

## **ВЛИЯНИЕ ВИДА ПОДЛОЖКИ НА СТРУКТУРУ НАНОВОЛОКНИСТЫХ ГЕМОСТАТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ**

### **INFLUENCE OF THE TYPE OF SUBSTRATE ON THE STRUCTURE OF NANOW- WEAR HEMOSTATIC COATINGS OBTAINED BY ELECTROSPINNING**

М.С. Карнилов, Д.Б. Рыклин  
M.S. Karnilov, D.B. Ryklin

Витебский государственный технологический университет (Республика Беларусь)  
Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus)  
E-mail: alphamiha@mail.ru, ryklin-db@mail.ru

**Исследован технологический процесс получения материалов с гемостатическими нановолокнистыми покрытиями, получаемыми методом электроформования. Определено влияние вида подложки на рациональные режимы процесса электроформования и морфологию получаемых нановолокон.**

**Ключевые слова:** электроформование, нановолокно, гемостатический, поливиниловый спирт, коллаген, пергаментная бумага.

**The technological process of obtaining materials with hemostatic nanofibrous coatings obtained by electrospinning methods was studied. The influence of the type of substrate on the rational modes of the electrospinning process and the morphology of the resulting nanoconons was determined.**

**Key words:** electrospinning, nanofiber, hemostatic, polyvinyl alcohol, collagen, parchment paper.

Электроформование – это способ получения полимерных волокон в результате действия электростатических сил на электрически заряженную струю полимерного раствора или расплава.

В настоящее время электроформование является эффективным и доступным, гибким методом получения микро- и нановолокон для разнообразных областей применения, включая биотехнологию, доставку лекарств, заживление ран, тканевую инженерию, микроэлектронику, защиту окружающей среды, сбор и хранение энергии [1]. Интерес к производству электроформованных нетканых нановолокнистых материалов, покрытий и структур повышается, что связано с их уникальными свойствами.

Среди факторов процесса электроформования, оказывающих влияние на структуру и морфологию получаемых нановолокон выделяют разность потенциалов в межэлектродном пространстве, расход прядильного раствора или скорость волокнообразования, расстояние от эмиттера до коллектора и вид коллектора, а также состав прядильного раствора [2]. От структуры и морфологии нановолокна напрямую зависят его свойства, такие как плотность, паропроницаемость, растворимость.

Также немаловажным фактором, оказывающим влияние на используемые режимы при получении материала, является вид используемой подложки.

Ранее была разработана технология получения гемостатического материала на основе поливинилового спирта (ПВС), хлорида алюминия и хлорида железа методом электроформования [3]. Данный материал обладал достаточным гемостатическим эффектом, полностью растворялся в организме. При анализе результатов его практической апробации возникло предложение о разработке нового двухслойного материала, один из слоев которого будет растворяться быстро, обеспечивая необходимый гемостатический эффект, а второй будет медленно биodeградировать, устраняя возможность образования спаек. В связи с этим было предложено наносить нановолокнистое покрытие на подложку из биodeградирующего материала.

Для установления зависимости рационального режима процесса электроформования от используемой подложки, был проведен эксперимент с применением следующих видов подложек: силиконизированная пергаментная бумага, коллагеновая пленка, плёнка из поливинилового спирта с добавлением глицерина и желатина, плёнка на основе поливинилового спирта. Последний из вариантов подложки разработан в ИОНХ НАН Беларуси на основе водного раствора, содержащего 2,5 % ПВС и 2,5 % Na-карбоксиметилцеллюлозы. В качестве пластификаторов использовались глицерин 0,02 % раствор гиалуроновой кислоты.

Пергаментная силиконизированная бумага выступала в качестве контрольного образца подложки, так как ранее на ней удавалось получить большинство материалов из различных прядильных растворов на предыдущих этапах исследований.

В качестве волоконобразующего полимера выступал поливиниловый спирт. ПВС широко используется в медицине, поскольку нетоксичен, активизирует процессы проникновения и всасывания лекарственных средств через слизистые оболочки и кожу, а также имеет низкую стоимость. Таргет-компонентом лекарственного назначения, добавленным в нановолокно, стал глицерин, поскольку он выступает в роли антисептика при комплексном лечении многих заболеваний, способствует заживлению ран, препятствует заражению и гноению.

В рамках исследования были наработаны образцы материалов с нановолокнистыми покрытиями из водного раствора, содержащего из 9 % ПВС и 0,9 % хлорида алюминия, который обеспечивает гемостатический эффект. Рациональные режимы процесса электроформования представлены в таблице.

Таблица 1.

Рациональные режимы процесса электроформования опытных образцов

| Наименование параметра                       | Образец 1           | Образец 2           | Образец 3                                               | Образец 4            |
|----------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|
| Расход, мл/ч                                 | 1,7                 | 1,7                 | 1,8                                                     | 1,8                  |
| Расстояние между эмиттером и коллектором, см | 10                  | 10                  | 10                                                      | 10                   |
| Потенциал эмиттера, кВ                       | 23                  | 27                  | 27                                                      | 28                   |
| Потенциал коллектора, кВ                     | -5                  | -6                  | -7                                                      | -6                   |
| Материал подложки                            | Пергаментная бумага | Коллагеновая пленка | Пленка на основе ПВС с добавлением глицерина и желатина | Пленка на основе ПВС |

Для анализа структуры полученных образцов использован метод сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа LEO 1420 (Carl Zeiss, Германия). Изображения поверхности нановолокнистых материалов приведены на рисунках 1 – 4. Можно отметить, что вид подложки оказывает влияние на микроструктуру получаемых покрытий, в том числе на количество пороков и на распределение хлорида алюминия.

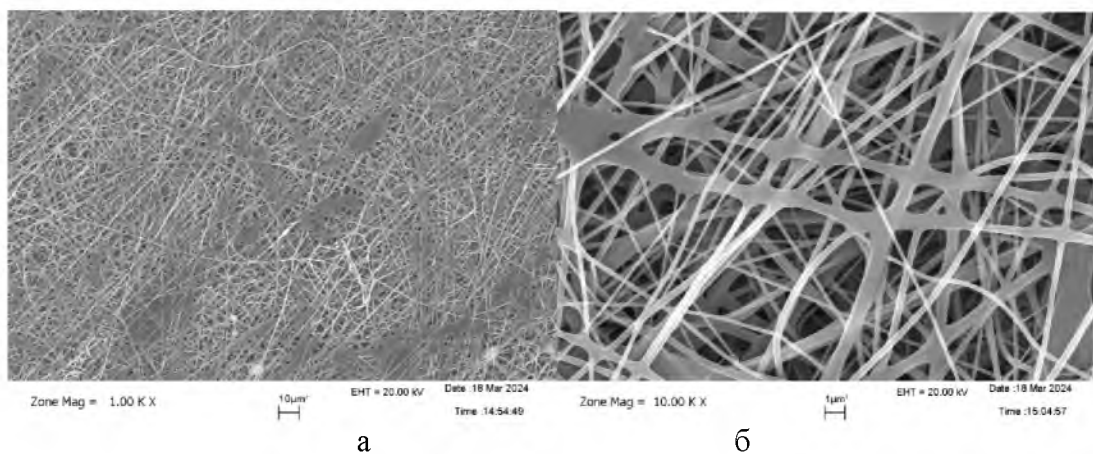


Рис. 1. СЭМ-изображение образца 1 (а –  $\times 1000$ , б –  $\times 10000$ )

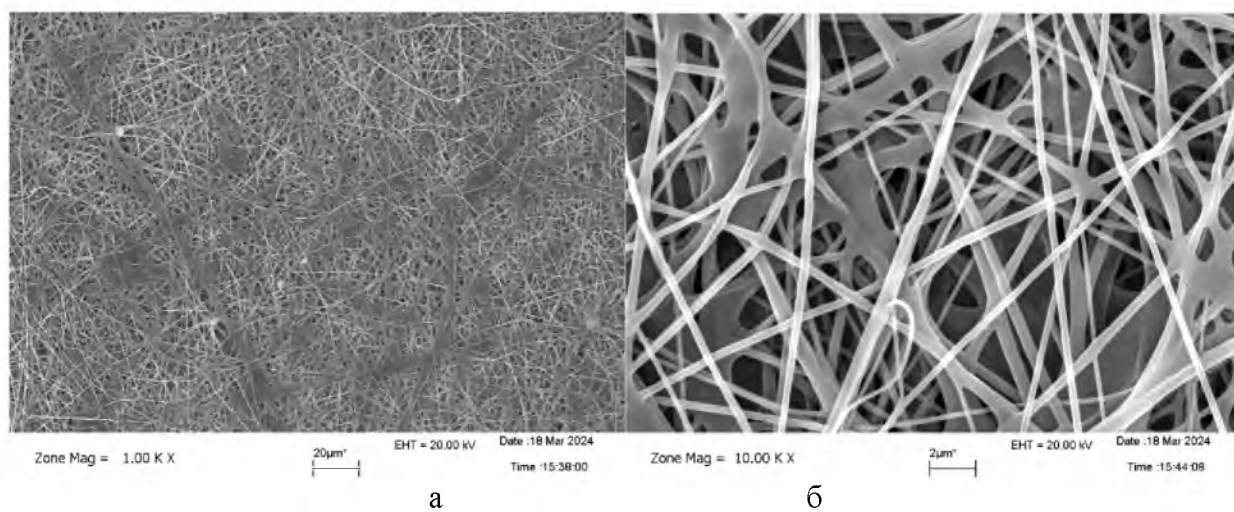


Рис. 2. СЭМ-изображение образца 2 (а –  $\times 1000$ , б –  $\times 10000$ )

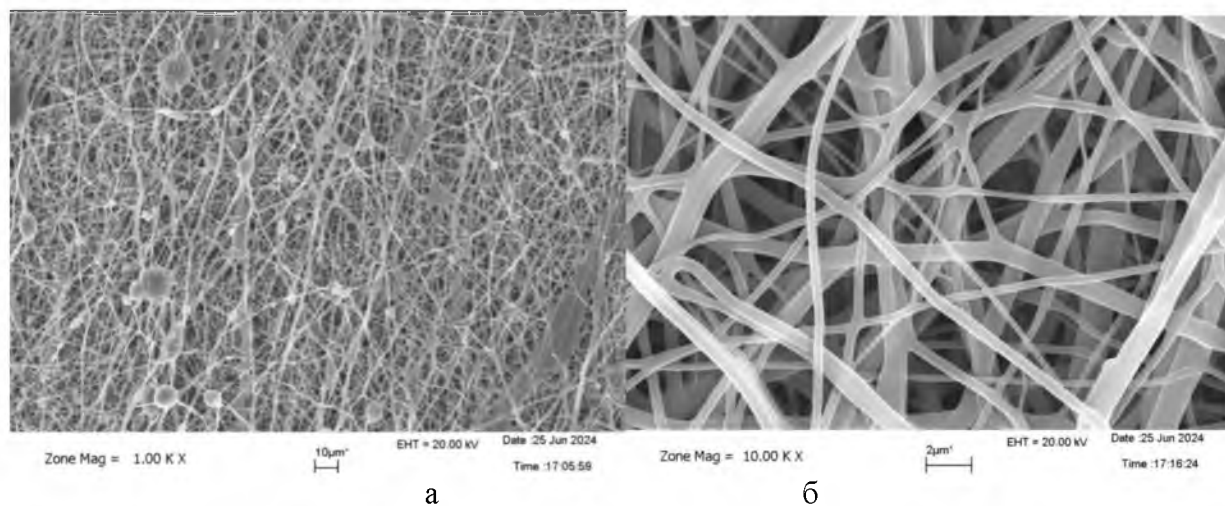


Рис. 3. СЭМ-изображение образца 3 (а –  $\times 1000$ , б –  $\times 10000$ )

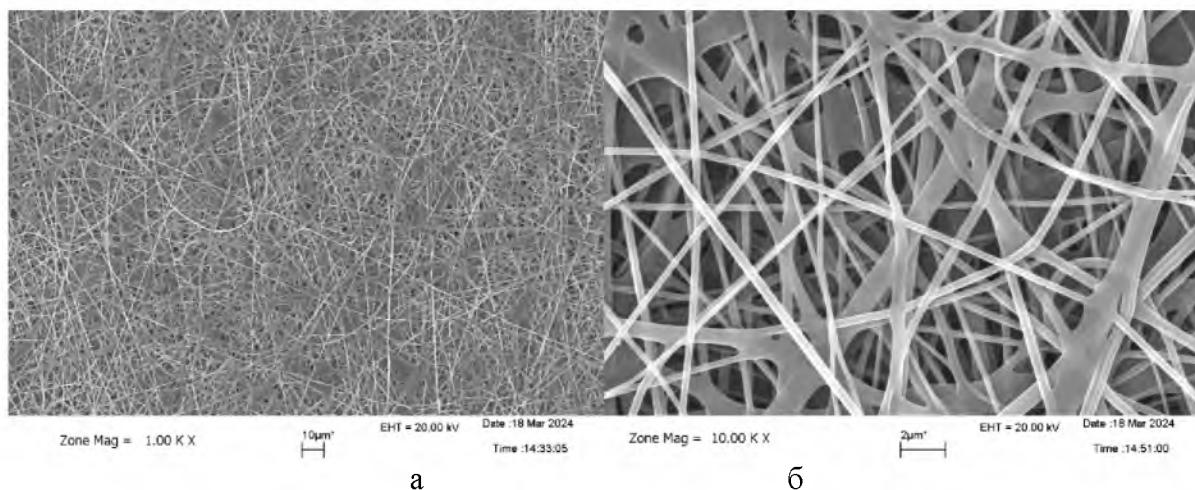


Рис. 4. СЭМ-изображение образца 4 (а –  $\times 1000$ , б –  $\times 10000$ )

Анализируя данные таблицы, можно отметить, что для стабильного нанесения наоволокнистого покрытия на биodeградирующие подложки необходимо было повышать разность потенциалов эмиттера и коллектора. При этом расход прядильного раствора практически не зависел от вида используемой подложки.

На рисунке 4 представлены гистограммы распределения нановолокон по диаметру в покрытиях полученных образцов. В результате анализа полученных гистограмм выявлено, что распределение нановолокон по диаметру в полученных образцах соответствует логнормальному закону. Это, в свою очередь, дает возможность утверждать, что процесс электроформования данных образцов является стабильным.

В таблице 2 представлены результаты статистической обработки данных, полученных при измерении диаметров нановолокон.

Таблица 2

Характеристика нановолокон в полученных образцах

| Образец | Вид подложки                                            | Средний диаметр волокон, нм | Коэффициент вариации по диаметру, % |
|---------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1       | Пергаментная бумага                                     | 275                         | 50,83                               |
| 2       | Коллагеновая плёнка                                     | 290                         | 34,29                               |
| 3       | Пленка на основе ПВС с добавлением глицерина и желатина | 299                         | 51,39                               |
| 4       | Плётка на основе ПВС                                    | 323                         | 40,26                               |

На основе полученных данных, установлено, что диаметры нановолокон во всех покрытиях находятся в диапазоне от 70 до 1110 нм, а коэффициент вариации по диаметру находится в диапазоне от 34 до 51 %. Средние значения диаметров волокон в исследованных образцах отличались несущественно и варьировались в диапазоне от 275 до 323 нм. При рассчитанных высоких значениях коэффициента вариации разница между средними диаметрами волокон не является статистически значимой.

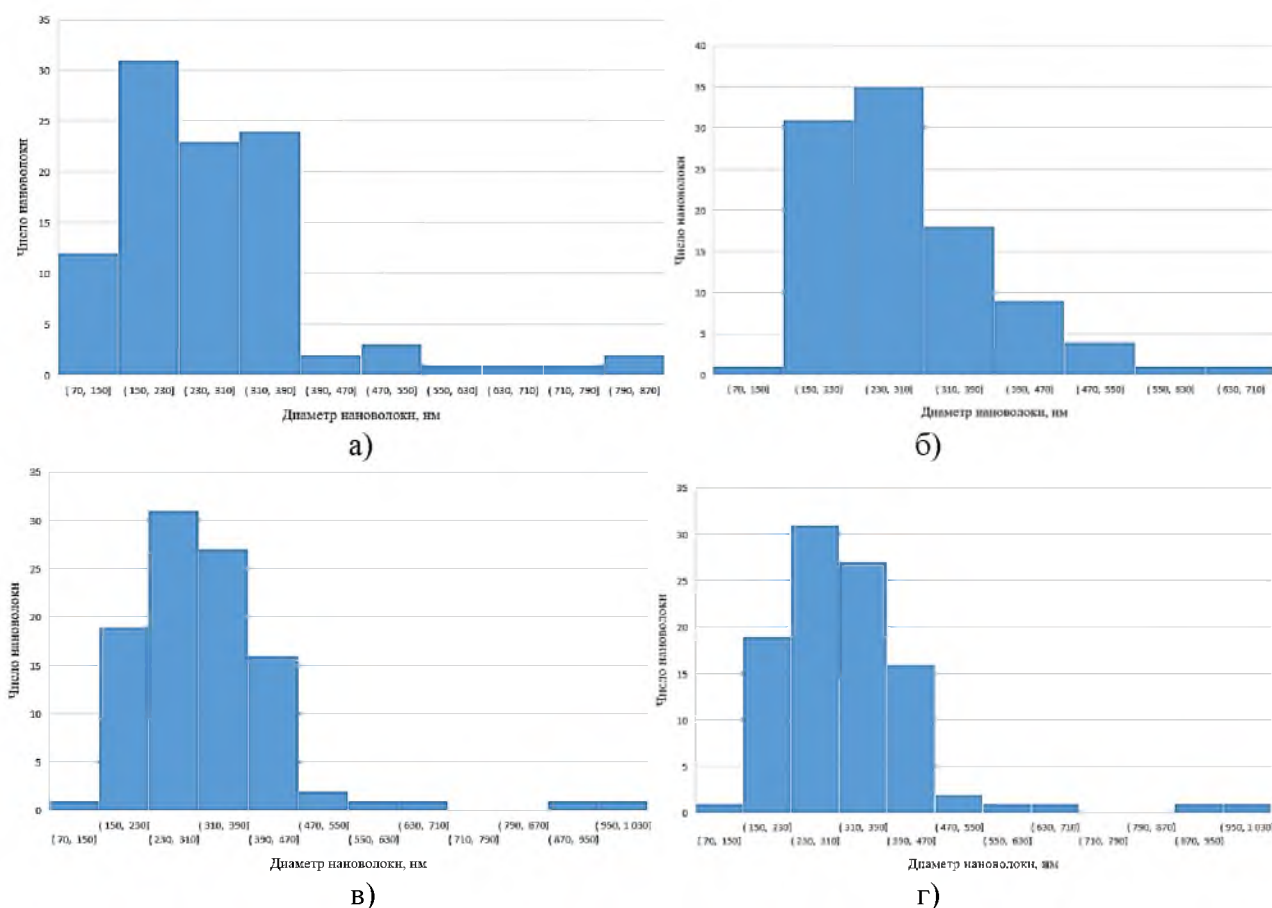


Рис 5. Гистограммы распределения нановолокон по диаметру в покрытия:  
а) образец 1; б) образец 2; в) образец 3; г) образец 4

На следующем этапе исследований планируется апробация полученных материалов с нановолокнистыми покрытиями на биологических объектах для оценки гемостатического эффекта и скорости их биodeградации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites / Z.M. Huang [et al.] // Composites Science and Technology. – 2003. – Vol. 63. – P. 2223–2253.
2. Рыклин, Д.Б. Влияние межэлектродного расстояния на морфологию электроформованных нановолокнистых материалов / Д.Б. Рыклин, М.А. Демидова, М.С. Карнилов // IV Международный Косыгинский Форум. Сборник научных трудов. Часть 1 – 2024 – Москва: С. 283 - 287.
3. Рыклин, Д.Б. Получение гемостатических пленок методом электроформования / Д. Б. Рыклин, Новицкая В.А., Демидова М.А., Гвоздев С.В. // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). Журнал. № 1 – 2021 – Иваново: С. 206-211.