

пературной модификацией  $\beta$ -кварц со степенью кристалличности 98 % ( $a=0,491$ ;  $c=0,540$  нм, пространственная группа  $P3_121$ ). Полученный нанодисперсный порошок характеризуется содержанием аморфной фазы до 70 %. Это связано с высокой скоростью охлаждения парогазовой смеси на водоохлаждаемых стенках реактора. Зарегистрированный слабо интенсивный пик на  $26\ 2\theta$ , град. соответствует высокотемпературной модификации  $\alpha$ -кварц ( $a=0,492$ ;  $c=0,540$  нм, пространственная группа  $P6_22$ ). При осаждении частиц на охлаждающиеся стенки реактора формируются области, где интенсивность закалки снижается за счет увеличения толщины слоя накопленного наноразмерного порошка  $\text{SiO}_2$ , что создает условия для кристаллизации. Стоит отметить, что пик диффузионного гало находится

от  $21$  до  $23\ 2\theta$ , град., что характерно для фазы  $\alpha$ -тридимит. Это подтверждается последующей изотермической выдержкой полученного наноразмерного порошка, где 71 % кристаллической фазы представлен ромбическим  $\alpha$ -тридимитом ( $a=0,711$ ;  $b=0,702$ ;  $c=0,698$  нм, пространственная группа  $Fmm$ ).

Таким образом, влияние энергии термической плазмы на природный диоксид кремния  $\beta$ -кварц приводит к формированию слабо закристаллизованного наноразмерного диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , где связи  $\text{Si-O}$  в кремнекислородных тетраэдрах аморфной фазы аналогичны связям  $\alpha$ -тридимита.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации МК-66.2022.4.

### Список литературы

1. Yang J., She W., Zuo W., Iyu K., Zhang Q. Rational application of nano- $\text{SiO}_2$  in cement paste incorporated with silane: Counterbalancing and synergistic effects // *Cement and Concrete Composites*, 2021. – V. 118. – P. 3169–3181.
2. Ma Q., Izu N., Masuda Y. High order nano-silica assembly and its application in synthesizing  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  bilayer films // *Surface and Coatings Technology*, 2018. – V. 345. – P. 22–30.
3. Shekhovtsov V. V., Skripnikova N. K., Volokitin O. G. Phase transitions in  $\text{SiO}_2$  nanopowder synthesized by electric arc plasma // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021. – V. 49. – № 9. – P. 2618–2623.

## ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СКЭФФОЛДОВ НА ОСНОВЕ ПОА И МАГНЕТИТА ПОСЛЕ БИОДЕГРАДАЦИИ *in vitro*

Л. Е. Шлапакова, Р. В. Чернозем, А. С. Прядко, И. Парий, М. А. Сурменова  
 Научный руководитель – д.т.н., профессор Р. А. Сурменев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
 634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, д. 30, les2@tpu.ru

Полиоксикалканоаты (ПОА) – это полиэфиры, которые обладают биосовместимостью, биоразлагаемостью, малой токсичностью, пьезоэлектрическими и термопластическими свойствами. Эти свойства открывают широкий потенциал биомедицинских применений ПОА [1]. Однако низкая биоактивность ограничивает применение ПОА в чистом виде [2], поэтому разрабатываются гибридные материалы, в частности, с добавлением магнитных частиц. В данной работе приводятся результаты исследований по биодеградации *in vitro* электроформованных гибридных скэффолдов на основе поли-3-оксибутирата (ПОБ) и частиц магнетита субмикронного (МЗ) и наноразмера (М1, М7). Поверхность наночастиц М1 модифицирована лимонной кис-

лотой. В качестве модельных сред для биодеградации были выбраны фосфат-буферный раствор (БФС) и свиная панкреатическая липаза в БФС в концентрации 0,25 мг/мл. Образцы инкубировались в указанных средах в течение 1 месяца.

Рентгенофазовый анализ позволил установить для всех композитов основные характерные пики орторомбической  $\alpha$ -фазы ПОБ при  $13,6^\circ$  (020) и  $16,9^\circ$  (110). Кроме того, наблюдаются менее выраженные рефлексы в области  $21,4^\circ$  (101);  $22,4^\circ$  (111);  $25,5^\circ$  (031/130);  $26,9^\circ$  (040). Выраженные рефлексы при  $2\theta=18,2^\circ$  (111);  $30,4^\circ$  (220);  $35,9^\circ$  (311);  $43,5^\circ$  (400);  $53,5^\circ$  (422);  $57,7^\circ$  (511);  $63,1^\circ$  (440) соответствуют магнетиту с гранцентрированной кубической решеткой. Важно отметить, что в случае ком-

позита с субмикронными частицами (ПОБ/МЗ) после инкубации как в БФС, так и в растворе липазы наблюдается сдвиг рефлекса плоскости (020) в сторону больших углов, что указывает на снижение параметров решетки кристаллической фазы полимера и, как следствие, наличием растягивающих микронапряжений. Вследствие этого мы предполагаем уменьшение расстояния между ламелями и уплотнение кристаллической структуры в ходе биodeградации. В случае гибридных скэффолдов с наночастицами магнетита (ПОБ/М1, ПОБ/М7) указанный рефлекс сдвигается в сторону меньших углов после биodeградации в гидролитической и ферментативной средах. Помимо этого, на рентенограммах каждого из исследуемых композитов после деградации у рефлекса (020) при  $2\theta = 13,6^\circ$  появляется плечо в области меньших углов при  $2\theta = 13,2^\circ$ , связанное с расщеплением данного пика. Эти наблюдения свидетельствуют об увеличении параметров элементарной ячейки и наличии сжимающих микронапряжений. На основании этого можно предположить об увеличении расстояния между ламелями кристаллической фазы композитных полимерных скэффолдов после биodeградации в исследуемых средах.

Для оценки изменений физико-механических свойств гибридных скэффолдов в ходе биodeградации были проведены испытания на

одноосное растяжение. Установлено увеличение механической прочности всех композитов после инкубации как в БФС, так и в растворе с липазой. Например, в случае композита ПОБ/МЗ максимальное напряжение до разрыва увеличилось от  $0,73 \pm 0,07$  МПа до  $0,90 \pm 0,28$  и  $2,05 \pm 0,05$  МПа, соответственно, после гидролитической и ферментативной деградации. Также, наблюдается увеличение модуля Юнга гибридных скэффолдов ПОБ/МЗ и ПОБ/М7. В случае композита ПОБ/М7 модуль Юнга увеличился от  $116,05 \pm 7,77$  МПа до  $146,26 \pm 20,80$  и  $144,84 \pm 13,49$  МПа, соответственно, в БФС и липазе. Наряду с этим установлено снижение удлинения при растяжении композитов с модифицированными субмикро- и наночастицами магнетита (МЗ, М7). Однако для композитов с добавлением наночастиц, модифицированных лимонной кислотой, этот параметр увеличивается от  $7,51 \pm 0,57$  % до  $17,02 \pm 4,76$  % после деградации в растворе с липазой.

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры биоинженерии Московского государственного университета им М. В. Ломоносова под руководством Бонарцева А. П. за проведение экспериментов по биodeградации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-63-47096).

### Список литературы

1. Volova T., et al. // *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021. – 182. – P. 98–114.
2. Pryadko A., M. A. Surmeneva, and R. A. Surmenev // *Polymers*, 2021. – 13. – 11.

## АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА орто-ЗАМЕЩЕННЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ПОЛИАНИЛИНА

А. А. Юлдашева<sup>1</sup>, Т. Т. Садыков<sup>1</sup>, А. Н. Андриянова<sup>2</sup>  
 Научный руководитель – д.х.н., профессор А. Г. Мустафин

<sup>1</sup>Башкирский государственный университет  
 450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди 32

<sup>2</sup>Уфимский Институт химии РАН  
 450054, Россия, г. Уфа, пр. Октября 71, gttima@mail.ru

Коррозия металлов является одной из самых важных проблем во всем мире [1]. Покрытия на основе проводящих полимеров обеспечивают физическую и электрохимическую защиту. Тонкие пленки, адсорбированные на металлической подложке, создают барьерный эффект между металлом и окружающей средой.

Иногда окислительно-восстановительное поведение покрытия обеспечивает анодную защиту подложки [2]. Среди хорошо известных проводящих полимеров полианилин (ПАНИ) вызвал особый интерес исследователей [3]. ПАНИ является наиболее многообещающим полимером, за счет низкой стоимости моно-