

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2019

© Тверской государственной
университет, 2019

ТРЕХМЕРНЫЕ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА И ГИДРОКСИАПАТИТА

О.Н. Мусская¹, В.К. Крутько¹, А.И. Кулак¹, О.А. Насань², С.С. Хвесеня², В.А. Добыш³,
В.А. Тарасевич³, Н.Л. Будейко¹, О.А. Сычева¹

¹ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

220072, Республика Беларусь, Минск, ул. Сурганова, 9/1

²Белорусский государственный университет

220030, Республика Беларусь, Минск, пр. Независимости, 4

³ГНУ «Институт химии новых материалов НАН Беларуси»

220141, Республика Беларусь, Минск, ул. Ф. Скорины, 36

musskaja@igic.bas-net.by

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.326

Аннотация: Методом послойного наплавления получены трехмерные модели на основе полилактида, содержащего 1 и 5% гидроксиапатита. Тестирование *in vitro* показало, что модифицирование поверхности полимерных моделей 4% гелем гидроксиапатита либо водной суспензией, содержащей 4% поливинилового спирта и 4% гидроксиапатита, позволяет улучшить биоактивные свойства таких материалов.

Ключевые слова: 3D печать, метод послойного наплавления, полилактид, гидроксиапатит, поливиниловый спирт.

1. Введение

Современный уровень развития аддитивных технологий открывает широкие возможности создания различных изделий со сложной архитектурой. В частности, в медицине 3D печать перспективна при получении как прототипов, так и готовых имплантатов, ориентированных на потребности конкретного пациента [1, 2]. В качестве расходных биосовместимых материалов для этих целей обычно используют термопластичные полимеры [3, 4], металлы [5] и композиты [6]. Среди полимеров при печати методом послойного наплавления широкое распространение получил полилактид, благодаря своей биосовместимости и биоразлагаемости [7]. Кроме того, известны также композиционные материалы на основе полилактида с модифицирующими компонентами (фосфатами кальция, оксидом графена и др.), [8, 9]. В частности, использование гидроксиапатита (ГА, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) в составе биоматериалов обусловлено не только его биосовместимыми свойствами, но и способностью стимулировать остеогенез в биоактивной гидратированной форме [10, 11]. Однако несмотря на многообразие таких материалов существуют проблемы, возникающие при введении новых компонентов и связанные, как с технологическими параметрами самой печати, так и с регулированием свойств готового изделия.

Целью данной работы являлось получение трехмерных моделей на основе полилактида и биоактивного ГА методом послойного наплавления,

а также изучение физико-химических и биоактивных свойств полученных композиционных материалов.

2. Методика эксперимента

Трехмерные модели с геометрической структурой согласно [12] получали в виде пористых цилиндров диаметром 1,0 см и варьируемой высотой от 0,3 до 1,1 см методом послойного наплавления с помощью 3D принтера Flashforge Dreamer. В качестве расходного материала использовали нити на основе поли-*L*-лактида (Ingeo 4043) и его композита с ГА. Композиционные нити, содержащие 1 и 5% порошка ГА в полилактидной матрице, вытягивали на портативном экструдере Noztek Pro (Великобритания) при 200 °С.

Напечатанные трехмерные полимерные модели обрабатывали 4% гелем ГА либо водной суспензией, содержащей 4% поливинилового спирта (ПВС, M_r 72000) и 4% ГА, при постоянном перемешивании в течение 30 мин. Образцы извлекали из суспензии, излишки которой удаляли на фильтровальной бумаге, затем высушивали при 60 °С в течение 1 ч. Обработку гелем ГА либо суспензией ПВС/ГА проводили в несколько циклов после высыхания каждого слоя. Максимальное число циклов модифицирования составило 10.

Синтез ГА осуществляли путем взаимодействия гидрофосфата аммония и хлорида кальция при соотношении Ca/P 1,67 в сильнощелочной водной среде (pH 10–11) при комнатной температуре (20 °С) по методике [13]. После созревания осадка в течение 1–10 сут и последующего его промывания до pH надосадочной жидкости 7,0–7,4 получали 4% гель ГА, который дополнительно концентрировали до 20% пасты, а затем высушивали при 60 °С и растирали до порошка с размером частиц менее 70 мкм.

Суспензию ПВС/ГА готовили путем смешивания 5% водного раствора ПВС и 20% пасты ГА при массовом соотношении компонентов 4:1 соответственно.

Рентгенофазовый анализ (РФА) полилактида и композиционных материалов на его основе проводили на дифрактометре ADVANCE D8 (Bruker, Германия) при $Cu_{K\alpha} = 1,5405 \text{ \AA}$. Дифференциальный термический анализ (ДТА) и термогравиметрию (ТГ) образцов проводили в воздушной атмосфере на совмещенном термическом анализаторе NETZSCH STA 409 PC LUXX (Германия); скорость нагрева составляла 5,0 °С/мин, масса навески – 21–80 мг. Пористость трехмерных полимерных моделей определяли по методу вытеснения жидкости [14].

Оценку биологической активности образцов проводили при их выдерживании в искусственной среде, имитирующей плазму крови человека (Simulated Body Fluid – SBF) [15], при 37 °С в течение 1 месяца. Раствор SBF готовили на водяной бане путем добавления к 500 мл дистиллированной воды в определенном порядке следующих компонентов: 1) 7,996 г $NaCl$, 2) 0,350 г $NaHCO_3$, 3) 0,224 г KCl , 4) 0,228 г $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$, 5) 0,305 г $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, 6) 40 мл 1 М HCl , 7) 0,278 г $CaCl_2$, 8) 0,071 г Na_2SO_4 , 9) 6,057 г $(CH_2OH)_3CNH_2$. Полученный раствор доводили дистиллированной водой до 1 л, поддерживая величину pH в диапазоне 7,20–7,45 путем добавления нескольких капель 1 М HCl .

3. Обсуждение результатов

Согласно данным РФА на рентгенограммах исходного полилактида (см. рис. 1 а) имеются как аморфные, так и кристаллические области, соответствующие L - и D -стереоизомерам полимера [16]. При введении кальцийфосфатной добавки в полилактидную нить на рентгенограмме проявляются рефлексы, характерные для аморфизированного ГА. Кроме того, наблюдается снижение интенсивности гало аморфной области полилактида и его смещение в область больших углов за счет текстурирования полимера при вытягивании нити.

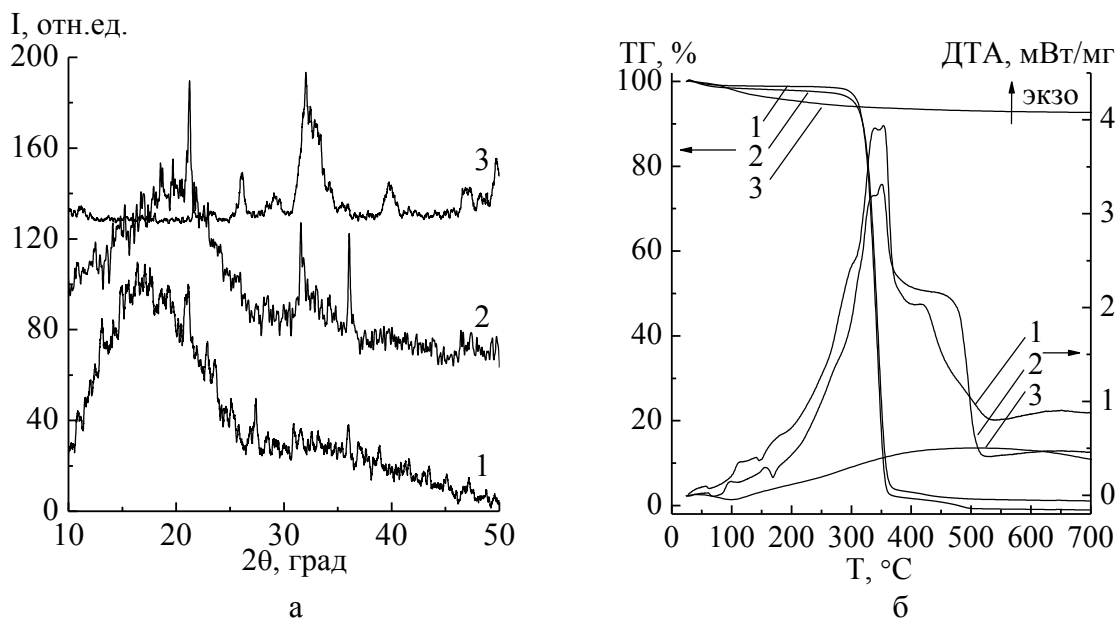


Рис. 1. Дифрактограммы (а) и кривые термического анализа (б): 1 – исходный полилактид; 2 – полилактидная нить, содержащая 5 % ГА; 3 – порошок ГА (60 °С).

Термический анализ исходной полилактидной нити (см. рис. 1 б) показал, что стеклование происходит при 60–90 °С. Затем полимер

переходит в пластичное состояние, а плавление происходит в температурном интервале 160–200°C. Деструкция полимера начинается около 305°C и сопровождается экзоэффектами при 333°C и 350°C, что подтверждает данные РФА (см. рис. 1 а) об аморфно-кристаллическом состоянии полимера. При аналогичных условиях съемки ГА остается термически стабильным (см. рис. 1 б), а незначительные потери массы в температурном интервале 50–200°C связаны с удалением кристаллогидратной воды и, как было ранее [10] нами показано, снижением степени биоактивности. Введение фосфата кальция в состав полимерной матрицы незначительно сдвигает температурные эффекты в низкотемпературную область. Однако при этом отмечается, что температура начала деструкции полимерной матрицы повышается. Вероятно, при непрерывном нагревании без резкого охлаждения ГА образует с полимером прочные структуры, деструкция которых затрудняется в отличие от полимера без наполнителя.

На микроскопических снимках сколов нитей видно, что фосфат кальция распределен, как непосредственно в полимерной матрице, так и в порах, образующихся при вытягивании нитей (см. рис. 2). Возникающие при этом дефекты приводят к нарушению регулярности химического строения полимерной цепи, что способствует снижению температуры плавления полилактида.

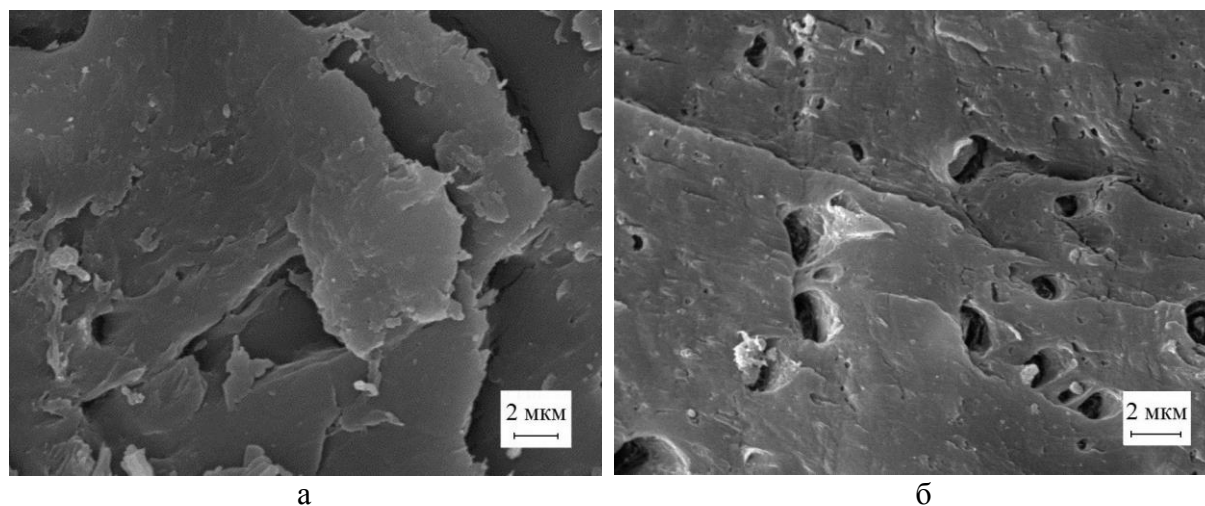


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения скола поверхности полилактидных нитей, содержащих 1% (а) и 5% ГА (б).

Таким образом, введение 1–5% ГА в состав полилактидной нити не приводит к заметному изменению физико-химических свойств полимера и поэтому при получении трехмерных образцов такими нитями требуется незначительная корректировка технологических параметров печати. Следует отметить, что напечатанные образцы хорошо воспроизводят

заданную компьютерную модель (см. рис. 3) и характеризуются пористостью 30 – 35 %.

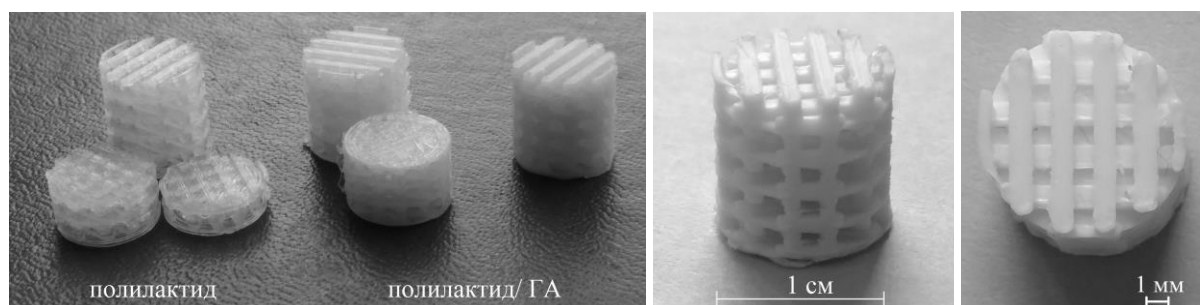


Рис. 3. Трехмерные модели на основе полилактида и его композита с ГА.

Обработка полимерных матриц гелем ГА позволяет модифицировать их поверхность биоактивным ГА (см. рис. 4 а). Отмечается, что при повышении числа циклов обработки гелем ГА от 1 до 10 содержание удерживаемого фосфата кальция возрастает линейно (достоверность аппроксимации R^2 составляет 0,995 – 0,998). Максимальный прирост массы (до 14%) наблюдается в случае матриц на основе полилактидной нити, содержащей 5% ГА. При модифицировании полимерных матриц суспензией ПВС/ГА наблюдается прирост массы по экспоненциальной зависимости (см. рис. 4 б). Следует отметить, что наличие полимерного связующего приводит к заполнению пор, что заметно уменьшает пористость (до 4 – 10%) трехмерных моделей и, соответственно, снижает их адсорбционные свойства (максимальный прирост массы – 9 %).

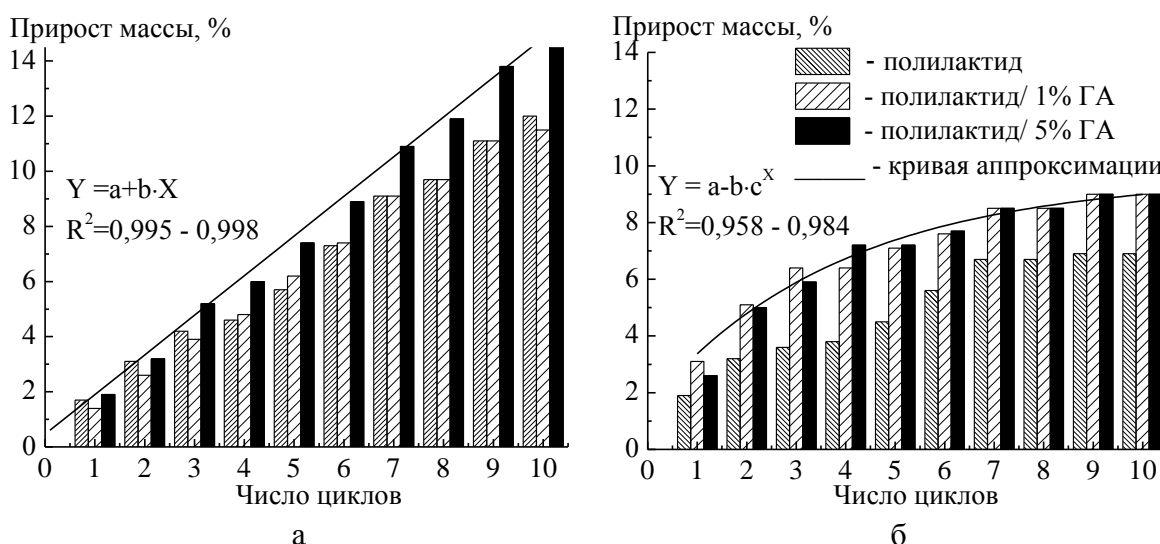


Рис. 4. Диаграммы зависимости прироста массы трехмерных моделей на основе полилактида и его композита с ГА от числа циклов обработки гелем ГА (а) и суспензией ПВС/ГА (б).

Обработка гелем ГА способствует более равномерному распределению кальцийфосфатных частиц на поверхности образцов (см. рис. 5 а). В присутствии ПВС происходит склеивание частиц с образованием агломератов неправильной формы, достигающих в длину 100 мкм (см. рис. 5 б).

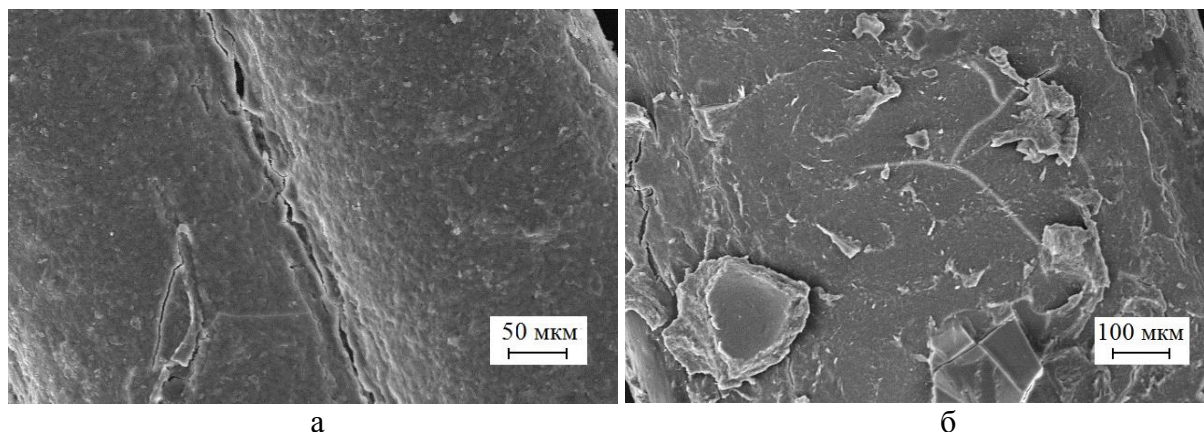


Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения поверхности моделей на основе полилактида с 5% ГА после обработки гелем ГА (а) и суспензией ПВС/ГА (б).

Тестирование биологической активности полученных полимерных моделей в растворе SBF показало, что выдерживание их в течение 1 месяца сопровождается повышением pH раствора с образованием аморфизированного ГА, что подтверждается данными РФА и СЭМ. Отмечается, что наибольшее количество фосфата кальция (8 мг на 1 г массы образца) образуется на поверхности трехмерных полимерных моделей, покрытых ПВС/ГА.

4. Заключение

Таким образом, методом послойного наплавления на основе полилактида, содержащего 1 и 5% ГА, получены трехмерные модели с пористостью 30–35%. Обработка полученных моделей гелем ГА либо водной суспензией ПВС/ГА позволяет модифицировать их поверхность биоактивным ГА. Выдерживанием модифицированных образцов в растворе SBF в течение 1 месяца выявлена их повышенная активность к образованию аморфизированного ГА.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ «БРФФИ-РФФИ» (проекты № X18P-063 бел. и № 18-53-00034 рос.) и ГПНИ «Полимерные материалы и технологии», подпрограмма «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», задание 6.65 (2019–2020 годы).

Библиографический список:

1. **Zhu, W.** 3D printing of functional biomaterials for tissue engineering / W. Zhu, X. Ma, M. Gou, et al. // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2016. – V. 40. – P. 103-112.
2. **Skardal, A.** Biomaterials for integration with 3-D bioprinting / A. Skardal, A. Atala // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2014. – V. 43. – I. 3. – P. 730-746.
3. **Park, S.** 3D polycaprolactone scaffolds with controlled pore structure using a rapid prototyping system / S. Park, G. Kim, Y. Jeon, et al. // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. – 2009. – V. 20. – I. 1. – P. 229-234.
4. **Niaza, K.V.** Long-term creep and impact strength of biocompatible 3D-printed PLA-based scaffolds / K.V. Niaza, F.S. Senatov, A. Stepashkin, et al. // *Nano Hybrids and Composites*. – 2017. – V. 13. – P. 15-20.
5. **El-Hajje, A.** Physical and mechanical characterisation of 3D-printed porous titanium for biomedical applications / A. El-Hajje, E.C. Kolos, J.K. Wang, et al. // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. – 2014. – V. 25. – I. 11. – P. 2471-2480.
6. **Park, S.** Fabrication of porous polycaprolactone/hydroxyapatite (PCL/HA) blend scaffolds using a 3D plotting system for bone tissue engineering / S. Park, S. Lee, W.D. Kim // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. – 2011. – V. 34. – I. 4. – P. 505-513.
7. **Wang, M.** Cold atmospheric plasma (CAP) surface nanomodified 3D printed polylactic acid (PLA) scaffolds for bone regeneration / M. Wang, P. Favi, X. Cheng, et al. // *Acta Biomaterialia*. – 2016. – V. 46 – P. 256-265.
8. **Zhang, H.** Three dimensional printed macroporous polylactic acid/hydroxyapatite composite scaffolds for promoting bone formation in a critical-size rat calvarial defect model / H. Zhang, X. Mao, Z. Du, et al. // *Journal Science and Technology of Advanced Materials*. – 2016. – V. 17. – I. 1. – P. 136-148.
9. **Chen, Q.** 3D printing biocompatible polyurethane/poly(lactic acid)/graphene oxide nanocomposites: anisotropic properties / Q. Chen, J.D. Mangadlao, J. Wallat, et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – V. 9. – I. 4. – P. 4015-4023.
10. **Мусская, О.Н.** Биоактивный ксерогель гидроксиапатита / О.Н. Мусская, А.И. Кулак, В.К. Крутько и др. // *Весці НАН Беларусі. Серыя хімічных навук*. – 2011. – № 1. – С. 5-11.
11. **Мусская, О.Н.** Адсорбционно-структурные свойства ксерогелей фосфатов кальция, полученных жидкофазным синтезом / О.Н. Мусская, А.И. Кулак, В.К. Крутько и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2018. – Вып. 10. – С. 468-476.
12. **Cox, S.C.** 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications / S.C. Cox, J.A. Thornby, G.J. Gibbons, et al. // *Materials Science and Engineering: C*. – 2015. – V. 47. – P. 237-247.
13. **Мусская, О.Н.** Получение биоактивных мезопористых кальцийфосфатных гранул / О.Н. Мусская, А.И. Кулак, В.К. Крутько и др. // *Неорганические материалы*. – 2018. – Т. 54. – № 2. – С. 130-137.
14. **Pramanik, N.** Chemical synthesis and characterization of hydroxyapatite (Hap)-poly(ethylene co vinyl alcohol) (EVA) nanocomposite using a phosphonic acid coupling agent for orthopedic applications / N. Pramanik, S. Mohapatra, P. Bhargava, P. Pramanik // *Materials Science and Engineering: C*. – 2009. – V. 29. – I. 1. – P. 228-236.
15. **Kokubo, T.** How useful is SBF in predicting *in vivo* bone bioactivity? / T. Kokubo, H. Takadama // *Biomaterials*. – 2006. – V. 27. – I. 15. – P. 2907-2915.

16. **He, Y.** Unique crystallization behavior of poly(*L*-lactide)/poly(*D*-lactide) stereocomplex depending on initial melt states / Y. He, Ying Xu, Jia Wei, Z. Fan, S. Li // *Polymer*. – 2008. – V. 49. – I. 26. – P. 5670-5675.

References:

1. **Zhu, W.** 3D printing of functional biomaterials for tissue engineering / W. Zhu, X. Ma, M. Gou, et al. // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2016. – V. 40. – P. 103-112.
2. **Skardal, A.** Biomaterials for integration with 3-D bioprinting / A. Skardal, A. Atala // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2014. – V. 43. – I. 3. – P. 730-746.
3. **Park, S.** 3D polycaprolactone scaffolds with controlled pore structure using a rapid prototyping system / S. Park, G. Kim, Y. Jeon, et al. // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. – 2009. – V. 20. – I. 1. – P. 229-234.
4. **Niaza, K.V.** Long-term creep and impact strength of biocompatible 3D-printed PLA-based scaffolds / K.V. Niaza, F.S. Senatov, A. Stepashkin, et al. // *Nano Hybrids and Composites*. – 2017. – V. 13. – P. 15-20.
5. **El-Hajje, A.** Physical and mechanical characterisation of 3D-printed porous titanium for biomedical applications / A. El-Hajje, E.C. Kolos, J.K. Wang, et al. // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. – 2014. – V. 25. – I. 11. – P. 2471-2480.
6. **Park, S.** Fabrication of porous polycaprolactone/hydroxyapatite (PCL/HA) blend scaffolds using a 3D plotting system for bone tissue engineering / S. Park, S. Lee, W.D. Kim // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. – 2011. – V. 34. – I. 4. – P. 505-513.
7. **Wang, M.** Cold atmospheric plasma (CAP) surface nanomodified 3D printed polylactic acid (PLA) scaffolds for bone regeneration / M. Wang, P. Favi, X. Cheng, et al. // *Acta Biomaterialia*. – 2016. – V. 46 – P. 256-265.
8. **Zhang, H.** Three dimensional printed macroporous polylactic acid/hydroxyapatite composite scaffolds for promoting bone formation in a critical-size rat calvarial defect model / H. Zhang, X. Mao, Z. Du, et al. // *Journal Science and Technology of Advanced Materials*. – 2016. – V. 17. – I. 1. – P. 136-148.
9. **Chen, Q.** 3D printing biocompatible polyurethane/poly(lactic acid)/graphene oxide nanocomposites: anisotropic properties / Q. Chen, J.D. Mangadlao, J. Wallat, et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – V. 9. – I. 4. – P. 4015-4023.
10. **Muszkaya, O.N.** Hydroxyapatite bioactive xerogel / O.N. Muszkaya, A.I. Kulak, V.K. Krut'ko et al. // *Vestsi NAN Belarusi. Seryya khimichnykh navuk*. – 2011. – № 1. – P. 5-11. (In Russian).
11. **Muszkaya, O.N.** Adsorption-structural properties of calcium phosphates xerogels obtained by liquid-phase synthesis / O.N. Muszkaya, A.I. Kulak, V.K. Krut'ko et al. // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2018. – Vyp. 10. – S. 468-476. (In Russian).
12. **Cox, S.C.** 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications / S.C. Cox, J.A. Thornby, G.J. Gibbons, et al. // *Materials Science and Engineering: C*. – 2015. – V. 47. – P. 237-247.
13. **Muszkaya, O.N.** Preparation of bioactive mesoporous calcium phosphate granules / O.N. Muszkaya, A.I. Kulak, V.K. Krut'ko, et al. // *Inorganic Materials*. – 2018. – V. 54. – I. 2. – P. 117-124.
14. **Pramanik, N.** Chemical synthesis and characterization of hydroxyapatite (Hap)-poly(ethylene co vinyl alcohol) (EVA) nanocomposite using a phosphonic acid coupling agent for orthopedic applications / N. Pramanik, S. Mohapatra, P. Bhargava, P. Pramanik // *Materials*

Science and Engineering: C. – 2009. – V. 29. – I. 1. – P. 228-236.

15. **Kokubo, T.** How useful is SBF in predicting *in vivo* bone bioactivity? / T. Kokubo, H. Takadama // *Biomaterials*. – 2006. – V. 27. – I. 15. – P. 2907-2915.

16. **He, Y.** Unique crystallization behavior of poly(*L*-lactide)/poly(*D*-lactide) stereocomplex depending on initial melt states / Y. He, Ying Xu, Jia Wei, Z. Fan, S. Li // *Polymer*. – 2008. – V. 49. – I. 26. – P. 5670-5675.

Original paper

THREE-DIMENSIONAL MODELS BASED ON POLYLACTIDE AND HYDROXYAPATITE

O.N. Musskaya¹, V.K. Krut'ko¹, A.I. Kulak¹, A.A. Nasan², S.S. Hvesenya², V.A. Dobysh³,
V.A. Tarasevich³, N.L. Budeiko¹, O.A. Sycheva¹

¹*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus*

²*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

³*Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus*

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.326

Abstract: Three-dimensional models based on polylactide containing 1 and 5 % hydroxyapatite were obtained by the method of fused deposition. *In vitro* testing showed that a surface modification of the polymer models with 4 % hydroxyapatite gel or an aqueous suspension containing 4 % polyvinyl alcohol and 4 % hydroxyapatite can improve bioactive properties of such materials.

Keywords: 3D printing, fused deposition, polylactide, hydroxyapatite, polyvinyl alcohol.

Мусская Ольга Николаевна – к.х.н., доцент, с.н.с. лаборатории фотохимии и электрохимии ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Крут'ко Валентина Константиновна – к.х.н., доцент, заведующая лабораторией фотохимии и электрохимии ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Кулак Анатолий Иосифович – д.х.н., член-корреспондент, профессор, директор ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Насан Олег Александрович – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета

Хвесеня Сергей Сергеевич – к.т.н., заведующий НИЛ «Прикладная механика» кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета

Добыш Владимир Алексеевич – к.х.н., с.н.с. лаборатории органических композиционных материалов ГНУ «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси».

Тарасевич Владимир Александрович – д.х.н., профессор, г.н.с. лаборатории органических композиционных материалов ГНУ «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси»

Будейко Николай Леонович – к.х.н., заведующий лабораторией физико-химических исследований и агро-химических испытаний ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Сычева Ольга Анатольевна – научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований и агро-химических испытаний ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Olga N. Musskaya – Ph. D., Docent, Senior Researcher of Photochemistry and Electrochemistry Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus

**Физико-химические аспекты изучения кластеров,
наноструктур и наноматериалов**

Valentina K. Krut'ko – Ph. D., Docent, Head of Photochemistry and Electrochemistry Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus

Anatoly I. Kulak – Corresponding Member, D. Sc., Professor, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus, Director

Oleg A. Nasan – Assistant of Department of Theoretical and Applied Mechanics, Mechanics and Mathematics Faculty, Belarusian State University

Sergey S. Hvesenya – Ph. D., Head of the Laboratory of Applied Mechanics, Department of Theoretical and Applied Mechanics, Mechanics and Mathematics Faculty, Belarusian State University

Vladimir A. Dobysh – Ph. D., Senior Researcher of Laboratory of Organic Composite Materials, Institute of Chemistry of New Materials of National Academy of Sciences of Belarus

Vladimir A. Tarasevich – D. Sc., Professor, Chief Researcher of Laboratory of Organic Composite Materials, Institute of Chemistry of New Materials of National Academy of Sciences of Belarus

Nikolay L. Budeiko – Ph. D., Head of Physicochemical Research Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus

Olga A. Sycheva – Researcher of Physicochemical Research Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of National Academy of Sciences of Belarus

Поступила в редакцию/received: 15.08.2019; после рецензирования/revise: 16.09.2019; принята/accepted 08.10.2019.