

УДК 616-74

СТРУКТУРА, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК СКЭФФОЛДОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИОКСИБУТИРАТА С КОМПОЗИТНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ МАГНЕТИТ/ВОССТАНОВЛЕННЫЙ ОКСИД ГРАФЕНА

© 2023 г. Л. Е. Шлапакова¹, *, А. С. Прядко¹, Ю. Р. Мухортова¹, Д. В. Вагнер², М. А. Сурменева¹, Р. А. Сурменев¹, **

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, Томск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский Томский государственный университет”, Томск, Россия

*E-mail: les2@tpu.ru

**E-mail: rsurmenev@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 23.12.2022 г.

Принята к публикации 27.02.2023 г.

Изучено влияние диаметра волокон и композитного наполнителя магнетит/восстановленный оксид графена на свойства электроформованных скэффолдов на основе поли-3-оксибутирата. Магнитный композитный наполнитель обеспечивает хорошие магнитные свойства и пьезоотклик скэффолдов, в то время как изменение диаметра волокон позволяет контролировать пластичность, кристалличность и поверхностный электрический потенциал.

DOI: 10.31857/S0367676523701338, EDN: VKFDAC

ВВЕДЕНИЕ

Скэффолды для тканевой инженерии выполняют функцию внеклеточного матрикса, обеспечивая временную поддержку клеток в процессе восстановления натурального внеклеточного матрикса [1]. В настоящее время наибольший интерес для изготовления нано- и микроволоконных скэффолдов представляет электроформование (ЭФ) ввиду большой поверхностной площади на единицу объема материала и контролируемой пористой структуры, обеспечивающей перенос нутриентов и факторов роста [2].

Магнитоактивные имплантаты обеспечивают направленную и контролируемую стимуляцию клеток во внешнем магнитном поле (МП). Комбинация магнитных частиц и пьезоэлектрического полимера предлагает возможность генерировать локальный пьезоэлектрический потенциал на поверхности скэффолда во внешнем МП и, таким образом, стимулировать восстановление тканей [1, 3].

Бактериальный поли-3-оксибутират (ПОБ) представляет собой пьезоэлектрический биосовместимый биоразлагаемый полимер [4]. Скэффолды на основе ПОБ способны поддерживать

длительную регенерацию ткани ввиду низкой скорости биодеградации [5]. Продукт разложения ПОБ (*D*-3-гидроксибутановая кислота) входит в состав крови человека, поэтому он нетоксичен и не вызывает воспалительных реакций [6]. Благодаря пьезоэлектрическим свойствам ПОБ способен деформироваться во внешнем электрическом поле или генерировать электрический заряд при механической деформации, обеспечивая электрическую стимуляцию клеток [7]. Пьезоотклик и физико-механические свойства полимерных скэффолдов могут быть усилены путем добавления наполнителей за счет изменения структуры полимера [8–11].

В качестве магнитоактивного агента широко применяются наночастицы магнетита (МНЧ) ввиду их высокой намагниченности и механической прочности, биосовместимости и стабильности в физиологических условиях [12]. Композит на основе магнетита (Fe_3O_4) и восстановленного оксида графена (ВОГ) используется в биомедицине благодаря комбинации высокой намагниченности Fe_3O_4 с проводимостью и большой удельной площадью ВОГ [13].

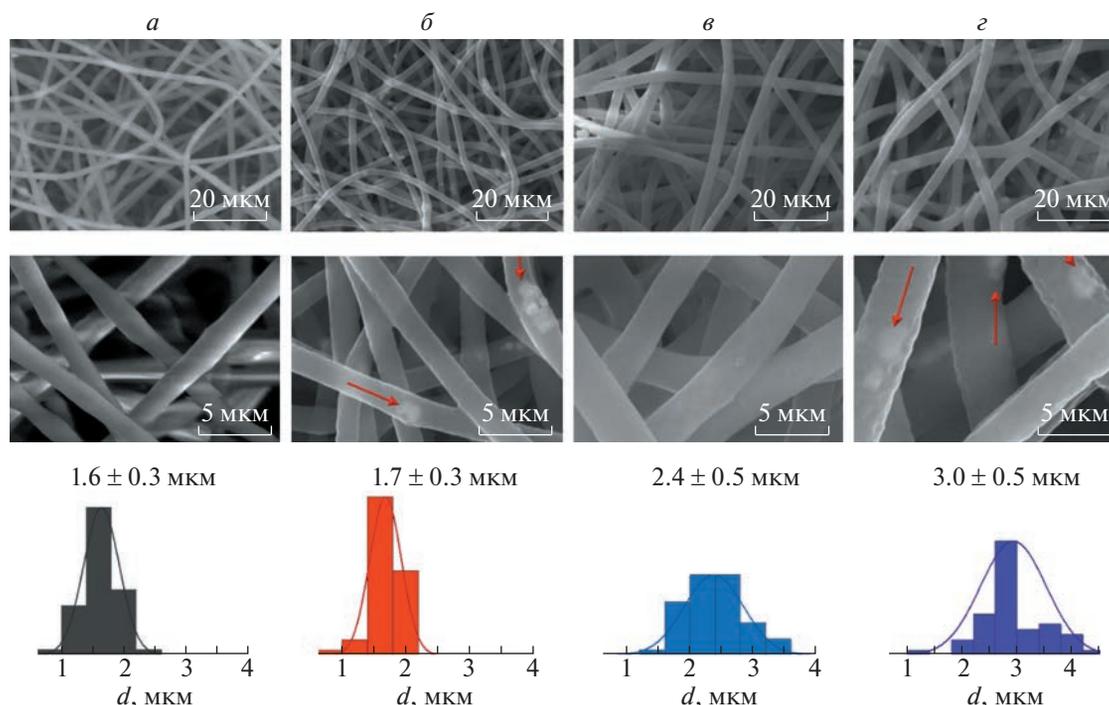


Рис. 1. Снимки СЭМ исследуемых скэффолдов: ПОб_{G27} (а); ПОб/Fe₃O₄-ВОГ_{G27} (б); ПОб_{G21} (в); ПОб/Fe₃O₄-ВОГ_{G21} (г).

Таким образом, скэффолды на основе ПОб и композитного наполнителя Fe₃O₄-ВОГ являются перспективными магнитоактивными биоматериалами. В данном исследовании впервые изучено влияние данного наполнителя и диаметра электроформованных волокон на морфологию, структуру, физико-механические, магнитные и пьезоэлектрические свойства скэффолдов ПОб.

ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЕ СКЭФФОЛДОВ ПОб/Fe₃O₄-ВОГ

Скэффолды из чистого ПОб и композиты ПОб/Fe₃O₄-ВОГ с разной структурой были получены следующим образом. Для контрольных образцов (из чистого полимера) порошок ПОб (Sigma-Aldrich) растворяли в хлороформе (CHCl₃, Sigma-Aldrich) в концентрации 6 мас. %. В случае композитов ПОб/Fe₃O₄-ВОГ наполнитель в количестве 8% от массы полимера диспергировали в хлороформе с помощью ультразвуковой ванны Scientz-IIID (Ningbo SCienta Biotechnology Co. Ltd., China) при комнатной температуре в течение 2 ч. Затем 6 мас. % порошка ПОб добавляли в суспензию Fe₃O₄-ВОГ и растворяли при перемешивании (400 об · мин⁻¹) и нагревании (60°C) в течение 2 ч. Полученные растворы подвергали ЭФ при следующих параметрах:

ПОб_{G27} — игла калибра G27 (Ø0.2 мм); скорость вращения коллектора 200 об · мин⁻¹; вольтаж 5.2 кВ;

скорость подачи раствора 0.3 мл · ч⁻¹; дистанция от иглы до коллектора 10 см;

ПОб_{G21} — игла калибра G21 (Ø0.51 мм); скорость вращения коллектора 200 об · мин⁻¹; вольтаж 9.1 кВ; скорость подачи раствора 0.85 мл · ч⁻¹; дистанция от иглы до коллектора 14 см;

ПОб/Fe₃O₄-ВОГ_{G27} — игла калибра G27 (Ø0.2 мм); скорость вращения коллектора 200 об · мин⁻¹; вольтаж 7.2 кВ; скорость подачи раствора 0.32 мл · ч⁻¹; дистанция от иглы до коллектора 10 см;

ПОб/Fe₃O₄-ВОГ_{G21} — игла калибра G21 (Ø0.51 мм); скорость вращения коллектора 200 об · мин⁻¹; вольтаж 10.6 кВ; скорость подачи раствора 0.85 мл · ч⁻¹; дистанция от иглы до коллектора 14 см.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СКЭФФОЛДОВ ПОб/Fe₃O₄-ВОГ

Морфологические исследования проводилось с помощью СЭМ Quanta 600 (Thermo Fisher, Japan). На рис. 1 представлены снимки СЭМ и распределения диаметров d изготовленных скэффолдов. В отличие от гладких бездефектных волокон из чистого полимера, волокна композитов ПОб/Fe₃O₄-ВОГ имеют выступающие агломераты наполнителя Fe₃O₄-ВОГ. Тем не менее, волокна во всех полученных скэффолдах практически не имеют дефектов, что свидетельствует о верном

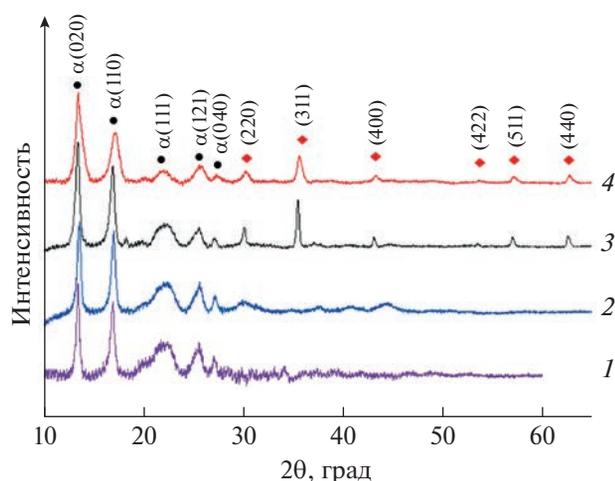


Рис. 2. Рентгенограммы исследуемых скэффолдов: 1 – ПОБ_{G27}; 2 – ПОБ_{G21}; 3 – ПОБ/Fe₃O₄-ВОГ_{G27}; 4 – ПОБ/Fe₃O₄-ВОГ_{G21}. Символом (●) обозначены кристаллографические плоскости ПОБ; символом (◆) – плоскости Fe₃O₄.

подборе параметров растворов и ЭФ. Диаметры волокон из чистого ПОБ составляют 1.6 ± 0.3 и 2.4 ± 0.5 мкм в случае скэффолдов, полученных иглами с диаметрами 0.2 и 0.51 мм, соответственно. Диаметры волокон в композитах равны 1.7 ± 0.3 и 3.0 ± 0.5 мкм для скэффолдов ПОБ/Fe₃O₄-ВОГ_{G27} и ПОБ/Fe₃O₄-ВОГ_{G21}, соответственно. Увеличение диаметра волокон при использовании иглы с большим диаметром связано с большим объемом раствора, проходящим в единицу времени, а также увеличенным вольтажом. Добавление компо-

зитного наполнителя Fe₃O₄-ВОГ не приводит к значительному изменению диаметра волокон.

Рентгенофазовый анализ каждого из исследуемых скэффолдов (рис. 2) выявил рефлексы, характерные орторомбической α -фазе ПОБ, а именно пики при углах $2\theta = 13.6^\circ, 16.9^\circ, 22.4^\circ, 25.5^\circ, 26.9^\circ$ и 19.9° кристаллографических плоскостей (020), (110), (111), (121), (040) и (021), соответственно (ICDD PDF № 00-068-1411). В случае композитных скэффолдов наблюдаются также рефлексы магнетита с шпинельной гранцентрированной решеткой при $30.35^\circ, 35.63^\circ, 43.49^\circ, 53.56^\circ, 57.12^\circ$ и 62.81° , соответствующие плоскостям (220), (311), (400), (422), (511) и (440), соответственно. При этом рефлексов, соответствующих ВОГ, не обнаружено. Согласно данным табл. 1, введение композитного наполнителя Fe₃O₄-ВОГ в матрицу ПОБ снижает размер кристаллитов полимера в плоскостях (020) и (110). Это объясняется затрудненной кристаллизацией, ограниченной агрегатами наполнителя [14–16]. Помимо этого, в случае композитных скэффолдов обнаружено снижение размеров кристаллитов ПОБ при уменьшении диаметра иглы для ЭФ, что объясняется снижением кристаллизации ПОБ из-за пространственных ограничений (т.е. меньшего диаметра волокон) [17].

Для установления влияния наполнителя Fe₃O₄-ВОГ и диаметра волокон на механические свойства полученных скэффолдов были проведены механические испытания на растяжение (табл. 2). Для этого полоски скэффолдов 8×1 см закреплялись плоскими зажимами испытательной машины Instron 3369 (Великобритания) и растягивались со скоростью нагружения 1 мм/мин до разрыва. В результате получены кри-

Таблица 1. Размеры кристаллитов ПОБ в исследуемых скэффолдах

Образец	Размер кристаллитов, нм	
	(020)	(110)
ПОБ _{G21}	20	15
ПОБ/Fe ₃ O ₄ -ВОГ _{G21}	14	16
ПОБ _{G27}	19	17
ПОБ/Fe ₃ O ₄ -ВОГ _{G27}	8	10

Таблица 2. Свойства чистых и композитных скэффолдов, полученных с помощью игл разного диаметра

Образец	d , мкм	δ , %	σ_{max} , МПа	E , МПа	X_c , %
ПОБ _{G21}	2.4 ± 0.5	10.0 ± 1.5	1.35 ± 0.10	145.6 ± 16.3	58
ПОБ _{G27}	1.6 ± 0.3	15.0 ± 3.0	2.50 ± 0.27	128.5 ± 1.3	53
ПОБ/Fe ₃ O ₄ -ВОГ _{G21}	3.0 ± 0.5	7.8 ± 2.6	0.49 ± 0.15	46.3 ± 6.1	51
ПОБ/Fe ₃ O ₄ -ВОГ _{G27}	1.7 ± 0.3	18.5 ± 5.7	1.05 ± 0.18	99.6 ± 7.5	50

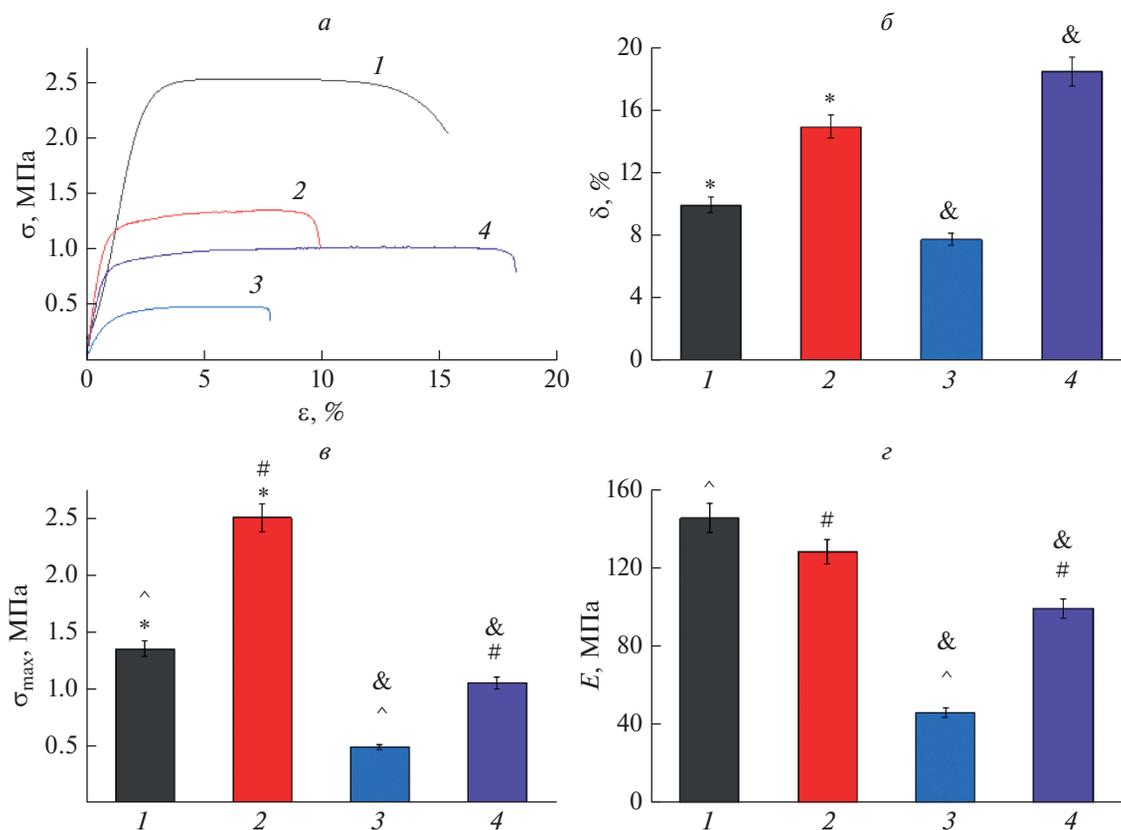


Рис. 3. Диаграммы напряжение–деформация (а), удлинение при разрыве (б), максимальная прочность на растяжение (в) и модуль Юнга (г) исследуемых скэффолдов: 1 – ПОБ_{G21}; 2 – ПОБ_{G27}; 3 – ПОБ/Fe₃O₄-ВОГ_{G21}; 4 – ПОБ/Fe₃O₄-ВОГ_{G27}.

вые “деформация–напряжение” (рис. 3а), по которым установлены удлинения при разрыве (δ), максимальные прочности на растяжение (σ_{max}) и модули Юнга (E) чистых и композитных скэффолдов. Значение δ увеличивается с уменьшением диаметра волокон как для чистых, так и композитных скэффолдов (рис. 3б). В случае чистых скэффолдов из ПОБ удлинение увеличивается от 10.0 ± 1.5 до $15.0 \pm 3.0\%$; в случае композитов наблюдается более резкое увеличение данного параметра от 7.8 ± 2.6 до $18.5 \pm 5.7\%$. Помимо этого, значения σ_{max} для волокон с меньшим диаметром составляют 2.50 ± 0.27 и 1.05 ± 0.18 МПа в случае чистых и композитных скэффолдов, соответственно, что в ~ 2 раза превышает этот параметр, полученный для волокон с большим диаметром (рис. 3в). Максимальная прочность на растяжение композитных скэффолдов снижается с добавлением наполнителя Fe₃O₄-ВОГ от 1.35 ± 0.10 до 0.49 ± 0.15 МПа и от 2.50 ± 0.27 до 1.05 ± 0.18 МПа для волокон, полученных с помощью игл диаметром 0.2 и 0.51 мм, соответственно. Аналогичное снижение зафиксировано для E композитов (рис. 3г). Ухудшение механических характеристик композитных скэффолдов связано с образованием агрегатов композита Fe₃O₄-ВОГ внутри

волокон, наблюдаемых на снимках СЭМ (рис. 1), которые могли выступать как точки концентрации напряжений [18].

Для оценки изменений степени кристалличности (X_c) чистых и композитных волокон различного диаметра была использована дифференциальная сканирующая калориметрия. Из табл. 2 видно, что в случае чистых скэффолдов из ПОБ X_c значительно уменьшается от 58 до 53% с уменьшением диаметра волокон от 2.4 ± 0.5 до 1.6 ± 0.3 мкм. Снижение кристалличности также зафиксировано для композитных скэффолдов с уменьшением диаметра волокон. Согласно уравнению Аврами [19], степень кристалличности можно представить, как возрастающую функцию времени кристаллизации:

$$\theta_c(t) = 1 - \exp[-kt^n], \quad (1)$$

где $\theta_c(t)$ – объемная доля полимера, кристаллизовавшегося за время t ; n – параметр, отражающий индивидуальные особенности роста новых фаз; k – константа скорости кристаллизации. Ранее было показано, что растворитель испаряется значительно быстрее из струи раствора полимера меньшего диаметра [20]. Поэтому время кристал-

Таблица 3. Магнитные свойства композитного наполнителя и скэффолдов, полученных с помощью игл разного диаметра.

Образец	σ_s , эме/г	σ_r , эме/г	H_c , Э
Fe_3O_4 -ВОГ	96.27 ± 1.42	3.50 ± 0.20	60 ± 4.00
ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ _{G27}	6.0 ± 0.39	0.50 ± 0.03	160 ± 9.60
ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ _{G21}	6.83 ± 0.41	0.46 ± 0.03	113 ± 6.78

лизации и, следовательно, X_c тонких волокон меньше в сравнении с более толстыми волокнами. Меньшие значения X_c волокон с меньшим диаметром соответствуют большим значениям δ , установленным в ходе механических испытаний (табл. 2).

В процессе ЭФ электрическое поле вызывает выравнивание полимерных цепей, приводящее к высокой молекулярной ориентации и, соответ-

ственно, к образованию кристаллической фазы полимера [21]. Поэтому волокна с большим диаметром (ПОБ_{G21}, ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G21}), полученные с применением более высокого вольтажа, проявляют большую степень ориентации цепей и большую X_c .

Добавление филлера Fe_3O_4 -ВОГ приводит к снижению X_c скэффолдов от 58 до 51% и от 53 до 50% для скэффолдов из толстых и тонких волокон, соответственно. Это связано с образованием агрегатов частиц Fe_3O_4 и ВОГ, которые ограничивают мобильность цепей ПОБ, затрудняя кристаллизацию [14–16]. Сниженная X_c композитных скэффолдов (в сравнении со скэффолдами из чистого ПОБ) соответствует меньшим значениям σ_{max} и E композитов (табл. 2).

Магнитные частицы могут оказывать магнито-механическую стимуляцию роста клеток при приложении внешнего МП [12]. Поэтому важное значение при разработке магнитных биоматериалов имеют магнитные характеристики, включая намагниченность насыщения σ_s , остаточную намагниченность σ_r и коэрцитивную силу H_c . Магнитные свойства композитного наполнителя и разработанных скэффолдов представлены в табл. 3, а кривые магнитного гистерезиса – на рис. 4. Композитный наполнитель Fe_3O_4 -ВОГ обладает высоким значением σ_s , равным 96.27 ± 1.42 эме/г. Низкие значения H_c (60 ± 4 Э) и σ_r (3.5 ± 0.2 эме/г) являются характеристиками мягкомагнитного материала. σ_s композитных скэффолдов составляют 6.50 ± 0.39 и 6.83 ± 0.41 эме/г для скэффолдов ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G27} и ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G21}, соответственно. Насколько нам известно, эти значения превышают намагниченность всех альтернативных материалов, описанных в литературе [22–24].

H_c композитных скэффолдов значительно увеличивается по сравнению с наполнителем Fe_3O_4 -ВОГ от 60 ± 4 до 160 ± 10 и 113 ± 7 Э для образцов ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G27} и ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G21}, соответственно. Известно, что H_c зависит от анизотропии размера и формы кристаллитов магнетита, а также от наличия примесей в материале [12]. Повышенная H_c композитных скэффолдов по сравнению с наполнителем свидетельствует о том, что волокна ПОБ препятствуют выравнива-

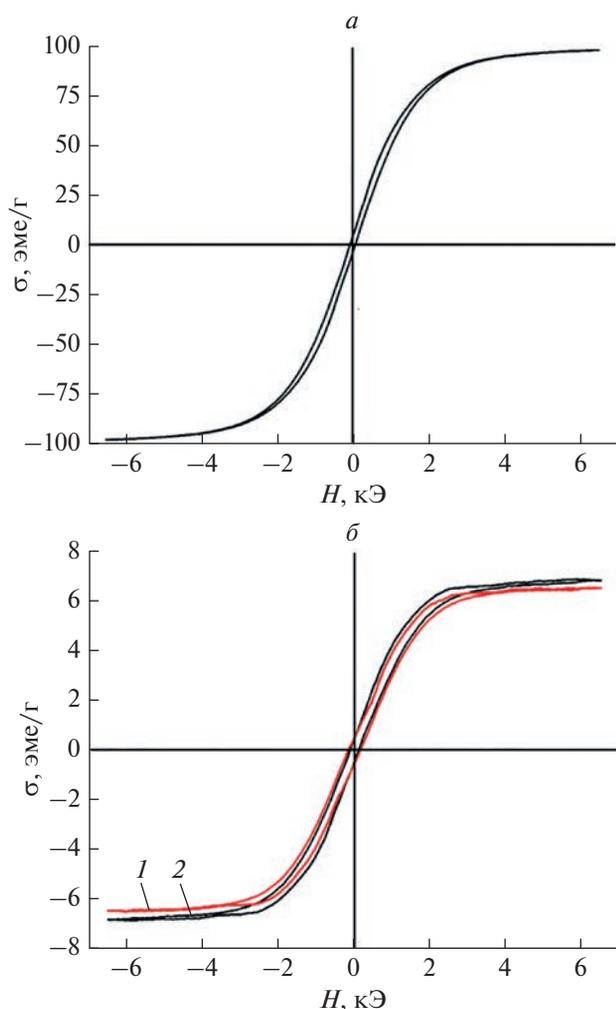


Рис. 4. Кривые магнитного гистерезиса композитного наполнителя Fe_3O_4 -ВОГ (а) и скэффолдов ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G27} (б1) и ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G21} (б2).

нию магнитных моментов наполнителя. При сравнении композитных скэффолдов с различными диаметрами волокон стоит отметить значительное увеличение H_c от 113 ± 6.78 до 160 ± 9.60 Э при снижении диаметра волокон от 3.0 ± 0.5 до 1.7 ± 0.3 мкм.

Методом зонда Кельвина было измерено распределение поверхностного потенциала композитных скэффолдов. Установлено, что среднее значение поверхностного электрического потенциала значительно снижается от 0.89 ± 0.034 до 0.65 ± 0.012 эВ при снижении диаметра волокон от 3.0 ± 0.5 до 1.7 ± 0.3 мкм. Ранее было показано значительное увеличение поверхностного электрического потенциала скэффолда ПОБ при добавлении хлопьев ВОГ [25]. Это объяснялось увеличением числа полярных групп С=О на поверхности волокон после добавления ВОГ в полимерную матрицу. В свою очередь, в нашем исследовании методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии установлено увеличение числа полярных групп С=О на поверхности композитных волокон с большим диаметром (ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G21}) в сравнении с более тонкими волокнами (ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G27}) вследствие большей площади поверхности. Соответственно, поверхностный электрический потенциал волокон ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G21} больше по сравнению с образцом ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G27}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом ЭФ получены новые скэффолды на основе ПОБ с композитным магнитоактивным наполнителем Fe_3O_4 -ВОГ. Выполнено комплексное исследование влияния наполнителя и диаметра волокон на структуру, физико-механические, магнитные и пьезоэлектрические свойства скэффолдов. Диаметр волокон в композитных скэффолдах составляет 1.7 ± 0.3 и 3.0 ± 0.5 мкм для скэффолдов, полученных с помощью игл калибра G27 и G21, соответственно. Обнаружено что уменьшение диаметра иглы от 0.51 до 0.2 мм и добавление наполнителя Fe_3O_4 -ВОГ приводит к снижению кристалличности скэффолдов. Кроме того, частицы Fe_3O_4 -ВОГ снижают размер кристаллитов в плоскостях (020) и (110) орторомбической α -фазы ПОБ. Уменьшение диаметра волокон повышает пластичность и механическую прочность электроформованных скэффолдов. Значение δ увеличивается от 10 ± 1.5 до $15 \pm 3.0\%$ в случае скэффолдов из чистого ПОБ и от 7.8 ± 2.6 до $18.5 \pm 5.7\%$ для композитов ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ. Скэффолды с тонкими волокнами, полученные иглой G27, обладают σ_{max} 2.50 ± 0.27 и 1.05 ± 0.18 МПа для чистых и композитных скэффолдов, соответственно, что в ~ 2 раза превышает σ_{max} скэффолдов с более толстыми волокнами. Добавление на-

полнителя Fe_3O_4 -ВОГ снижает σ_{max} скэффолдов ПОБ от 1.35 ± 0.10 до 0.49 ± 0.15 МПа и от 2.50 ± 0.27 до 1.05 ± 0.18 МПа в случаях ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G21} и ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G27}, соответственно. Помимо этого, наблюдается снижение E композитных скэффолдов в сравнении с чистыми. Поверхностный электрический потенциал магнитоактивных скэффолдов ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ значительно увеличивается от 0.650 ± 0.012 до 0.890 ± 0.034 эВ с увеличением диаметра волокон вследствие большего числа полярных функциональных групп на поверхности волокон. Разработанные скэффолды ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G21} и ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ_{G27} обладают высокой σ_s , равной 6.83 ± 0.41 и 6.50 ± 0.39 эме/г, соответственно, что превышает альтернативные разработки, описанные в литературе.

Таким образом, добавление магнитного композита Fe_3O_4 -ВОГ не влияет на пьезоотклик, но придает высокие значения намагниченности скэффолдов на основе ПОБ. Нами показано, что физико-механические свойства, кристалличность и поверхностный электрический потенциал скэффолдов можно контролировать, изменяя диаметр волокон. Разработанные скэффолды ПОБ/ Fe_3O_4 -ВОГ, способные обеспечивать внешнюю механоэлектрическую стимуляцию роста клеток, являются перспективным биоматериалом для инженерии костной ткани.

Исследование проводилось в Томском политехническом университете в рамках Программы развития Томского политехнического университета при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (грантовое соглашение № 075-15-2021-588 от 01.06.2021) и Российского научного фонда (проект № 20-63-47096; материалы, исследование свойств). Работы проводились с применением оборудования Томского областного центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fernandes M.M., Correia D.M., Ribeiro C. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2019. V. 11. No. 48. Art. No. 45265.*
2. *Zou B., Yaowen L., Luo. X. et al. // Acta Biomater. 2012. V. 8. No. 4. P. 1576.*
3. *Ribeiro C., Correia V., Martins P. et al. // Colloids Surf. B. 2016. V. 140. P. 430.*
4. *Hazer D.B., Kılıçay E., Hazer B. // Mater. Sci. Engin. C. 2012. V. 32. No. 4. P. 637.*
5. *Manavitehrani I., Fathi A., Badr H. et al. // Polymers. 2016. V. 8. No. 1. P. 20.*
6. *Anjum A., Zuber M., Zia K.M. et al. // Int. J. Biol. Macromol. 2016. V. 89. P. 161.*

7. *Rajabi A.H., Jaffé M., Arinze T.L.* // *Acta Biomater.* 2015. V. 24. P. 12.
8. *Chernozem R.V., Romanyuk K.N., Grubova I. et al.* // *Nano Energy.* 2021. V. 89. Art. No. 106473.
9. *Rivera-Briso A.L., Aachmann F.L., Moreno-Manzano V., Serrano-Aroca Á.* // *Int. J. Biol. Macromol.* 2020. V. 143. P. 1000.
10. *Chen X., Ge X., Qian Y. et al.* // *Adv. Funct. Mater.* 2020. V. 30. No. 38. Art. No. 2004537.
11. *Keikhaei S., Mohammadalizadeh Z., Karbasi S., Salimi A.* // *Mater. Tech.* 2019. V. 34. No. 10. P. 615.
12. *Soares P., Romão J., Matos R.J. et al.* // *Progr. Mater. Sci.* 2021. V. 116. Art. No. 100742.
13. *Ahamed M., Akhtar M.J., Khan M.A.* // *Materials.* 2020. V. 13. No. 3. P. 660.
14. *Ho M., Li S., Ciou C., Wu T.* // *J. Appl. Polym. Sci.* 2014. V. 131. № 22. Art. No. 41070.
15. *Ming Y., Zhou Z., Hao T., Nie Y.* // *Eur. Polym. J.* 2021. V. 162. Art. No. 110894.
16. *Wang L., Wang P.G., Wei J.* // *Polymers.* 2017. V. 9. No. 9. P. 429.
17. *Anbukarasu P., Sauvageau D., Elias A.L.* // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017. V. 19. No. 44. Art. No. 30021.
18. *Iron R., Mehdikhani M., Naghashzargar E. et al.* // *Mater. Tech.* 2019. V. 34. No. 9. P. 540.
19. *Madbouly S.A., Mansour A.A., Abdou N.Y.* // *Eur. Polym. J.* 2007. V. 43. No. 9. P. 3933.
20. *Wu X.-F., Salkovskiy Y., Dzenis Y.A.* // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. No. 22. Art. No. 223108.
21. *Ero-Phillips O., Jenkins M., Stamboulis A.* // *Polymers.* 2012. V. 4. No. 3. P. 1331.
22. *Johnson C., Ganguly D., Zuidema J.M. et al.* // *Appl. Mater. Interfaces.* 2019. V. 11. No. 1. P. 356.
23. *Hao L., Li L., Wang P.* // *Nanoscale.* 2019. V. 11. No. 48. Art. No. 23423.
24. *Yun H.-M., Ahn S.-J., Park K.-R. et al.* // *Biomaterials.* V. 85. P. 88.
25. *Zviagin A.S., Chernozem R.V., Surmeneva M.A. et al.* // *Eur. Polym. J.* 2019. V. 117. P. 272.

Structure, physico-mechanical properties and piezoresponse of scaffolds based on polyhydroxybutyrate with composite magnetite/reduced graphene oxide filler

**L. E. Shlapakova^{a, *}, A. S. Pryadko^a, Yu. R. Mukhortova^a, D. V. Wagner^b,
M. A. Surmeneva^a, R. A. Surmenev^a**

^a *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia*

^b *National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia*

**e-mail: les2@tpu.ru*

The influence of fiber diameter and addition of composite filler magnetite/reduced graphene oxide on the properties of electrospun scaffolds of poly(3-hydroxybutyrate) has been studied. The magnetic composite filler provides good magnetic properties and piezoresponse of the scaffolds, while changing the fiber diameter allows controlling the ductility, crystallinity, and surface electric potential.