



Получено: 22.02.2022 г. | Принято: 28.02.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.118.127>

Научная статья

ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ (ОБЗОР)

А.С.Колобков¹, к.т.н., нач. лаборатории, ORCID ID: 0000-0002-3831-4908 / alfobos@yandex.ru

Аннотация. Электроформование – это универсальный и гибкий метод получения ультратонких волокон. Волокна, получаемые с помощью электроформования, используются во многих отраслях промышленности. Благодаря высокому соотношению длины волокна к его площади особенно большое применение электроформование нашло в производстве фильтрующих материалов, на основе ультратонких синтетических волокон.

Ключевые слова: электроформование, синтетические волокна, мембрана, нанотехнологии, наноматериалы, нановолокна

Для цитирования: А.С.Колобков. Электроформование синтетических волокон и их применение (обзор). НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 2. С. 118–127. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.118.127>

Received: 22.02.2022 | Accepted: 28.02.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.118.127>

Original paper

ELECTROFORMING OF SYNTHETIC FIBRES AND THEIR APPLICATIONS (OVERVIEW)

A.S.Kolobkov¹, Cand. of Sci. (Tech), ORCID: 0000-0002-3831-4908 / alfobos@yandex.ru

Abstract. Electroforming is a versatile and flexible method for producing ultrathin fibers. Fibers produced by electroforming are used in many industries due to the high ratio of fiber length to its area. Electroforming has found especially great application in the production of filter materials based on ultrathin synthetic fibers.

Keywords: electroforming, synthetic fibers, membrane, nanotechnology, nanomaterials, nanofibers

For citation: A.S.Kolobkov. Electroforming of synthetic fibres and their applications (overview). NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 1. PP. 118–127. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.2.118.127>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время [1–3] идет процесс формирования шестого технологического уклада, ядром которого будут новые технологии и новые материалы [4]. В их числе широко представлены волокнистые материалы, получаемые по различным технологиям, но для получения качественно новых волокон перспективным способом является электроформование (ЭФ).

INTRODUCTION

Nowadays, the process of formation of the sixth technological mode is under way [1–3], which core is based on new technologies and new materials [4]. A prominent place among new materials is occupied by fibrous materials produced by various technologies. However, electroforming is a promising method for obtaining qualitatively new fibres. This method of

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия / All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Kurchatov Institute, Moscow, Russia



Данный способ формования в первую очередь предназначен для получения синтетических волокон.

Электростатическое формование волокон, также известное как электроформование, относится к области нанотехнологий благодаря морфологии и масштабу создаваемых структур. Электроформование является весьма перспективной и уникальной технологией для наноматериалов, в частности для производства нановолокон.

В последнее время данный метод получения волокон вызывает большой интерес, хотя и имеет долгую историю. Основные принципы этого способа формования были изобретены уже почти столетие назад. Разные источники придерживаются разных взглядов на эту дату. Развитие ЭФ как отдельной технологии, как принято считать, началось с работ Антона Формхалса в 1930-х годах. Но в работе Бойса [5] в 1887 году уже было упоминание о технологии вытягивания волокон из жидкости с помощью электростатической силы, которая была известна в середине 18 века. Первые патенты в этой области принадлежат Кули и Мортону, зарегистрированные в 1900 и 1902 годах соответственно, которые, вероятно, легли в основу работ Формхалса [6]. В течение следующих 120 лет технология ЭФ была разработана и усовершенствована рядом инженеров и стала перспективной технологией для производства дешевых синтетических волокон, нитей и текстиля.

Новую волну интереса эта технология получила благодаря работе Дж. Доши, Д.Х. Ренекара в 1995 году, в которой авторы ввели термин "электроформование" [7]. В настоящее время ЭФ относится к наиболее перспективным технологиям производства полимерных, керамических и углеродных нановолокон / микроволокон для применения в медицине, фармацевтике, водоочистке, фильтрации, электронике, сборе и хранении энергии, датчиках и в широком спектре других не менее важных областей.

ПРОИЗВОДСТВО НАНОВОЛОКОН

Значительный импульс, который привел к разработке самых выдающихся и современных технологий, был вызван недавними открытиями в области наноауки. Переход на наноуровень структурного упорядочения материи позволил раскрыть масштабную зависимость свойств хорошо известных материалов. Эти материалы включают наночастицы нулевого измерения или квантовые точки; одномерные нанопроволоки, стержни, волокна и трубки; двумерные нанолистовые (графен, борфен, фосфор, $g-C_3N_4$ и др.) [8].

Среди перечисленных наноматериалов выделяются нановолокна. Исключительно высокое отношение площади поверхности к объему наряду с высокой пористостью, простотой и гибкостью

формования в первую очередь предназначен для производства синтетических волокон.

Electrostatic fibre formation, also known as electroforming (EF), belongs to the field of nanotechnology due to morphology and scale of the structures created. Electroforming is a very promising and unique technology for nanomaterials, in particular for production of nanofibres.

Recently there has been a great deal of interest in this method of producing fibres, although it has a long history. The basic principles of this method of formation were invented almost a century ago. Different sources hold different views on this date. The development of EF as a separate technology is generally considered to have begun with the work of Anton Formhals in the 1930s. But in the work of Beuys [5] in 1887, there was already a mention of the technology of drawing fibres from a liquid by means of electrostatic force, which was already known in the middle of the 18th century. The first patents in this field belong to Cooley and Morton, registered in 1900 and 1902 respectively, which probably formed the basis of Formhals' work [6]. Over the next 120 years, EF technology was developed and refined by a number of engineers and became a promising technology for the production of cheap synthetic fibres, yarns and textiles.

This technology attracts a new wave of interest due to the work of J. Doshi, D.H. Renecker in 1995, wherein the authors introduced the term "electroforming" [7]. Currently, EF is among the most promising technologies for the production of polymeric, ceramic and carbon nanofibres/microfibres applied in medicine, pharmaceuticals, water treatment, filtration, electronics, energy harvesting and storage, sensors and a wide range of other equally important fields.

PRODUCTION OF NANOFIBRES

The significant impetus that has led to the development of the most prominent and modern technologies has been driven by recent discoveries in the field of nanoscience. Moving to the nanoscale level of structural ordering of matter has revealed the large-scale dependence of the properties of well-known materials. These materials include zero-dimensional nanoparticles or quantum dots; one-dimensional nanowires, rods, fibres and tubes; and two-dimensional nanosheets (graphene, borophene, phosphorus, $g-C_3N_4$, etc.) [8].

Among the nanomaterials listed, nanofibres stand out. The exceptionally high surface area to volume ratio along with high porosity, simplicity and flexibility in designing properties make



в проектировании свойств делает нановолокна привлекательным кандидатом для ряда применений. На сегодняшний день нановолокна были получены из различных материалов, включая природные и синтетические полимеры, наноматериалы на основе углерода, а также полупроводниковые и композитные материалы.

Наряду с разработкой технологий производства огромные усилия были сосредоточены на изучении потенциала применения нановолокон, включая выработку и хранение энергии [9, 10], очистку воды и воздуха [11, 12], а также здравоохранение и биомедицинскую инженерию [13, 14]. Нановолокна могут быть получены с помощью различных технологий. У всех них есть свои плюсы и минусы; они основаны на разных принципах, но цель общая – производить волокна с максимально высокой точностью и воспроизводимостью.

ЭФ с некоторых точек зрения можно рассматривать как вариант электростатического напыления. Это процесс, который производит непрерывные полимерные волокна диаметром в микронном и субмикронном диапазоне под действием внешнего электрического поля, приложенного к жидкому полимеру [15]. Процесс формирования тонких волокон основан на одноосном растяжении и удлинении наэлектризованной вязкоупругой полимерной струи, образованной вязким раствором или расплавом, за счет электростатического отталкивания между поверхностными зарядами и испарением растворителя.

Сама технология электроформования является одной из наиболее устоявшихся и известна уже чуть более века. Но инструменты для всестороннего изучения его продуктов были разработаны совсем недавно, и понимание параметров, которые имеют решающее значение или оказывают лишь незначительное влияние на процесс, наряду с потенциалом техники все еще находится в стадии детального изучения.

МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЪЗУЕМЫЕ ПРИ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИИ

Для производства нановолокон часто используются как природные, так и синтетические полимеры. Благодаря концепции "зеленой химии", которая в настоящее время набирает популярность, наиболее часто используемым растворителем и по-прежнему самым дешевым является вода. Многие из растворимых в воде полимеров нетоксичны, биосовместимы и уже используются в пищевой промышленности. Это позволяет концепции "зеленой химии" быть полностью применимой для крупномасштабного промышленного производства. Использование водорастворимых природных полимеров дает возможность

nanofibres an attractive candidate for a number of applications. To date, nanofibres have been derived from a variety of materials, including natural and synthetic polymers, carbon-based nanomaterials, and semiconductor and composite materials.

Along with the development of manufacturing technologies, tremendous efforts have been focused on exploring the potential applications of nanofibres, including energy generation and storage [9, 10], water and air purification [11, 12], and healthcare and biomedical engineering [13, 14]. Nanofibres can be produced by a variety of technologies. They all have their pros and cons; they are based on different principles, but the aim is to produce fibres with the highest possible precision and reproducibility.

From some points of view, EF can be regarded as a variant of electrostatic spraying. It is a process which produces continuous polymer fibres in the micron to submicron diameter range under the action of an external electric field applied to the liquid polymer [15]. The process of forming thin fibres is based on the uniaxial stretching and elongation of an electrified viscoelastic polymer jet formed by a viscous solution or melt, due to electrostatic repulsion between surface charges and solvent evaporation.

Electroforming technology itself is one of the most established and has been known for just over a century. But the tools for a comprehensive study of its products have only recently been developed, and an understanding of the parameters that are critical or have only a minor influence on the process, along with the potential of the technology, is still undergoing detailed study.

MATERIALS USED IN ELECTROFORMING

Both natural and synthetic polymers are often used in production of nanofibres. Thanks to the concept of "green chemistry", which is currently gaining popularity, water is the most commonly used solvent and still the cheapest. Many of the water-soluble polymers are non-toxic, biocompatible and already used in the food industry. This makes the concept of green chemistry fully applicable to large-scale industrial production. The use of water-soluble natural polymers makes it easy to modify nanofibres for various applications: from biocompatible wound dressings to special substrates for the vertical growth of moulds, fungi or plants.

PRODUCING CERAMIC AND CARBON FIBRES BY ELECTROFORMING

Electroforming enables production of ceramic, carbon and composite fibres, depending on the nature and conditions of the treatment used.



легко модифицировать нановолокна для различных нужд: от биосовместимых повязок для ран до специальных субстратов для вертикального выращивания плесени, грибков или растений.

ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЕМ

Электроформование позволяет с последующей обработкой производить керамические, углеродные и композитные волокна, в зависимости от характера и условий применяемой обработки.

При изготовлении керамических волокон, полученных электроформованием, наиболее часто используют метод термической обработки после отжима, в форме прокаливания (на воздухе или в кислороде) и пиролиза (обычно в аргоне или другом инертном газе или в вакууме), а также новое перспективное применение – нетепловую обработку плазмой.

Производство керамических волокон не может осуществляться непосредственно электроформованием. При таком подходе волокна-предшественники получают путем введения суспензии порошков нано- или субмикронного размера в раствор полимера. После ЭФ необходимо применять термическую обработку для удаления полимерного связующего, которое действует как обязательный агент для образования волокон, но оно также вызывает склеивание / спекание керамического компонента наряду с сохранением волокнистой морфологии [16]. Несмотря на кажущуюся простоту, физический подход не получил широкого распространения из-за своих ограничений. Наиболее важные из них связаны с требованиями, предъявляемыми к используемым частицам, размер частиц должен быть намного меньше желаемого диаметра конечного волокна при высокой концентрации, чтобы обеспечить сплавление частиц во время термообработки. Чем выше концентрация частиц, тем плотнее они будут располагаться в волокне и тем выше вероятность того, что они сплавятся и сохранят волокнистую морфологию во время термической обработки. С другой стороны, концентрация керамического порошка напрямую влияет на вязкость раствора ЭФ, увеличивая ее. Это приводит к росту диаметра сформированных волокон, тем самым вводя еще одно ограничение.

Также следует упомянуть экономический аспект: порошки с меньшим размером частиц намного дороже и должны быть измельчены, что также требует дорогостоящего оборудования.

По сравнению с физическим, химический подход является более сложным, но обеспечивает более высокий уровень технической гибкости и позволяет более точно настраивать конечные свойства волокон.

When producing ceramic fibres obtained by electroforming, the most commonly used method is a post-press heat treatment, in the form of calcination (in air or oxygen) and pyrolysis (usually in argon or other inert gas or vacuum), as well as a non-thermal plasma treatment which is a new and promising application.

Production of ceramic fibres cannot be made directly by electroforming. In this approach precursor fibres are produced by injecting a suspension of nano- or submicron size powders into a polymer solution. After EF, a heat treatment must be applied to remove the polymer binder, which acts as an obligatory agent for fibre formation, but it also causes bonding/sintering of the ceramic component along with retaining the fibrous morphology [16]. Despite its apparent simplicity, the physical approach has not been widely adopted due to its limitations. The most important of these relate to the requirements to the particles used, the particle size must be much smaller than the desired diameter of the final fibre at high concentration in order to ensure fusion of particles during heat treatment. The higher the concentration of the particles, the more densely they will be arranged in the fibre and the higher the probability that they will fuse and retain their fibrous morphology during heat treatment. On the other hand, the concentration of ceramic powder directly affects the viscosity of the EF solution so as to increase it. This leads to an increase of the diameter of the formed fibres, thus introducing another limitation.

The economic aspect should also be mentioned: powders with smaller particle sizes are much more expensive or have to be milled, which also requires expensive equipment.

Compared to the physical approach, the chemical approach is more complex, but provides a higher level of technical flexibility and allows finer tuning of the final properties of the fibres. Synthesis of complex ceramic materials (complex oxides, non-oxide structures) by the chemical method is often accomplished by the gel technology. In this case, one or more individual ceramic precursors are replaced by a sequential gel synthesis.

As the polymer-ceramic precursor composites have already been prepared, the next step after electroforming – post-pressure processing – is necessary and common to both approaches. The removal of the polymer matrix to form ceramic fibres takes place.

For this purpose a heat treatment is usually used. Some of the ceramic precursors (alkoxides



Для синтеза сложных керамических материалов (сложных оксидов, неоксидных структур), как часть химического подхода, также часто используется технология геля. В этом случае один или несколько отдельных керамических предшественников заменяются последовательным синтезом геля.

Поскольку полимерно-керамические композиты-предшественники уже подготовлены, следующий этап после электроформования – обработка после отжима, является необходимым и общим для обоих подходов. Происходит удаление полимерной матрицы с образованием керамических волокон.

Для этой цели обычно используется термическая обработка. Некоторые из керамических предшественников (алкоксиды и галогениды металлов) обладают высокой реакционной способностью и превращаются в керамику (путем гидролиза с влажностью воздуха) уже в процессе ЭФ [17]. Сформированная керамика часто является аморфной, поэтому полученные полимерно-керамические композиты все еще требуют высокотемпературной обработки также для кристаллизации керамики. Термическая обработка включает в себя как прокаливание, так и пиролиз, и в зависимости от применяемой температуры и атмосферы эффект может сильно различаться. Прокаливание при низких температурах в некоторых полимерах (ПВС, ПАН) [16] может инициировать внутриволоконные и межволоконные превращения, такие как сшивание полимеров и слияние волокон или образование сетей соответственно. Прокаливание при высоких температурах ($>>300\text{ }^{\circ}\text{C}$) приводит к предварительному окислению полимера, за которым следует его полное окисление и удаление (выгорание) вместе с образованием керамики, кристаллизацией, спеканием и сплавлением керамических зерен и последующим образованием волокон.

С другой стороны, пиролиз – термообработка в инертной атмосфере или вакууме – приводит к карбонизации полимерной основы волокон и других органических компонентов с сохранением формы и образованием волокнистых материалов на основе углерода [18]. Это было использовано для получения широкого спектра углеродных волокон, которые применяются в качестве катализаторов, электродов для реакций выделения газа, топливных элементов, суперконденсаторов [19], накопителей водорода [9], фильтров с наночастицами, сорбентов для удаления драгоценных металлов из сточных и морских вод и ряда других перспективных применений [20].

Наиболее часто используемым полимером для получения углеродных волокон электроформованием является полиакрилонитрил [18], но из-за его высокой цены существуют работы, направленные на замену его поливинилами [21], а также их

and metal halides) are highly reactive and are converted into ceramics (by hydrolysis with air humidity) already in the EF process [17]. The formed ceramics are often amorphous, so the resulting polymer-ceramic composites still require high-temperature treatment for crystallisation of the ceramics as well. Heat treatment includes both calcination and pyrolysis; depending on the temperature and atmosphere applied, the effect can vary greatly. Quenching at low temperatures in some polymers (PVS, PAN) [16] can initiate intra- and inter-fibre transformations such as polymer cross-linking and fibre fusion or network formation, respectively. Tempering at high temperatures ($>>300\text{ }^{\circ}\text{C}$) results in pre-oxidation of the polymer, followed by complete oxidation and removal (burnout) together with formation of ceramic, crystallisation, sintering and fusion of ceramic grains and the subsequent formation of fibres.

On the other hand, pyrolysis – heat treatment in an inert atmosphere or vacuum – results in carbonisation of the polymer base of fibres and other organic components with retained shape and formation of carbon-based fibrous materials [18]. This effect has been applied to produce a wide range of carbon fibres used as catalysts, electrodes for gas separation reactions, fuel cells, supercapacitors [19], hydrogen storage [9], filters with nanoparticles, sorbents for removing precious metals from sewage and sea water and a number of other promising applications [20].

The most commonly used polymer for obtaining carbon fibres by electroforming is polyacrylonitrile [18], but due to its high price there are works aimed at replacing it with polyvinyls [21], as well as their composites and blends with lignin [22]. Addition of small amounts of ceramic precursors (mainly metal salts) to the polymer solution leads to the formation of nanoparticles inside and/or outside the fibre during pyrolysis. Fine-tuning of the heat treatment conditions makes it possible to use the formed nanoparticles as germs for the synthesis of carbon nanotubes.

APPLICATIONS OF NANOFIBRES

Over the last three decades, EF nanofibres have gained a wide range of applications. Every year the number of fields where fibres, and nanofibres in particular, are used is increasing rapidly. The membrane produced by electroforming is a multilayer mat of nanofibres lying in a chaotic pattern (Fig.1).

Biologically, almost all human tissues and organs are based on nanofibrous forms or



композитов и смесей с лигнином [22]. Добавление небольших количеств керамических предшественников (в основном солей металлов) в раствор полимера приводит к образованию наночастиц внутри и/или снаружи волокна во время пиролиза. Точная настройка условий термообработки позволяет использовать сформированные наночастицы в качестве зародышей для синтеза углеродных нанотрубок.

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОВОЛОКОН

За последние три десятилетия ЭФ нановолокна получили широкий спектр применений. С каждым годом число областей, в которых используются волокна, и в частности нановолокна, быстро растет. Мембрана, полученная электроформованием, представляет собой многослойный мат из нановолокон, лежащих в хаотическом порядке (рис.1).

С биологической точки зрения почти все ткани и органы человека основаны на нановолокнистых формах или структурах, включая кости, дентин, хрящи и кожу. Все они характеризуются хорошо организованными иерархическими волокнистыми структурами, в частности внеклеточным матриксом [16]. Это позволяет использовать синтетические волокнистые каркасы для замены или регенерации поврежденных тканей или частей органов.

В промышленной области нановолокна широко используются в различных видах передовых материалов и композитов, фильтрации, специальной и уникальной одежде, электронных устройствах, прозрачных / гибких, солнечных элементах и экранах.

ФИЛЬТРАЦИЯ И МИКРОФИЛЬТРАЦИЯ / НАНОФИЛЬТРАЦИЯ

Поскольку каналы и структурные элементы фильтра должны соответствовать масштабу частиц или капель, которые должны быть захвачены фильтром, одним из прямых способов разработки высокоэффективных и эффективных фильтрующих материалов является использование волокон нанометрового размера в структуре фильтра.

Углеродные, полимерные или керамические нановолокна, благодаря большой площади поверхности, подходят для адсорбции ценных или токсичных веществ [11].

В системах очистки воды нановолокнистые мембраны используются для фильтрации и мембранной дистилляции [23]. Нановолокнистые мембраны, используемые в этой технологии, позволяют опреснять морскую воду с высокой производительностью и автономно, используя только солнечную энергию.

Военная промышленность и передовые композиты (композиты для брони и конструкционных

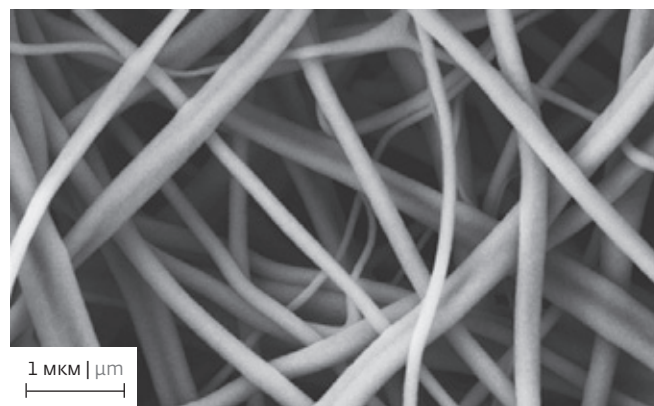


Рис.1. Мембрана из синтетических нановолокон [23]

Fig.1. Membrane made of synthetic nanofibers [23]

structures, including bone, dentin, cartilage and skin. They are all characterised by well-organised hierarchical fibrous structures, in particular the extracellular matrix [16]. This allows the use of synthetic fibre frameworks to replace or regenerate damaged tissues or organ parts.

In the industrial field nanofibres are widely used in various types of advanced materials and composites, filtration, special and unique clothing, electronic devices, transparent/flexible solar cells and screens.

FILTRATION AND MICROFILTRATION / NANOFILTRATION

As filter channels and structural elements must match the scale of particles or droplets to be captured by the filter, one direct way to develop highly efficient and effective filter media is to use nanometre-sized fibres in the filter structure.

Carbon, polymer or ceramic nanofibres are suitable for the adsorption of valuable or toxic substances thanks to their large surface area [11].

In water treatment systems nanofibre membranes are used for filtration and membrane distillation [23]. The nanofibre membranes used in this technology make it possible to desalinate seawater at high capacity and autonomously using solar energy only.

Military industry and advanced composites (composites for armour and structural parts). Polymer and ceramic matrix composites reinforced with fibres can be used as new lightweight materials for instruments, aircraft or armour plates for personal use and vehicles. Due to very small fibre diameters and large contact area, the impact energy dissipation can be far more effective for the same material size. This makes it



деталей). Полимерные и керамические матричные композитные материалы, армированные волокнами, могут быть использованы в качестве новых легких материалов для приборов, самолетов или бронепластин для личного пользования и транспортных средств. Благодаря очень малым диаметрам волокон и большой площади контакта рассеивание энергии удара может быть намного более эффективным при тех же размерах материалов. Это позволяет снизить вес брони наряду с сохранением защитной способности [24].

Также ведутся работы по созданию гибких материалов с повышенной прочностью, модулем упругости и ударной вязкостью. Это вызвано низкой кристалличностью нановолокон, возникающей в результате быстрого затвердевания ультратонких струй.

Полупроводниковые материалы, такие как TiO_2 , SnO_2 , ZnO , WO_3 , MoO_3 , используют для обнаружения следовые концентрации газообразных соединений. В принципе, более высокая удельная площадь поверхности и пористость чувствительного материала могут привести к более высокой чувствительности датчика. Кроме того, одномерные материалы могут предоставить дополнительные преимущества в обеспечении быстрого массопереноса молекул-мишеней вокруг области взаимодействия, а также преодоления барьеров носителями заряда. Керамические нановолокна успешно применяются в качестве чувствительных интерфейсов для обнаружения множества газов с повышенным пределом обнаружения, с известными примерами, включая NO_2 , CO , H_2O , NH_3 , CH_3OH , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, O_2 , H_2 и толуол [17].

В настоящее время в пищевой промышленности все большее внимание уделяется многим новым активным упаковочным материалам. Активная упаковка может препятствовать росту микроорганизмов на поверхности пищевых продуктов, улучшать питательные и сенсорные качества пищевых продуктов, продлевать срок годности определенных пищевых продуктов и снижать воздействие упаковки на окружающую среду [25]. Технологии активной упаковки могут быть основаны на синтетических или натуральных материалах, а некоторые содержат активные компоненты, такие как антиоксиданты, противомикробные препараты, витамины, ароматизаторы или красители. Функциональные электрошлифовальные маты могут быть использованы в качестве инструментов для разработки нанокompозитных тканей из широкого спектра пластмасс с улучшенными характеристиками для упаковочных применений.

Использование нановолокон в пищевой промышленности не ограничивается только вышеупомянутыми областями. Было показано, что нановолокнистые маты могут иметь потенциал для применения

possible to reduce the weight of the armor while maintaining the protective capacity [24].

Works are also carried out to create flexible materials with increased strength, modulus of elasticity and impact resistance. This is due to the low crystallinity of the nanofibres resulting from the rapid solidification of the ultra-thin jets.

Semiconductor materials such as TiO_2 , SnO_2 , ZnO , WO_3 , MoO_3 are used to detect trace concentrations of gaseous compounds. In principle, the higher specific surface area and porosity of the sensitive material can lead to higher sensor sensitivity. In addition, one-dimensional materials can offer the additional advantage of allowing rapid mass transfer of target molecules around the interaction region, as well as overcoming charge carrier barriers. Ceramic nanofibres have been successfully applied as sensitive interfaces for detection of a great number of gases with increased detection limits, the well known examples include NO_2 , CO , H_2O , NH_3 , CH_3OH , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, O_2 , H_2 and toluene [17].

Many new active packaging materials attract the ever increasing attention in the food industry. Active packaging can inhibit growth of microorganisms on food surfaces, improve the nutritional and sensory quality of food, extend the shelf life of certain food products and reduce the environmental impact of packaging [25]. Active packaging technologies can be based on synthetic or natural materials and some of them contain active ingredients such as antioxidants, antimicrobials, vitamins, flavourings or colourings. Functional electroplating mats can be used as tools to develop nanocomposite fabrics from a wide range of plastics with improved characteristics for packaging applications.

Application of nanofibres in the food industry is not limited to the aforementioned areas. It has been shown that nanofibre mats may have potential for applications in the vertical cultivation of products such as fungi, with the possibility of developing the properties of the final product or even vice versa, if it can demonstrate antifungal functionality [26].

Polymeric membranes also have potential for such applications as electrostatic charge dissipation, corrosion protection, electromagnetic protection, photovoltaic devices, fabrication of microelectronic devices or machines such as Schottky transitions, sensors and actuators, etc., since the rate of electrochemical reactions is proportional to the electrode surface area. Conductive nanofibre membranes are also quite suitable for use as porous electrodes in the development of high-performance batteries and fuel cells with polymer



в вертикальном выращивании продуктов, таких как грибы, с возможностью разработки свойств конечного продукта или даже наоборот, если он может продемонстрировать противогрибковую функциональность [26].

Полимерные мембраны также обладают потенциалом для таких применений, как рассеивание электростатического заряда, защита от коррозии, защита от электромагнитных помех, фотоэлектрические устройства, изготовление микроэлектронных устройств или машин, таких как переходы Шоттки, датчики и исполнительные механизмы и т.д. Поскольку скорость электрохимических реакций пропорциональна площади поверхности электрода, проводящие нановолокнистые мембраны также вполне подходят для использования в качестве пористых электродов при разработке высокопроизводительных батарей и топливных элементов с полимерными электролитными мембранами благодаря их высокой пористости и присущей им большой общей площади поверхности. Полимерные батареи были разработаны для сотовых телефонов, чтобы заменить обычные громоздкие литиевые батареи [27]. Изолирующие маты из полимерных волокон могут использоваться в качестве разделителей в тех же батареях или суперконденсаторах.

Углеродные и керамические волокна являются перспективными материалами для расщепления воды, хранения водорода, мембран для топливных элементов различных конструкций, электродов в суперконденсаторах и солнечных элементов, чувствительных к красителям [9].

ВЫВОДЫ

Очевидно, что ЭФ – это универсальная технология, способная создавать уникальные материалы с различными свойствами. Несмотря на значительный объем проводимых исследований, высокий уровень прикладных технических усовершенствований и широкий спектр применений, в которых уже используются нановолокна с электроформованием, все еще существуют некоторые проблемы:

1. Безопасность технического персонала. Использование высоковольтных источников питания требует обучения технике безопасности и повышенной осторожности при работе с оборудованием. Улучшенная автоматизация процесса и отказоустойчивые компоненты/модули могут обеспечить необходимую безопасность.
2. Отсутствие надежных моделей прогнозирования. Существует всего несколько работ, посвященных теоретическим предсказаниям результатов ЭФ, но они не являются универсальными и не могут включать все влияющие параметры для прогнозирования результатов своей ЭФ.

electrolyte membranes due to their high porosity and inherently large total surface area. Polymer batteries have been developed for cellular phones to replace conventional bulky lithium batteries [27]. Insulating mats made of polymer fibres can be used as separators in the same batteries or supercapacitors.

Carbon and ceramic fibres are promising materials for water splitting, hydrogen storage, membranes for fuel cells of various designs, electrodes in supercapacitors and dye-sensitive solar cells [9].

CONCLUSIONS

It is evident that EF is a versatile technology capable of creating unique materials with a variety of properties. In spite of the significant scope of research carried out, the high level of applied technical improvements and the wide range of applications where electroformed nanofibres are already used, still there are some challenges:

Safety of technical personnel. The use of high voltage power supplies requires safety training and increased caution when working with equipment. Improved process automation and failsafe components/modules can provide the necessary safety.

Lack of reliable prediction models. There are only a few papers devoted to theoretical prediction of EF outcomes, but they are not universal and cannot include all influential parameters to predict the results of their EF.

When nanofibres are used in composites, there is still a problem of fibre dispersion within the matrix.

It is worth noting that the materials produced by electroforming technology cannot currently be used as structural materials, due to limitations in the reproducibility of geometric dimensions and, as a consequence, mechanical characteristics. The main area belongs to the functional materials.

Despite the existing challenges, electroformed fibre technology is of great interest and has the potential for producing materials with unique properties.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

3. При применении нановолокон в композитах все еще существует проблема с дисперсией волокон внутри матрицы.

Стоит отметить, что получаемые материалы по технологии электроформования на сегодняшний день не могут использоваться как конструкционные, из-за ограничений воспроизводимости геометрических размеров и как следствие механических характеристик. Основная область – это функциональные материалы.

Несмотря на существующие проблемы, технология электроформования волокон представляет большой интерес и потенциал для получения материалов с уникальными свойствами.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В.** Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения. *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
2. **Каблов Е.Н.** ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14. *Крылья Родины*, 2019. № 7–8. С. 54–58.
3. **Каблов Е.Н.** Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций. *Крылья Родины*, 2016. № 5. С. 8–18.
4. **Каблов Е.Н.** Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки. *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. **Boys C.V.** On the production, properties, and some suggested uses of the finest threads, *Proc. Phys. Soc., London* 9 (1887) P. 8, <https://doi.org/10.1088/1478-7814/9/1/303>.
6. **Davis F.J., Mohan S.D., Ibraheem M.A.** Chapter 1. Introduction, in: *Electrospinning Princ. Pract. Possibilities*, The Royal Society of Chemistry, 2015, PP. 1e21, <https://doi.org/10.1039/9781849735575-00001>.
7. **Doshi J., Reneker D.H.** Electrospinning process and applications of electrospun fibers, *J. Electrostat.* 35 (1995) P. 151e160, [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)00041-8](https://doi.org/10.1016/0304-3886(95)00041-8).
8. **Kenry, Lim C.T.** Nanofiber technology: current status and emerging developments, *Prog. Polym. Sci.* 70 (2017) P. 1e17, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.03.002>.
9. **Jo S.M.** Electrospun nanofibrous materials and their hydrogen storage, *Hydrog. Storage* (2012) P. 181e210, <https://doi.org/10.5772/50521>.
10. **Xia G., Chen X., Zhao Y., Li X., Guo Z., Jensen C.M., Gu Q., Yu X.** High-performance hydrogen storage nanoparticles inside hierarchical porous carbon nanofibers with stable cycling, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9 (2017) P. 15502e15509, <https://doi.org/10.1021/acsami.7b02589>.
11. **Chitpong N., Husson S.M.** Nanofiber ion-exchange membranes for the rapid uptake and recovery of heavy metals from water, *Membranes (Basel)* 6 (2016) P. 59, <https://doi.org/10.3390/membranes6040059>.
12. **Шестаков А.М., Хасков М.А., Сорокин О.Ю.** Неорганические волокна на основе кремнийорганических полимерных прекурсоров для высоко-термостойких композиционных материалов (обзор). *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2019. № 1. С. Т. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 28.01.2022). dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2019-0-1-74-91.
13. **Chitpong N., Husson S.M.** High-capacity, nanofiber-based ion-exchange membranes for the selective recovery of heavy metals from impaired waters, *Separ. Purif. Technol.* 179 (2017) P. 94e103, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.009>.
14. **Singh S.** Nanofiber electrodes for biosensors, in: A. Barhoum M. Bechelany A. Makhlof (Eds.), *Handb. Nanofibers*, Springer International Publishing, Cham, 2018, PP. 1e17, https://doi.org/10.1007/978-3-319-42789-8_41-1.
15. **Ghorani B., Tucker N.** Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology, *Food Hydrocolloids* 51 (2015) P. 227e240, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.05.024>.
16. **Deitzel J., Kleinmeyer J., Harris D., Beck Tan N.** The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles, *Polymer (Guildf)* 42 (2001) P. 261e272, [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00250-0](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00250-0).
17. **Nakane K., Morinaga M., Ogata N.** Formation of niobium oxide and carbide nanofibers from poly(vinyl alcohol)/niobium oxide composite nanofibers. *J. Mater. Sci.* 48 (2013) P. 7774e7779, <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7614-0>.
18. **Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Воронина О.Г.** Влияние аппретирования углеродного волокна при получении объемно-армированных преформ на свойства высокотемпературного углепластика. *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2021. № 1. С. Т. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения



- 28.01.2022). <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-1-54-65>.
19. Liu Q., Zhu J., Zhang L., Qiu Y. Recent advances in energy materials by electrospinning, *Renew. Sustain. Energy Re. V. 81.* (2018) PP. 1825e1858, <https://doi.org/10.1016/j.RSER.2017.05.281>.
 20. Шур П.А., Соловьянчик Л.В., Кондрашов С.В. Перспективные способы получения электрохромных устройств на основе наноструктурированных покрытий (обзор). *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2021. № 3. С. Т. 09. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 28.01.2022). <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-3-99-108>.
 21. Daraghmeh A., Hussain S., Saadeddin I., Servera L., Xuriguera E., Cornet A., Cirera A. A study of carbon nanofibers and active carbon as symmetric supercapacitor in aqueous electrolyte: a comparative study. *Nanoscale Res. Lett.* 12 (2017) P. 639, <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2415-z>.
 22. Yang Y., Centrone A., Chen L., Simeon F., Hutton A.T., Rutledge G.C. Highly porous electrospun polyvinylidene fluoride (PVDF)-based carbon fiber, *Carbon N.Y.* 49 (2011) P. 3395e3403, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.04.015>.
 23. Jin J., Ogale A.A. Carbon fibers derived from wet-spinning of equicomponent lignin/polyacrylonitrile blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 135 (2018) P. 1e9, <https://doi.org/10.1002/app.45903>.
 24. Дориомедов М.С. Рынок арамидного волокна: виды, свойства, применение. *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2020. № 11. С. Т. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 28.01.2022), <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-11-48-59>.
 25. Zhang C., Li Y., Wang P., Zhang H. Electrospinning of nanofibers: potentials and perspectives for active food packaging. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 19 (2020) PP. 479e502, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12536>.
 26. Sabantina L., Kinzel F., Hauser T., Többer A., Klöcker M., Döpke C., Böttjer R., Wehlage D., Rattenholl A., Ehrmann A. Comparative study of Pleurotus ostreatus mushroom grown on modified PAN nanofiber mats, *Nanomaterials.* No. 9 (2019), <https://doi.org/10.3390/nano9030475>.
 27. Bhardwaj N., Kundu S.C. Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnol. Adv.* v. 28. (2010) PP. 325e347, <https://doi.org/10.1016/j.biotechad.v.2010.01.004>.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Самохин А.Б.
ОБЪЕМНЫЕ СИНГУЛЯРНЫЕ
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 218 с. ISBN 978-5-94836-618-0.

Цена 840 руб.

В книге с помощью сингулярных интегральных уравнений рассматриваются различные классы задач электродинамики. Монография состоит из двух частей. В первой части вводятся объемные сингулярные интегральные уравнения, описывающие задачи рассеяния электромагнитных волн на трехмерных неоднородных и анизотропных структурах, а также сингулярные уравнения с запаздыванием по времени, описывающие задачи взаимодействия нестационарного поля с ограниченной материальной средой. С использованием полученных уравнений доказываются теоремы существования и единственности решения различных классов задач рассеяния волн. Во второй части излагаются итерационные методы для решения уравнений, математически строго обосновывается применение метода Галеркина и метода коллокации для численного решения уравнений, описывающих задачи рассеяния волн на трехмерных неоднородных и анизотропных структурах. Предлагаются эффективные алгоритмы численного решения сингулярных уравнений.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru