

АНАЛИЗ ЭТАПОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОФОРМИРОВАНИЯ НАНОВОЛОКОН. ЭТАП ОБРАЗОВАНИЯ ОЧАГОВ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ РАСТВОРА*

ANALYSIS OF THE ELECTROFORMING PROCESS STEPS NANOFIBERS. PHASE FORMATION OF FOCI OF THE JET STREAM OF THE SOLUTION

А.Р. КОРАБЕЛЬНИКОВ
A.R. KORABELNIKOV

(Костромской государственной технологической университет)
(Kostroma State Technological University)
E-mail: tmm@kstu.edu.ru

Электроформирование нановолокон из растворов полимеров является одним из самых перспективных способов получения новых нановолокнистых материалов. Статья посвящена обзору основных закономерностей этапа образования очагов струйного течения раствора полимера с его свободной поверхностью.

Electroforming nanofibers from polymer solutions is one of the most promising ways to obtain new nanofibrous materials. Article reviews the basic laws of the step of forming centers of the jet stream of the polymer solution with its free surface.

Ключевые слова: нановолокна, электроформирование, электроспиннинг.

Keywords: nanofibers, electroforming, elektrospinning.

Одним из наиболее перспективных способов получения новых нановолокнистых материалов является способ электроформирования. Этот способ обладает некоторыми ограничениями в промышленном применении, но в поисковых исследованиях является одним из самых универсальных и доступных методов получения новых нановолокнистых материалов [1], [2].

Суть процесса образования нановолокон заключается в следующем. На раствор или расплав полимерного материала, подаваемого через заряженную фильеру или нанесенного на поверхность электрода, воздействуют силы электростатического поля, под действием которых с поверхности раствора образуется поток волокон, который осаждается на противоположный электрод. Несмотря на широкий интерес исследователей к этому способу и к полу-

чаемому волокнистому продукту, процесс электроформирования до конца не изучен и раскрывает широкие перспективы получения новых материалов.

Анализируя процесс электроформирования, можно сказать, что он состоит из нескольких основных этапов: образование очагов струйного течения раствора полимера (конусов Тейлора); струйное течение раствора полимера в электростатическом поле, сопровождающееся расщеплением, утонением и отрывом струй; осаждение волокон на приемный электрод.

Здесь и далее нами рассматривается вариант реализации процесса электроформирования волокон со свободной поверхности электрода, описанный в работах [3...6]. Этот метод представляет большой интерес как наиболее производительный.

* Работа выполнена по государственному заданию на выполнение научных исследований по проекту № 1058.

В данной статье приведено описание и анализ исследований первого этапа электроформирования волокон из раствора полимера. На этом этапе на поверхности раствора под действием кулоновских сил и сил поверхностного натяжения образуются очаги струйного течения. На рис. 1 представлена принципиальная схема процесса электроформирования нановолокон со свободной поверхности раствора полимера нанесенного на электрод. Здесь ω – угловая скорость вращения электрода, погруженного в ванну с раствором; l_1, l_2, l_n – расстояния между очагами струйного движения раствора.

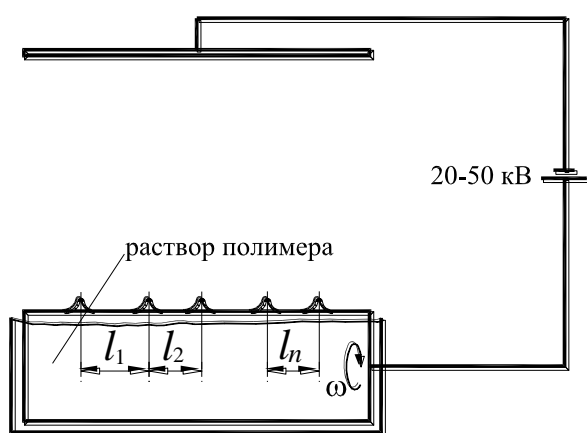


Рис. 1

Вращение электрода в ванне с раствором полимера приводит к образованию тонкой пленки раствора на его поверхности. Под действием сил электростатического поля, вызванного высокой разностью потенциалов между электродами, на поверхности раствора образуются конические образования ("конус Тейлора"), которые при последующей работе установки становятся очагами струйного движения раствора к противоположному электроду. Подобных очагов на поверхности раствора, нанесенного на электрод, образуется множество. Как показали наши исследования¹, процесс, как правило, начинается с образования нескольких очагов на поверх-

¹ Исследования проводились на макете установки для электроформирования, созданной с помощью ООО "Шар".

ности раствора, расположенных на различном расстоянии друг от друга. Очаги перемещаются вдоль оси вращающегося электрода, количество очагов увеличивается, и они образуют на поверхности электрода некоторую самоорганизованную структуру. При дальнейшем протекании процесса с поверхности раствора начинается струйное движение раствора. Этапы изменения формы конических образований на поверхности раствора во времени показаны на рис. 2: а) – начальный этап образования утолщения на поверхности раствора; б) – развитие процесса, появление конического образования, так называемого "конуса Тейлора"; в) – начало струйного течения раствора полимера.

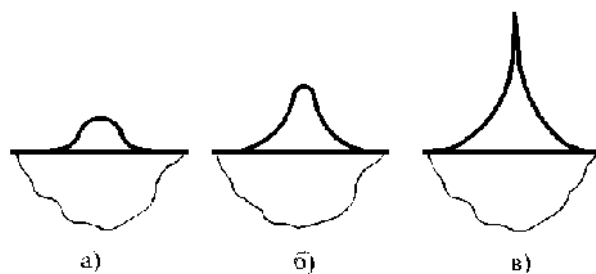


Рис. 2

В работе [7] приводится выражение, позволяющее определить критическую напряженность электростатического поля, при которой из капли раствора начинается струйное течение жидкости.

$$E_{кр} = \sqrt[4]{\frac{\alpha \pi}{r}}. \quad (1)$$

Здесь α – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; r – радиус капли; $E_{кр}$ – критическая напряженность электростатического поля, при которой начинается струйное движение жидкости. Выражение получено для нулевого расхода жидкости. Очевидно, что при создании модели, из которой получено данное выражение, не учитывались электрические свойства жидкости.

Выражение (1) получено для капиллярного способа подачи раствора полимера в рабочую зону [7]. Для этого же способа в работе [7] приводится выражение для оп-

ределения критической напряженности электростатического поля, полученное с учетом размеров капилляра:

$$E_{кр} = x^2 \sqrt{2\pi \left(\frac{2\alpha a}{b^2} - \rho gh \right)}. \quad (2)$$

Здесь x – коэффициент деполаризации капли; ρ – плотность раствора; b – размер капли по вертикали; a – радиус капли в горизонтальной плоскости; h – высота столба жидкости над каплей.

Очевидно, что оба выражения получены с большой долей допущений и требуют уточнений. Выражения (1) и (2) получены при воздействии на единичную каплю определенных размеров и не применимы к процессу волокнообразования со свободной поверхности раствора. Однако из этих выражений можно определить основные факторы, влияющие на образования конуса Тейлора. К таким факторам относятся напряженность электростатического поля, плотность раствора, коэффициент поверхностного натяжения. Кроме этих факторов на течение процесса, несомненно, оказывают влияние вязкость и электропроводность раствора полимера.

В работе [8] приведен анализ исследований модели непрерывного отрыва и течения жидкости, где отмечено влияние на радиус и процесс отрыва формируемой струи электрических свойств раствора полимера и его концентрации, а также напряженности электрического поля. Предлагаемые авторами решения описывают диффузию жидкости и не могут быть непосредственно применены к описанию процесса электроформирования.

Приведенные в работе [9] теоретико-экспериментальные исследования процесса образования конуса Тейлора так же, как и в вышеприведенных работах, не позволили создать какую-либо универсальную модель, описывающую начальную стадию электроформирования. Тем не менее авторам удалось проанализировать стадии образования конуса Тейлора. Эти исследования подтверждают предположение о том, что электрические свойства, концентрация и вязкость раствора оказывают значитель-

ное влияние на процесс образования очагов струйного движения и на интенсивность их образования. В работе [10] рассмотрен процесс самоорганизации множества струй, возникающих с поверхности раствора полимера в электростатическом поле, и отмечена физическая природа процесса самоорганизации. Результаты работы подчеркивают, что на интенсивность образования очагов струйного течения полимерного раствора, нанесенного на поверхность электрода, оказывает особое влияние конфигурация электрического поля, гидродинамические и электрические свойства раствора.

Проведенные нами исследования [3], [4] и анализ вышеперечисленных источников позволяют определить основные факторы, влияющие на процесс образования очагов струйного течения жидкости при получении нановолокон методом электроспиннинга и разработать пути дальнейших исследований. Одними из важнейших факторов, определяющих интенсивность образования очагов струйного течения, являются напряженность и конфигурация электрического поля. Как показывает опыт получения нановолокон методом электроформирования, напряженность электростатического поля можно менять в рамках некоторых пределов, причем верхний предел напряженности ограничивается значением, при котором наблюдается пробой межэлектродного пространства или коронный разряд (23...30 кВ/см, для воздуха). В случае использования метода формования со свободной поверхности раствора, нанесенного на электрод, конфигурация электрического поля зависит от конструктивного исполнения установки, наличия дополнительных электродов и др. Для выбора оптимальной конфигурации электрического поля необходимо смоделировать электростатическое поле установки численными методами и сопоставить полученные данные с результатами экспериментальных исследований процесса электроформирования. Изучение влияния на процесс электроформирования гидродинамических, молекулярных и электрических характеристик раствора по-

лимера, таких как молекулярная масса полимера, диэлектрическая постоянная раствора, проводимость раствора, вязкость раствора, коэффициент поверхностного натяжения, требует проведения значительного объема теоретико-экспериментальных исследований. Существующие исследования в этой области не позволяют делать обобщенные выводы по большому спектру комбинаций полимеров и растворителей.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ первого этапа процесса электроформирования – образования очагов струйного движения раствора, а также анализ исследований, посвященных этому вопросу.

2. Определены факторы, влияющие на протекание этого этапа. К ним относятся: напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве установки E , конфигурация электрического поля установки, вязкость раствора η , коэффициент поверхностного натяжения α , электропроводность раствора, диэлектрическая постоянная раствора.

3. Намечены основные пути дальнейших исследований этапа образования очагов струйного течения раствора для случая, когда процесс электроформирования осуществляется со свободной поверхности раствора, нанесенного на электрод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудовский П.Н. Развитие технологии прядильного производства в вузах Российской Федерации // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 5. С. 117...121.

2. Корабельников А.Р., Шутова А.Г. Области применения и перспективы развития нановолокнистых материалов // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2014, № 1 (32). С. 48...51.

3. Корабельников А.Р., Потехин В.М., Шутова А.Г. Устройство для получения полимерных нано- и микроволокон и исследования его работы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 1. С. 52...54.

4. Корабельников А.Р., Шутова А.Г., Потехин В.М. Исследования влияния формы электрода на процесс получения нановолокон в устройстве для электроформирования // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2013, № 1 (30). С. 52...54.

5. Корабельников А.Р. Устройство для получения полимерных нано- и микроволокон. // Патент на полезную модель № 133529 Российская Федерация, от 09.04.2013.

6. Корабельников А.Р., Шутова А.Г., Сысоева Е.К., Громова Е.И. Новое устройство для получения нано- и микроволокон из полимеров // Сб. тр. Междунар. научн.-техн. конф.: Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности. – М., 2013.

7. Филатов Ю.Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) / Под ред. В. Н. Кириченко. – М.: Нефть и газ, 1997.

8. Friedlander S.K. Particle diffusion in low-speed flows // Journal of Colloid and Interface Science. – 23, 1967. 157.

9. Reznik S.N., Yarin A.L., Theron A. and Zussman E. PressTransient and steady shapes of droplets attached to a surface in a strong electric field // J. Fluid Mech. – Vol. 516, 2004, P. 349...377.(c_ 2004 Cambridge University).

10. David Lukas, Arindam Sarkar, Pavel Pokorný. Self-organization of jets in electrospinning from free liquid surface: A generalized approach. // Journal of Applied Physics. – Vol.103, No. 8, 15 April 2008.

Рекомендована кафедрой теории механизмов и машин, деталей машин и проектирования технологических машин. Поступила 30.09.14.