

При этом исследуемые образцы Kevlar 200D обладали меньшими показателями огнезащитных свойств по сравнению с исследуемыми образцами Kevlar 400D, а также данными огнестойкости материалов по ГОСТ 11209-2014.

Сегодня известны разнообразные материалы для изготовления одежды автомобильного спорта, однако разработчики защитных комбинезонов продолжают искать перспективные материалы, решающие задачи улучшения их огнезащитных свойств, гибкости, эластичности, воздухопроницаемости при уменьшении веса.

Список литературы

1. Давлетбаев И.Г., Фазылзянова Д.Р. Сравнительная характеристика наполнителей в изделиях легкой промышленности // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 12. С. 102-104.
2. Сергеева Е.А., Костина К.Д. Анализ ассортимента арамидных волокон и их свойства // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 14. С. 124-125.
3. Хисамиева Л.Г., Шведчикова А.А., Абуталипова Л.Н. Сравнительный анализ подбора негорючего полимерного материала с низкой теплопроводностью и свойствами самозатухания для комбинезонов картенгистов и автогонщиков // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 9. С. 362-364.
4. ГОСТ 33842-2016. Волокно пара-арамидное. Общие технические требования и методы испытаний.

УДК 677.4

ВЛИЯНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО РАССТОЯНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ ЭЛЕКТРОФОРМОВАННЫХ НАНОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ INFLUENCE OF INTERELECTRODE DISTANCE ON THE MORPHOLOGY OF ELECTROSPUN NANOFIBROUS WEBS

Рыклин Д.Б., Демидова М.А., Карнилов М.С.
Ryklin D.B., Demidova M.A., Karnilov M.S.

*Витебский государственный технологический университет,
Витебск, Беларусь
Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus
(e-mail: ryklin-db@mail.ru, demidova.mariya00@gmail.com, alphamiha@mail.ru)*

Аннотация. Установлено влияние расстояния от эмиттера до коллектора на морфологию и свойства нановолокнистых материалов, получаемых методом электроформования для нужд медицины и косметологии. Описана структура, состав и параметры наработки

экспериментальных образцов. Предложены рекомендации по получению нановолокнистых материалов различной структуры, морфологии и профиля высвобождения функционального компонента.

Abstract. The influence of tip-to-collector distance on the morphology and properties of nanofibrous webs obtained by electrospinning for the needs of medicine and cosmetology has been established. The structure, composition and operating parameters of experimental samples are described. Recommendations are proposed for the production of nanofibrous materials of various structures, morphologies, and functional component release profiles.

Ключевые слова: электроформование, нановолокно, структура нановолокна, водорастворимый полимер.

Keywords: electrospinning, nanofiber, nanofiber structure, water-soluble polymer.

Перспективным методом получения микро- и нановолокон для создания различных инновационных материалов медицинского и косметического назначения является электроформование. С помощью данного метода возможно вырабатывать нановолокнистые материалы и покрытия разной структуры с заданным комплексом свойств. В настоящее время благодаря разнообразию свойств нановолокнистых материалов, покрытий и конструкций, они стали альтернативными терапевтическими средствами для многих сфер медицины [1]. Исследователями разрабатываются электроформованные материалы из натуральных и синтетических полимеров с заданной скоростью биodeградации, обладающие нетоксичностью и не вызывающие иммунного ответа у организма пациента; материалы с механизмом таргетной доставки, в которые включен специфический лекарственный компонент [2]; электроформованные конструкции, служащие подложкой для нарастания костной ткани и ткани органа, применяющиеся как *in vivo*, так и *in vitro* [3] и многие другие терапевтические средства, получаемые методом электроформования.

Характеристики электроформованных нановолокон определяются факторами, оказывающими влияние на протекание процесса электроформования, что доказано многочисленными исследованиями [5, 6]. Среди факторов процесса, оказывающих влияние на структуру и морфологию получаемых нановолокон, можно выделить напряжение в межэлектродном пространстве, расход прядильного раствора или скорость волокнообразования, расстояние от эмиттера до коллектора и вид коллектора. От структуры и морфологии нановолокна напрямую зависят его свойства, так, для водорастворимых полимеров наиболее значимым свойством является растворимость.

В связи с этим целью данного исследования было установление влияния расстояния от эмиттера до коллектора на структуру и морфологию получаемых нановолокнистых материалов, а также на скорость их растворения.

Получение нановолокнистых материалов происходило на установке для электроформования Fluidnatek LE-50 компании Bionicia (Испания), относящейся к капиллярному типу. На ней процесс получения нановолокон

осуществляется при подаче раствора через иглы (капилляры) в зону электроформования.

В качестве волокнообразующего полимера выступал поливиниловый спирт (ПВС) марки Arkofil компании Archroma (Швейцария). Данный полимер широко используется в медицине, поскольку нетоксичен, активизирует процессы проникновения и всасывания лекарственных средств через слизистые оболочки и кожу, а также имеет низкую стоимость. В качестве функционального компонента, добавляемого в волокно, выбран глицерин. Это связано с тем, что он обладает антисептическими свойствами, применяется при комплексном лечении многих заболеваний, способствует заживлению ран, предотвращает заражение и гноение.

Для проведения исследований было наработано 4 вида образцов нановолокнистых материалов из следующих растворов:

– 14 %-го водного раствора ПВС без добавления функциональных компонентов;

– 14 %-го водного раствора ПВС с добавлением 8 % глицерина.

Наработка образцов осуществлялась при различном расстоянии от эмиттера до коллектора. Параметры наработки экспериментальных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры наработки экспериментальных образцов

Параметр	Номер образца			
	1	2	3	4
Содержание ПВС в растворе, %	14	14	14	14
Содержание глицерина в растворе, %	0	0	8	8
Напряжение на эмиттере, кВ	28	30	28	30
Напряжение на коллекторе, кВ	-7	-10	-7	-10
Расстояние от эмиттера до коллектора, см	10	4	10	4
Расход прядильного раствора, мл/ч	2,0	7,0	1,0	1,5

Структура и морфология полученных образцов изучалась с помощью метода сканирующей электронной микроскопии посредством микроскопа LEO 1420 (Carl Zeiss, Германия). Изображения поверхности полученных нановолокнистых материалов при разном увеличении приведены на рисунке 1.

Проведенный анализ позволил установить, что полученные образцы визуально отличались друг от друга на макроуровне. Так, образцы 1 и 3, разного состава и полученные при расстоянии от эмиттера до коллектора 10 см характеризовались гладкостью, матовой поверхностью покрытия, высокой степенью равномерности, хорошо снимались с подложки. Образцы нановолокнистых материалов 2 и 4, наработанные при расстоянии 4 см, обладали визуально неровной поверхностью и блеском, отличались повышенной эластичностью, однако при этом так же равномерно снимались с подложки.

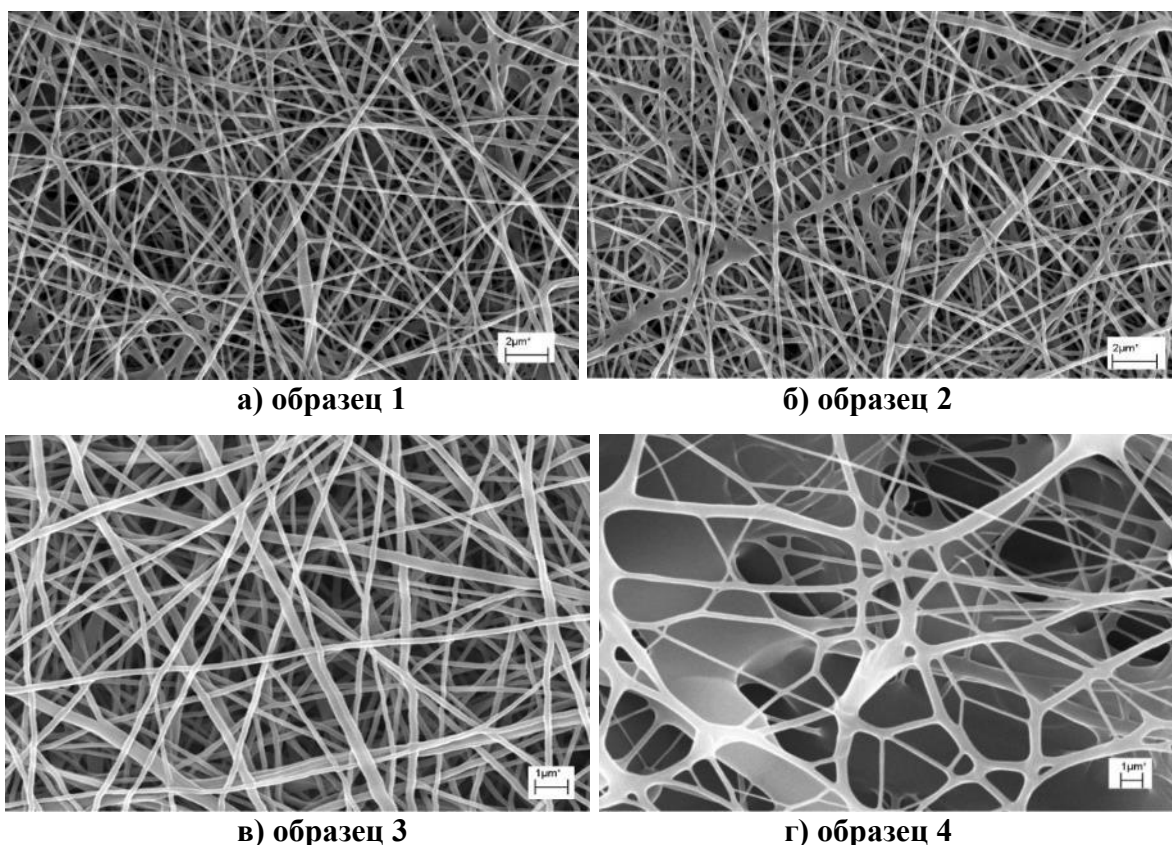


Рис. 1. СЭМ-изображения нановолокнистых материалов, полученные при увеличении в 10000 раз

Анализ электронных изображений полученных нановолокнистых материалов позволил установить, что характер структуры и морфологии нановолокон образцов 1 и 2 не имеет существенных отличий. Образцы нановолокнистых материалов, наработанных из раствора ПВС в чистом виде, независимо от расстояния представляли собой четко структурированный материал, являлись бездефектными.

Для образцов 3 и 4, полученных из раствора ПВС с добавлением глицерина, установлено следующее: при электроформовании образца 3 при расстоянии 10 см, получаемые нановолокна относительно гладкие, практически не образуют агломератов и являют собой четко структурированный массив, материалы бездефектные. При получении нановолокнистого материала 4 при расстоянии от эмиттера до коллектора 4 см на поверхности материала образуются дефекты в виде сгустков и растекшихся капель раствора. Структура образца видоизменяется, представляет собой наноразмерную сетку. Волокна частично слипаются, формируя агломераты различного размера и конфигурации.

Скорость растворения полученных образцов существенно отличалась. Образцы 1 и 3, наработанные при расстоянии от эмиттера до коллектора 10 см, при попадании на влажную поверхность растворялись мгновенно, образуя желеобразную пленку. Высвобождение функционального компонента глицерина в образце 3 начиналось мгновенно. Образцы нановолокнистых материалов 2 и 4, наработанные при расстоянии 4 см,

отличались повышенной стойкостью к растворению: при попадании на влажную поверхность они сохраняли структурную целостность в течение 5 мин, после чего медленно биodeградировали с образованием желеобразной пленки. Высвобождение функционального компонента глицерина в образце 4 происходило замедленно. Стоит также отметить, что выявленные особенности морфологии образца 4 нельзя характеризовать как дефекты, поскольку они относятся к категории контролируемых и напрямую влияют на описанные свойства разрабатываемых нановолокнистых материалов.

Проведенные исследования позволяют заключить, что структура и функциональные особенности нановолокнистых материалов, получаемых методом электроформования из водорастворимых полимеров, напрямую зависят от параметров процесса электроформования. Важную роль при этом играет состав прядильного раствора, а также характер включаемого в него функционального компонента. Управляя параметрами процесса электроформования и составом прядильных растворов возможно создавать нановолокнистые материалы различных свойств и назначения, в том числе с управляемым профилем высвобождения лекарственного компонента, а также особенностями нано- и макроструктуры.

Таким образом, можно заключить, что для получения нановолокнистых материалов с замедленным профилем высвобождения функционального компонента, контролируемыми особенностями структуры, такими как наличие большого числа агломератов волокон и сетчатость, а также с повышенной гибкостью и эластичностью, электроформование рекомендуется производить на расстоянии 4 см от эмиттера до коллектора. В случае необходимости получения хаотично ориентированных нановолокон с четкой структурой и границами, мгновенным высвобождением включенного функционального компонента рекомендуется производить электроформование на расстоянии 10 см от эмиттера до коллектора.

Список литературы

1. *Li Z., Wang C.* One-dimensional Nanostructures, Electrospinning technique and Unique Nanofibers. New York: Springer, 2013. 150 p.
2. *Wang H.S.* Functional polymeric nanofibers from electrospinning // *Recent Patents on Nanotechnology*. 2009. Vol. 3. P. 21.
3. *Huang Z.M. [et al.]* A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites // *Composites Science and Technology*. 2003. Vol. 63. P. 2223.
4. *Venugopal J., Ramakrishna S.* Applications of polymer nanofibers in biomedicine and biotechnology // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2005. Vol. 125. P. 147.
5. *Karakaş H.* Electrospinning of nanofibers and their applications // *Materials Science*. 2015. P. 1.
6. *Stace E.T.* Biomaterials: Electrospinning // *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)*. 2019. Vol. 5. P. 424.