂CHOH, ПиМ-Инвест, Россия). Растворы с содержанием 0,5, 1 и 1,5 вес. % готовились при комнатной температуре. В качестве подложек использовались титановые пластины VT1 размером 1×3 см, которые подвергались пескоструйной обработке на устройстве ТСС РК-100 (ТСС ЮФО, Пятигорск, Россия) зернами карбида кремния со средним размером зерна 370 мкм. Для нанесения покрытий использовалась установка электрораспыления NANON-01A (MECC Co, Япония) при следующих режимах: объем раствора 10 мл, напряжение между коллектором и иглой – 20 кВ, скорость расхода раствора – 5 мл/ч.

Были изготовлены 4 группы экспериментальных образцов, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Экспериментальные образцы

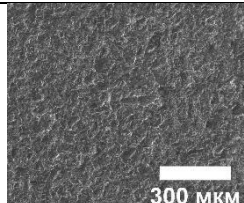
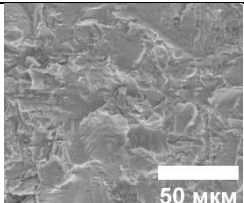
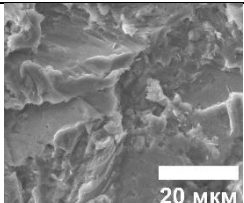
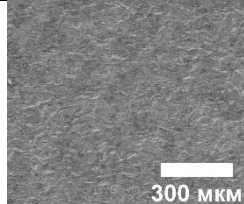
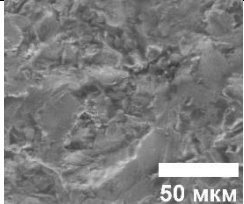
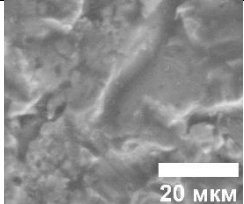
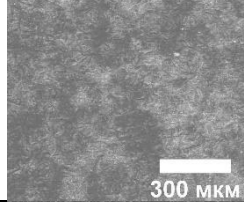
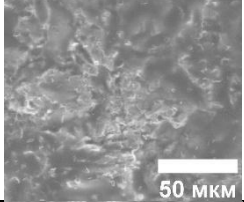
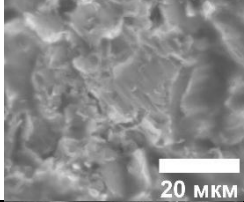
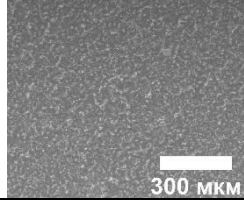
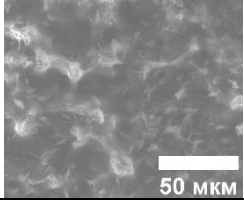
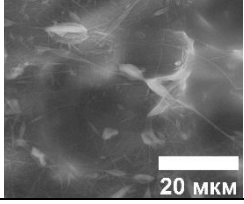
№ группы	1	2	3	4
Состав	Ti	Ti+0,5 % ПЭКК	Ti+1 % ПЭКК	Ti+1,5 % ПЭКК

Экспериментальная часть

Микроструктура поверхности образцов была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Quanta 200 3D (FEI, США). СЭМ-изображения поверхности образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2

СЭМ-изображения поверхности покрытия

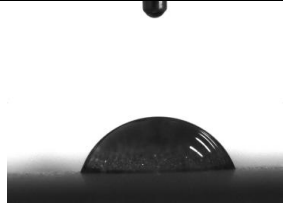
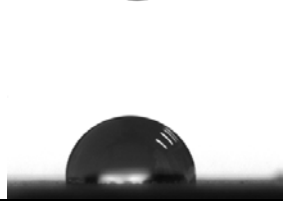
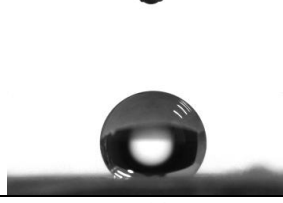
Группа	Увеличение		
	x300	x2000	x5000
1			
2			
3			
4			

Образцы всех групп с покрытием повторяют шероховатую морфологию исходной титановой подложки – группы сравнения. Значимым результатом является появление волокон и волокон с бусинками на поверхности покрытия 4 группы (Ti+1,5 % ПЭКК), которые могут существенно изменить свойства поверхности [3].

Исследования поверхностной энергии проводили на приборе для измерения краевого угла смачивания EasyDrop (DSA20E, KRÜSS GmbH, Гамбург, Германия) при комнатной температуре с использованием трех жидкостей: деионизированной воды (Solopharm, Санкт-Петербург, Россия), глицерина ($C_3H_8O_3$, 99,3 %, ЭКОС-1, Москва, Россия), диодометана (CH_2I_2 , 99 %, Acros Organics, Геел, Бельгия). Результаты исследований приведены в таблице 3 и на рисунке 1.

Таблица 3

Контактные углы смачивания различными жидкостями

Группа	Смачивающие жидкости и углы смачивания		
	Деионизированная вода	Глицерин	Дийодометан
1			
	$73,2 \pm 2,39^\circ$	$61,9 \pm 3,82^\circ$	$32,3 \pm 1,71^\circ$
2			
	$90,9 \pm 5,34^\circ$	$75,4 \pm 0,81^\circ$	$5,4 \pm 2,35^\circ$
3			
	$93,5 \pm 2,11^\circ$	$69,9 \pm 1,93^\circ$	$3,2 \pm 1^\circ$
4			
	$122,8 \pm 3,64^\circ$	$67,5 \pm 1,32^\circ$	0°

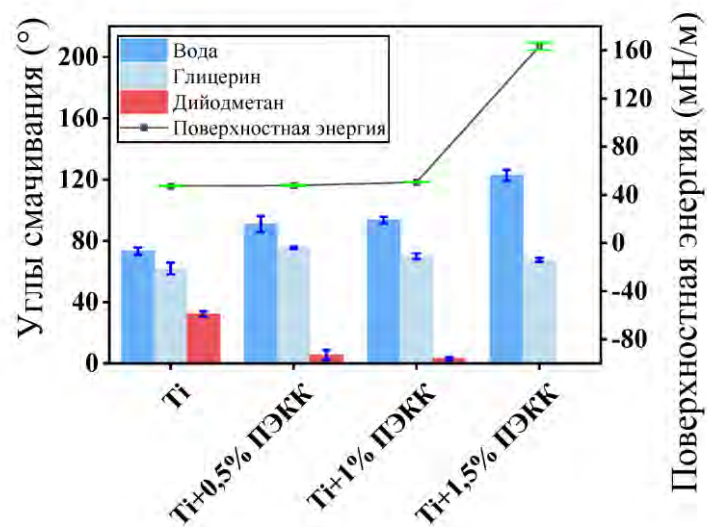


Рис. 1. Поверхностная энергия

Результаты анализа угла смачивания водой показывают, что гидрофильность различных покрытий значительно отличается: контактный угол увеличился на 24,2 %, 27,7 % и 67,8 % для групп 2, 3, 4 соответственно по сравнению с контрольной группой 1 (Ti). Значительное увеличение угла смачивания водой для группы 4 (Ti+1,5 % ПЭКК) приводит к тому, что поверхность образцов становится гидрофобной. Для различных типов имплантатов требуются поверхности с различной гидрофобностью и гидрофильностью, что влияет на адсорбцию и перемещение клеток [4].

Для расчета поверхностной энергии (Рис. 1) использовались результаты измерений контактных углов смачивания глицерином и дийодометаном. Поверхностная энергия группы 4 (Ti+1,5 % ПЭКК) значительно выше, чем у трех других групп. Это обстоятельство может быть объяснено результатами СЭМ-исследований, в соответствии с которыми на изображениях поверхности этой группы присутствуют волокна и волокна с бусинками, изменяющие смачиваемость и поверхностную энергию.

Заключение

1. Метод электрораспыления растворов полиэфиркетонкетона в гексафторизопропанолу при выбранных параметрах позволяет получать различную морфологию покрытий на титановых подложках.
2. Контактный угол смачивания водой по сравнению с контролем (Ti) увеличивается на 24,2 %, 27,7 % и 67,8 % для групп Ti+0,5 % ПЭКК Ti+1 % ПЭКК и Ti+1,5 % ПЭКК соответственно. Поверхностная энергия для этих групп увеличивается на 0,95 %, 6,66 % и 245,39 % соответственно.
3. Наличие волокна и волокна с бусинками в микроструктуре поверхности покрытий группы Ti+1,5 % ПЭКК, вероятно, является причиной значительного увеличения поверхностной энергии.

Список литературы

1. Garcia-Leiner M. et al. Characterization of polyaryletherketone (PAEK) filaments and printed parts produced by extrusion-based additive manufacturing // *Polymer international*. – 2021. – Т. 70. – №. 8. – С. 1128–1136.
2. Rossi S. M. P. et al. Ten-year outcomes of a nitrided Ti-6Al-4V titanium alloy fixed-bearing total knee replacement with a highly crosslinked polyethylene-bearing in patients with metal allergy // *The Knee*. – 2020. – Т. 27. – № 5. – С. 1519–1524.
3. Fong H., Chun I., Reneker D. H. Beaded nanofibers formed during electrospinning // *Polymer*. – 1999. – Т. 40. – № 16. – С. 4585–4592.
4. Tang X. et al. Influences of surface treatments with abrasive paper and sand-blasting on surface morphology, hydrophilicity, mineralization and osteoblasts behaviors of n-CS/PK composite // *Scientific reports*. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 568.