

2. Абдуллин И.Ш. Красина И.В. Низкоэнергетическая ионная обработка натуральных высокомолекулярных материалов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. №10. С. 1-5.

3. И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, Н.Ф. Кашапов Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения / Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2000. 348 с.

4. Панкова Е.А. Применение наночастиц серебра и плазменной обработки для создания экологически полноценных технологий выделки меха // В мире научных открытий. 2010. №2 (08). С. 127-128.

5. И.Ш. Абдуллин, Е.А. Панкова Исследование влияния обработки наноматериалами в условиях ВЧИ плазмы на качество мехового полуфабриката из шкур овчины // «Нанотехника». 2008. № 3 (15). С. 64-66.

6. В.Х. Абдуллина, Е.А.Панкова Влияние плазмоактивации полипропиленового волокна на фиксацию наночастиц серебра на ее поверхности // Вестник Казанского технологического университета. 2009. №3. С. 53-56.

УДК 677.4

DOI: 10.37816/eeste-2021-2-168-172

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ MANUFACTURING OF MULTILAYER ELECTROSPUN NANOFIBROUS WEBS

**Рыклин Дмитрий Борисович, Ясинская Наталья Николаевна,
Демидова Мария Александровна, Азарченко Владислав Михайлович
Dzmitry B. Ryklin, Natallia N. Yasiskaya,
Maria A. Demidova, Vladislav M. Azarchenko**

*Витебский государственный технологический университет, Беларусь, Витебск
Vitebsk State Technological University, Belarus, Vitebsk
(e-mail: ryklin-db@mail.ru, yasinskaynn@rambler.ru, demidova.mariya00@gmail.com,
azarchenko22@mail.ru)*

Аннотация: Рассмотрены особенности получения многослойных нановолокнистых материалов методом электроформования. Определены наиболее перспективные области применения технологий производства многослойных нановолокнистых материалов для последующего использования в медицине и косметологии.

Abstract: The features of obtaining multilayer nanofibrous webs by electrospinning are considered. The most promising areas of application of multilayer nanofibrous webs technologies for subsequent use in medicine and cosmetology have been identified.

Ключевые слова: электроформование, многослойный материал, структура, нановолокно.

Keywords: electrospinning, multilayer web, structure, nanofiber.

Одним из наиболее перспективных направлений разработки инновационных материалов для медицины является применение метода электроформования, позволяющего получать 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 биомедицины [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.

Абсолютное большинство публикаций, касающихся исследований в области электроформования, посвящено созданию и изучению структуры и свойств однокомпонентных или многокомпонентных однослойных материалов. Такие материалы могут быть получены на установках самых разных конструкций, что в значительной степени определяет интерес исследователей к работам в данном направлении. Однако создание многослойных нановолокнистых материалов открывает ряд возможностей, существенно расширяя ассортимент продукции.

В Витебском государственном технологическом университете исследование процесса получения нановолокнистых материалов осуществляется с использованием установки Fluidnatek LE-50 компании Bionicia (Испания), на которой прядильный раствор подается при помощи дозатора через капилляры в зону электроформования. Создание многослойных материалов на установках Fluidnatek может осуществляться за счет последовательного использования нескольких прядильных головок или за счет применения коаксиальной прядильной головки, включающей внутреннюю и внешнюю иглы, через которые формовочный раствор может подаваться последовательно или одновременно [4].

Внешний вид установки Fluidnatek LE-50 представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид установки Fluidnatek LE-50

Анализ технологии производства нановолокнистых материалов позволил выделить следующие три случая, в которых целесообразно получение многослойных структур:

При высокой адгезии нановолокнистого материала определенного состава и назначения к подложке.

Известно, что методом электроформования могут быть получены как нановолокнистые материалы, так и материалы с нановолокнистым покрытием. В обоих случаях, как правило, нановолокнистый слой наносится на подложку, в качестве которой может выступать как текстильный материал, так и бумага. В первом случае слой снимается с подложки, а во втором – используется совместно с ней. При получении нановолокнистых материалов и покрытий процесс электроформования протекает одинаково. Однако к получаемому продукту предъявляются принципиально разные требования. Нановолокнистый материал должен обладать малой адгезией к подложке, то есть сниматься без повреждений и без миграции частиц подложки, особенно, в случае использования его в медицине [5]. В значительной степени данная задача решается выбором материала подложки. Однако практика показывает, что при использовании волокнообразующих полимеров на водной основе в ряде случаев в процессе электроформования из формовочного раствора не испаряется весь растворитель, что приводит к существенному повышению адгезии и возникновению последующих проблем при снятии материала с подложки. Замечено также, что ряд функциональных добавок, таких как

глицерин, раствор прополиса и др., существенно повышают адгезию, что приводит к возникновению проблем при снятии нановолокнистого материала с подложки. В этом случае исследователь может пойти по пути создания двухслойных материалов, нижний слой которого будет сформирован из нейтрального по свойствам полимера, обладающего низкой адгезией к подложке, а верхний – выполнять весь комплекс заданных функций.

При создании материалов, применение которых позволяет обеспечить последовательное выделение активных веществ в соответствии с принципом таргетной доставки.

С учетом применения разрабатываемых материалов в медицине и косметологии важным является вопрос о выборе биологически активных компонентов волокнообразующих растворов. Разрабатываемые на основе способа электроформования технологии позволяют получать неоднородные материалы разной структуры одновременно из нескольких растворов. Добавляемые в раствор активные вещества могут воздействовать на тело человека одновременно или последовательно, или с изменяющейся интенсивностью, что в значительной степени достигается формируемой структурой материала. Достижение заданного изменения свойств материала является сложной задачей, которая может быть решена путем создания многослойных материалов, полученных из полимеров с разной скоростью деградации и содержащих различные по виду и концентрации активные вещества. В качестве примера подобного материала можно привести двухслойный материал, нижний слой которого получен из поливинилового спирта с добавлением активных веществ, а верхний – из полилактида. Указанные полимеры имеют существенно разную скорость биodeградации, что позволяет управлять процессом таргетной доставки лекарств при их применении. Водный раствор поливинилового спирта при получении образца подавался через внутреннюю иглу коаксиальной прядильной головки, а раствор полилактида в хлороформе – через внешнюю иглу. Нанесение нижнего слоя осуществлялось в течение 40 минут, а внешнего слоя – 2 минуты, что связано особенностями процесса биodeградации и выполняемых ими функций. Для изучения структуры полученных материалов и влияния на неё состава и расхода формовочного раствора были получены их изображения при различном увеличении с использованием электронного сканирующего микроскопа LEO 1420 (Carl Zeiss, Германия). На рисунке 2 а видно, что полилактидные волокна формировались менее стабильно и характеризуются высокой неравномерностью по толщине, в то время как поливинилспиртовые волокна, близкие по толщине, образовывали равномерный слой. Средняя толщина поливиниловых волокон составила 160 нм.

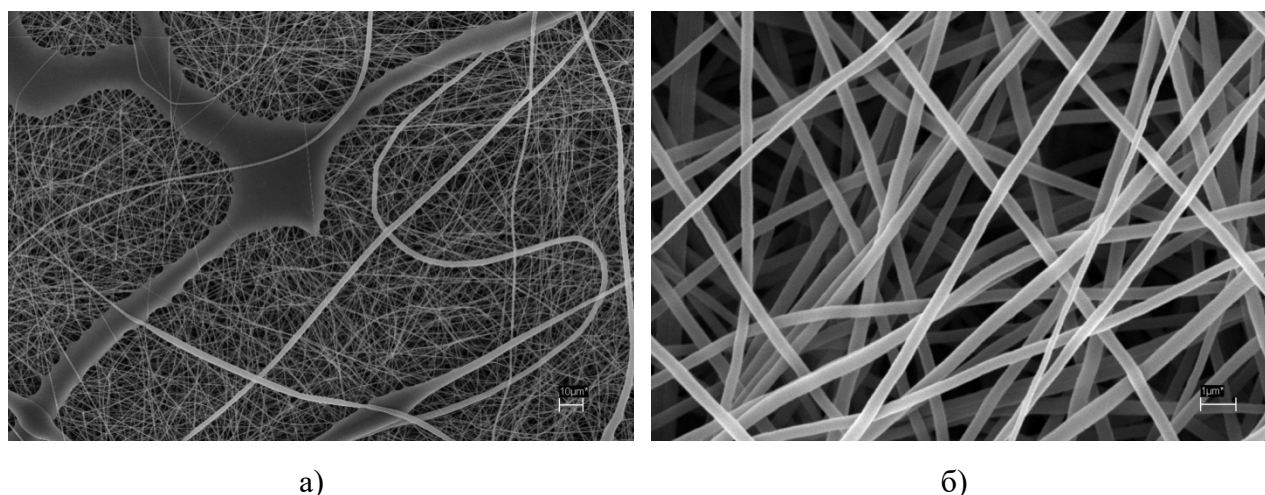


Рисунок 2 – Изображения двухслойного нановолокнистого материала (поливиниловый спирт/полилактид):

а – получено при увеличении в 1000 раз, б – получено при увеличении в 15 000 раз

При создании нановолокнистых структур, которые обеспечивают инкапсулирование активных веществ, характеризующихся достаточно высокой летучестью.

В этом случае наличие нескольких слоев позволяет инкапсулировать активное вещество косметологического или медицинского применения внутри полимера, а также обеспечивает медленное и постепенное выделение добавленного в полимер активного вещества, что обуславливает его хорошую впитываемость и позволяет точно рассчитать дозировку. В качестве активного вещества для инкапсуляции во внутреннем слое нарабатываемого трехслойного нановолокнистого материала при проведении исследований было выбрано масло розового дерева. Оно способствует повышению эластичности кожи, подходит для любого типа кожи, обладает антикуперозным действием, смягчает, питает, способствует улучшению микроциркуляции, ускоряет процесс рассасывания рубцов и растяжек, отбеливает, успокаивает кожу, эффективно при заболеваниях кожи [6]. Трехслойная структура выбрана для того, чтобы предотвратить испарение масла, которое может привести к полной или частичной утрате ценных свойств материала.

Получение трехслойного материала происходило в следующей последовательности. На первом этапе на подложку осуществлялось нанесение нановолокнистого слоя из водного раствора поливинилового спирта с использованием одного из капилляров. При формировании второго слоя в дополнение к поливиниловому спирту через второй капилляр подавался раствор масла розового дерева. На заключительном этапе снова формируется слой из поливинилового спирта. Можно отметить, что наличие во внутреннем слое масла розового дерева никак не проявляется на полученных фотографиях получаемых материалов. Однако в процессе формирования внешнего слоя оно оказало влияние на его морфологию. Заметно, что во внешнем слое, сформированном из поливинилового спирта без каких-либо добавок, значительная часть волокон приобрела извитый вид (рис. 3), что может быть объяснено изменением характеристик электростатического поля вблизи коллектора из-за наличия на закрепленной на нем подложке масла розового дерева.

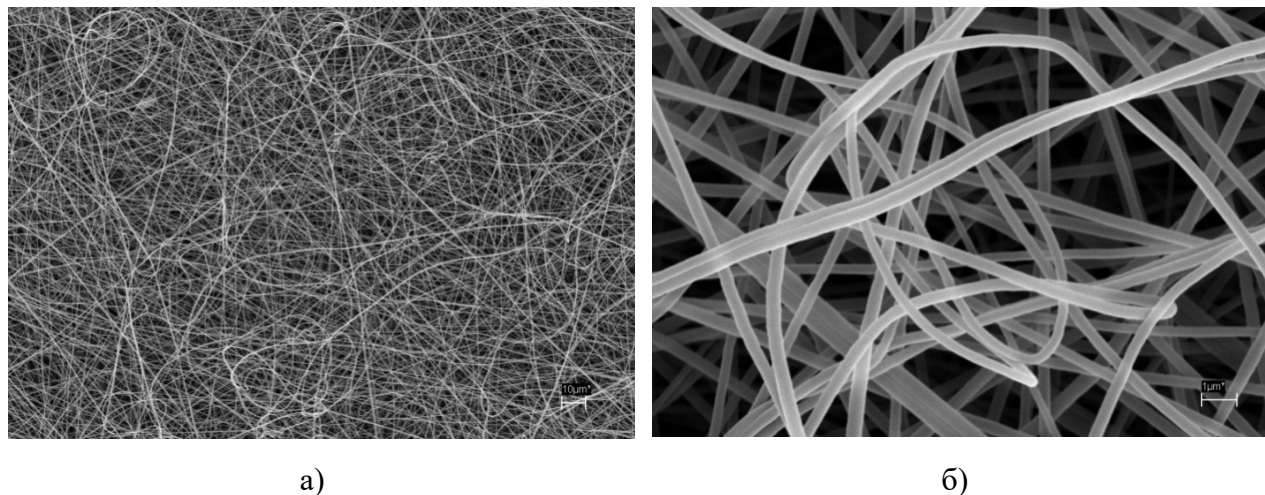


Рисунок 3 – Изображения трехслойного нановолокнистого материала с инкапсулированным маслом розового дерева в среднем слое
а – получено при увеличении в 1000 раз, б – получено при увеличении в 15 000 раз

Проведение исследовательских работ по каждому из указанных направлений позволит создать новый ассортимент нановолокнистых материалов, обладающих заданным комплексом свойств, значительно расширив возможности технологии электроформования по сравнению с получением традиционных однослойных материалов.

Выводы

В результате анализа современного ассортимента нановолокнистых материалов, предназначенных для использования в медицине и косметологии, и процесса электроформования, выявлено, что получение многослойных нановолокнистых структур является целесообразным в следующих случаях:

- при высокой адгезии к подложке нановолокнистого материала, использование которого предполагает его снятие после нанесения;
- при создании материалов, применение которых позволяет обеспечить последовательное выделение активных веществ в соответствии с принципом таргетной доставки;
- при создании нановолокнистых структур, которые обеспечивают инкапсулирование активных веществ, характеризующихся достаточно высокой летучестью.

Создание многослойных нановолокнистых материалов позволяет существенно расширить ассортимент изделий для косметологии и медицины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Juncos Bombin A.D., Dunne N.J., McCarthy H.O. Electrospinning of natural polymers for the production of nanofibres for wound healing applications // *Materials Science and Engineering: C*. V. 114. September 2020. 110994.
2. Stace E.T., Mouthuy P.A., Carr A.J., Ye H.(C.) Biomaterials: Electrospinning // *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)*. V. 5. 2019. P. 424-441
3. Rahmati M., Mills D.K., Urbanska A.M., Saeb M.R., Venugopal J.R., Ramakrishna S., Mozafari M. Electrospinning for tissue engineering applications // *Progress in Materials Science*. August 2020. 100721
4. Рыклин Д.Б., Азарченко В.М., Демидова М.А. Определение рациональных режимов электроформования с использованием прядильных головок различной конструкции // *Химические волокна*. – 2019. – № 4. – с. 13.
5. Демидова М.А., Азарченко В.М., Рыклин Д.Б. Определение влияния параметров электроформования на равномерность нановолокнистого покрытия // *Международный научно-практический симпозиум «Прогрессивные технологии и оборудование: текстиль, одежда, обувь»: сборник материалов*. – Витебск, 2020.
6. Cosmobase. Косметическая база [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cosmobase.ru/handbook/show/ROSEWOOD_ESSENTIAL_OIL. – Дата доступа: 25.02.2021.