

натной температуре (25 ± 2 °С) в концентрациях 2–10 ppm. Основным параметром датчиков был отклик датчика (%):

$$S = \frac{R - R_0}{R_0} \cdot 100 \%$$

где R – сопротивление сенсора при воздействии NO_2 , Ом; R_0 – сопротивление сенсора при воздействии синтетического воздуха, Ом.

Исходя из результатов, представленных на рисунке 1а, видно, что отклик сенсоров к диоксиду азота растет с ростом концентрации НВУ в суспензии (НВУ- $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Это связано с тем, что с увеличением массы НВУ, увеличивается число частиц, с которыми взаимодействует NO_2 . Хотя, фактически, большая концентрация су-

спензии приводит к осаждению покрытия большей толщиной.

На рисунке 1б можно заметить, что более высокий отклик показал НВУ, диспергированный в этаноле ($\epsilon_{25^\circ\text{C}} = 24$) и пропанол-2 ($\epsilon_{20^\circ\text{C}} = 22$). Можно предположить, что частицы НВУ лучше распределились в спиртах, чем в ацетоне ($\epsilon_{25^\circ\text{C}} = 21$). И вследствие этого увеличился отклик датчика.

Таким образом, оптимизация способа нанесения НВУ на подложки газовых сенсоров во многом способствует повышению относительной чувствительности таких устройств по отношению к диоксиду азота.

Работа была выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки (FSUN-2023-0008).

Список литературы

1. *Bannov A.G. Room-Temperature NO_2 Gas Sensors Based on Granulated Carbon Nanofiber Material // Chemosensors. – 2022. – V. 10. – № 12. – P. 13.*

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ОСТЕОГЕННЫЕ СВОЙСТВА ПЬЕЗОПОЛИМЕРНЫХ МАГНИТОАКТИВНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНОЙ ТКАНИ

Л. Е. Шлапакова, А. С. Прядко, 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

Нарушения опорно-двигательного аппарата затрагивают 1,71 миллиарда людей в мире, снижая их мобильность, трудоспособность и качество жизни [1]. Способность костной ткани к самопроизвольному восстановлению ограничена. Разработки в области тканевой инженерии (ТИ) демонстрируют высокий потенциал в терапии травм опорно-двигательной системы [2]. Функциональные пористые скэффолды на основе полимеров выполняют функции внеклеточного матрикса, обеспечивая физическую поддержку и стимуляцию растущей ткани [3]. Пьезоэлектрические скэффолды при механической деформации способны имитировать биоэлектрические потенциалы, присущие костной ткани [4]. Перспективным материалом для ТИ является поли(3-оксибутират) (ПОБ) благодаря его биосовместимости, медленной биоразлагаемости, механической стабильности и пьезоэлектриче-

ским свойствам. В данной работе пористые волокнистые скэффолды на основе ПОБ получены эффективным и экономичным методом электроформования (ЭФ), позволяющим контролировать морфологию, кристаллическую структуру, физико-механические и пьезоэлектрические свойства волокон.

В магнитоэлектрических (МЭ) материалах поляризация пьезополимера осуществляется за счет магнитострикции магнитных частиц в переменном магнитном поле (МП) [5]. В качестве магнитного агента нами использовался композит, полученный химическим осаждением наночастиц магнетита на поверхности оксида графена (Fe_3O_4 -ОГ). Применение МЭ скэффолдов на основе пьезополимерной матрицы и распределенных в ней магнитных частиц ограничено в костной ТИ и требует комплексных исследований. Данное исследование направлено на выяв-

ление влияния композитного филлера Fe_3O_4 -ОГ на физико-химические и биологические свойства электроформованных скэффолдов ПОБ для ТИ костей.

Рентгенофазовый анализ позволил выявить изменения в кристаллической структуре полимера в композитных скэффолдах после внедрения 8 мас. % частиц Fe_3O_4 -ОГ, а именно формирование нанокристаллитов ПОБ и, как следствие, снижение средних размеров кристаллитов. Добавление Fe_3O_4 -ОГ в скэффолды ПОБ значительно усиливает удлинение при растяжении материала за счет указанных структурных изменений. Кроме того, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) показала наличие композитного филлера вблизи поверхности микроволокон скэффолда ПОБ/ Fe_3O_4 -ОГ, которое объясняется электростатическим притяжением оксида графена к поверхности волокон в ходе ЭФ. Методом атомной силовой микроскопии установлено повышение шероховатости поверхности волокон ПОБ/ Fe_3O_4 -ОГ (в среднем на 27 %) в сравнении с чистым ПОБ. Это наблюдение объясняется формированием пор на поверхности волокон после включения филлеров, а также наличием частиц филлеров вблизи поверхности волокон.

Клеточные эксперименты показали повышенную (практически в 3 раза) пролиферацию мезенхимальных стволовых клеток на поверхности композитных матриц ПОБ/ Fe_3O_4 -ОГ в

сравнении с чистым ПОБ. Данное наблюдение связано с поверхностными свойствами материала, а именно с повышенной шероховатостью композитных скэффолдов и наличием гидрофильных групп вблизи поверхности. Помимо этого, скэффолды были имплантированы в дефект бедренной кости крысы сроком на 4 недели. Данный *in vivo* эксперимент проводился как в обычных условиях, так и в переменном МП. При воздействии МП относительный объем сформировавшейся костной ткани с применением ПОБ/ Fe_3O_4 -ОГ существенно превышает объем костной ткани при имплантации чистого скэффолда ПОБ (20,5 % и 6,6 %, соответственно). В то же время, объем костной ткани с применением ПОБ/ Fe_3O_4 -ОГ в МП выше, чем в случае с ПОБ/ Fe_3O_4 -ОГ в обычных условиях (20,5 % и 8,1 %, соответственно). Описанные изменения предполагают МЭ и магнитомеханическую стимуляцию восстановления костной ткани. Таким образом, разработанный функциональный материал перспективен для применения в терапии нарушений опорно-двигательного аппарата.

Исследование проводится при поддержке Томского политехнического университета. Выражаем благодарность Мухортовой Ю. Р. за синтез материалов; коллективу кафедры биоинженерии МГУ под руководством Бонарцева А. П. за биологические эксперименты; аналитический центр ТПУ и Козадаеву М. за РФЭС-измерения.

Список литературы

1. Cieza A. et al. // *The Lancet*. – 2020. – 396. – 10267. – 2006–2017.
2. Yuan J. et al. // *Mater. Today Bio*. – 2022. – 15. – 100318.
3. Koons G.L., Diba M., Mikos A.G. // *Nat. Rev. Mater.* – 2020. – 5. – 8. – 584–603.
4. Liu J. et al. // *Nano Energy*. – 2023. – 115. – 108742.
5. Zhang Y. et al. // *Adv. Healthcare Mater.* – 2021. – 10. – 16. – 2100695.