

КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОВОЛОКОН В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА

Рыбалка А. В.¹

Научный руководитель – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник Снетков П. П.¹

¹Университет ИТМО

al.v.rybalka@itmo.ru

Работа выполнена в рамках ПО НИОКТР №425047 «Разработка лабораторной установки для электроспиннинга нановолокон на основе оксидов металлов».

Введение

Нановолокнистые материалы отличаются высокой удельной поверхностью, развитой пористостью и широким спектром применений: от тканевой инженерии и биомедицины до фильтрации и энергетики [1]. Электроспиннинг представляет собой метод формирования нановолокон за счет вытягивания полимерной нити из формирующего раствора в электрическом поле высокой напряженности. Характеристики получаемых волокон — их диаметр, равномерность (упорядоченность) и отсутствие структурных дефектов — зависят от совокупности технологических факторов, что определяет возможности целенаправленного регулирования свойств материала.

В литературе отмечается, что оптимизация технологических параметров позволяет существенно улучшить морфологические характеристики нановолокон и повысить их эксплуатационные свойства [2]. Однако отсутствует исчерпывающая информация о влиянии отдельных параметров процесса на структуру волокон, что затрудняет воспроизводимость результатов и унификацию методов при масштабировании процесса с лабораторной установки к промышленным системам.

Актуальность работы заключается в необходимости структурированного обзора влияния ключевых параметров процесса электроспиннинга на морфологию нановолокон для разработки подходов получения нановолокнистых материалов с заданными свойствами.

Основная часть

Процесс электроспиннинга определяется многими взаимосвязанными параметрами, которые можно разделить на группы: параметры формирующего полимерного раствора, технологические параметры и условия окружающей среды.

Параметры раствора — такие как тип полимера, его молекулярная масса, концентрация, тип растворителя, вязкость раствора, проводимость и поверхностное натяжение — оказывают существенное влияние на морфологические характеристики волокон. В недавних исследованиях подчеркивается, что низкая вязкость раствора и недостаточная концентрация полимера приводят к нестабильному формированию струи и дефектам типа «бусин», тогда как оптимальные диапазоны вязкости способствуют формированию гладких, однородных и бездефектных волокон с контролируемым диаметром [1].

Технологические параметры, включая напряжение, силу тока и конфигурацию электрического поля, также играют важную роль. Увеличение приложенного напряжения усиливает электростатическое растяжение струи, что в ряде случаев уменьшает средний диаметр волокон; однако при чрезмерных значениях может наблюдаться усиление нестабильностей процесса и расширение распределения диаметров [3]. К этой же категории параметров относятся параметры установки, такие как расстояние между иглой и коллектором, диаметр формирующей фильеры и скорость подачи раствора, определяют кинетику вытягивания струи и время испарения

растворителя. Например, недостаточное расстояние может приводить к неполному испарению растворителя и укладке волокон, а избыточное расстояние — к излишнему истончению и снижению механической прочности волокнистого мата.

Условия окружающей среды (температура и относительная влажность воздуха) также существенно влияют на фазовые процессы в струе и формирование поверхности волокон. Повышенная влажность может стимулировать пористую морфологию из-за фазового разделения, что в ряде случаев используется для получения материалов с заданной текстурой поверхности [4].

Анализ современных публикаций показывает, что изолированное изменение параметра не всегда приводит к предсказуемому результату из-за сильных взаимосвязей между всеми факторами процесса. В качестве перспективных подходов предлагается применение методов планирования эксперимента и многопараметрической оптимизации для выявления статистически значимых факторов и их взаимодействий. Кроме того, современные исследования указывают на перспективы использования математического моделирования и машинного обучения для предсказания морфологии на основе входных параметров процесса [5].

Таким образом, комплексный системный подход к оптимизации параметров электроспиннинга позволяет перейти от эмпирического подбора к целенаправленному управлению структурой нановолокон.

Выводы

Морфология нановолокон, получаемых методом электроспиннинга, определяется совокупным воздействием характеристик формирующего раствора, технологических параметров процесса, а также условий окружающей среды. Анализ современных исследований показывает, что только комплексная систематизация факторов и применение методов оптимизации позволяют обеспечивать воспроизводимость морфологических характеристик, узкое распределение диаметров волокон и снижение дефектов. Предложенные подходы могут быть использованы при разработке функциональных материалов для фильтрации, биомедицины и энергетики, а также при масштабировании технологических процессов.

Литература

1. Cho Y. Electrospinning and Nanofiber Technology: Fundamentals, Innovations, and Applications / Y. Cho, J. W. Baek, M. Sagong, S. Ahn, J. S. Nam, I.-D. Kim // *Adv. Mater.* – 2025. – Vol. 37. – 2500162. – DOI 10.1002/adma.202500162.
2. Venmathi Maran B. A. A Review on the Electrospinning of Polymer Nanofibers and Its Biomedical Applications / B. A. Venmathi Maran, S. Jeyachandran, M. Kimura // *J. Compos. Sci.* – 2024. – Vol. 8. – P. 32. – DOI 10.3390/jcs8010032.
3. Farahani A. H. Electrospinning of nanofibers and the functional potential of starch: a comprehensive review / A. H. Farahani, R. Z. Moghadam, M. Marandi // *Discover Nano.* – 2026. – Vol. 21. – P. 24. – DOI 10.1186/s11671-026-04434-8.
4. Mailley D. A Review on the Impact of Humidity during Electrospinning: From the Nanofiber Structure Engineering to the Applications / D. Mailley, A. Hébraud, G. Schlatter // *Macromol. Mater. Eng.* – 2021. – Vol. 306. – 2100115. – DOI 10.1002/mame.202100115.
5. Subeshan B. Machine learning applications for electrospun nanofibers: a review / B. Subeshan, A. Atayo, E. Asmatulu // *J Mater Sci.* – 2024. – Vol. 59. – P. 14095–14140. – DOI 10.1007/s10853-024-09994-7.