
Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-123-131

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН (обзор)

А.С. Колобков¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. В настоящее время интерес к углеродным волокнам и полимерным композиционным материалам на их основе, являющимся перспективными материалами, достаточно высокий. В статье рассматривается появление технологии получения углеродных волокон и ее развитие. Описаны технологии получения прекурсора из полиакрилонитрила, из которого производят углеродные волокна. Показаны основные направления их усовершенствования, а также возможные пути развития получения волокон на основе углерода и их основные производители.

Ключевые слова: углерод, углеродное волокно, полиакрилонитрил, формование волокна, прочность, развитие технологий, углеродные нанотрубки, электроформование

Для цитирования: Колобков А.С. Развитие технологий получения углеродных волокон (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-123-131.

Scientific article

GROWTH OF CARBON FIBER PRODUCTION TECHNOLOGIES (review)

A.S. Kolobkov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Currently, interest in carbon fibers and polymer composite materials based on them, which are promising materials, is quite high. The article discusses the emergence of carbon fiber technology and its development. Technologies for obtaining a precursor from polyacrylonitrile, from which carbon fibers are produced, are described. The main directions of their improvement are shown, as well as possible ways of developing carbon-based fibers and their main manufacturers.

Keywords: carbon, carbon fiber, polyacrylonitrile, fiber molding, strength, technology development, carbon nanotubes, electroforming

For citation: Kolobkov A.S. Growth of carbon fiber production technologies (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-123-131.

Введение

Углеродные волокна благодаря их уникальным механическим свойствам широко используют в композиционных материалах, где фактор экономии массы изделия является ключевым, – например, в аэрокосмической и спортивной отраслях, а также в области ветроэнергетики [1–3]. Для дальнейшего увеличения спроса на углеродные волокна в других отраслях промышленности необходимо снижение их себестоимости.

В настоящее время углеродные волокна преимущественно производят из волокон-прекурсоров из полиакрилонитрила (ПАН), в то время как для некоторых высокомодульных

волокон используют пеки. Это связано с тем, что на основе данных волокон можно получать углепластики конструкционного назначения [4–7].

Себестоимость углеродных волокон на основе полиакрилонитрила по меньшей мере на 50 % определяется стоимостью производства ПАН-прекурсора. За последнее десятилетие проведено большое количество исследований и разработок по поиску более дешевых и устойчивых прекурсоров, таких как лигнин и даже полиэтилен. Однако до сих пор не достигнуто значительных коммерческих успехов в этом вопросе, что сильно контрастирует с многочисленными заявлениями в научно-технической литературе о так называемых прорывных технологиях.

В настоящее время все больше появляется исследований углеродных волокон и их использования в композиционных материалах. Огромное внимание в качестве армирующего элемента «следующего поколения» для композитов привлек еще одно полностью углеродный аллотроп – углеродная нанотрубка (УНТ). Волокна и нити были изготовлены непосредственно из УНТ, которые также были добавлены в другие высокоэффективные волокна для повышения их свойств. Однако и в данном случае, несмотря на значительные исследовательские усилия и многочисленные публикации по этой тематике, полученные результаты представляли в лучшем случае интерес.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Углеродные волокна (краткая история)

Джозеф Свон был первым, кто изготовил в 1860 г. углеродное волокно путем нагревания хлопковых волокон в отсутствие воздуха для использования в первых лампах накаливания. За ним последовал Томас Эдисон, который в 1879 г. изготовил углеродные волокна из целлюлозы (хлопка и бамбука) для применения в первых лампочках, нагреваемых электричеством. Механические свойства полученных углеродных нитей из хлопка были плохими, хотя и пригодными для основного использования в то время – первых ламп накаливания. Когда в начале 1900-х гг. вольфрам стал предпочтительным материалом для нитей накаливания, углеродное волокно устарело и в течение следующих 50 лет ему уделяли мало внимания.

Интерес к углеродным волокнам возродила в 1950-х гг. компания Union Carbide (США). В 1958 г. физик Роджер Бэкон экспериментировал с оборудованием, похожим на первые дуговые уличные фонари, но работающим при гораздо более высоком давлении, и смог вырастить тонкие углеродные нити с исключительными механическими свойствами. В своей публикации 1960 г. ученый описал эти углеродные «усы» как свернутые листы графитовых слоев, непрерывно простирающихся по длине усов в несколько сантиметров и диаметром 1–5 мкм [8]. Показатели прочности и жесткости этих углеродных нитей поистине впечатляли: прочность достигала 20 ГПа, а соответствующий модуль упругости 700 ГПа. Данное открытие считалось настоящим прорывным изобретением, однако получение нитевидных углеродных волокнистых структур оказалось чрезвычайно дорогостоящим процессом. Такие волокна оценивались в несколько десятков миллионов долларов за 1 кг и были прерывистыми. Возможно, Р. Бэкон получил помимо углеродных усов еще и несколько более тонких нанотрубок, но либо он их не заметил, либо ему в то время просто не хватило инструментов для их обнаружения. Фактически еще в 1952 г. российские ученые Л.В. Радушкевич и В.М. Лукьянович уже сообщали о полых углеродных волокнах, которые теперь называются многостенными углеродными нанотрубками [9]. К сожалению, их статья, где демонстрировались первые изображения УНТ, была на русском языке и никто не обратил на нее никакого внимания.

В конце 1970-х гг. уже были показаны изображения того, что теперь называется углеродной нанотрубкой [10]. Однако электронные микроскопы в то время не отличались достаточной мощностью, чтобы выявить количество стенок, да и эта работа

не привлекла существенного внимания, поскольку в большинстве исследований внимание было сосредоточено на углеродных волокнах.

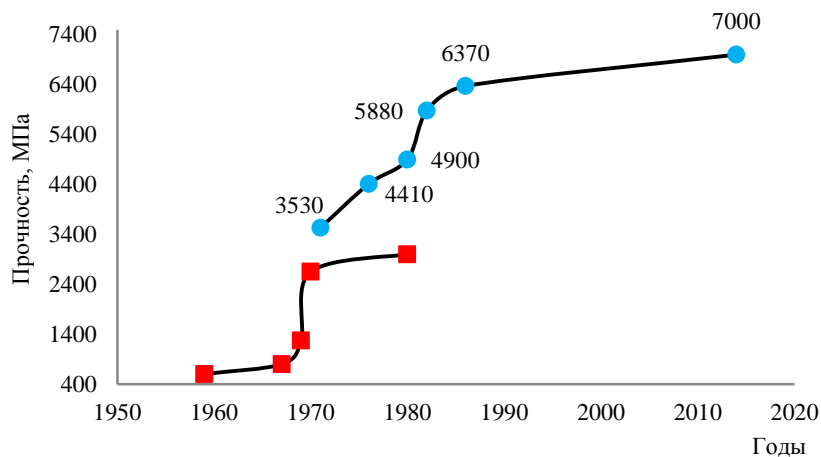
В 1959 г., через год после открытия Р. Бэконом углеродных усов, С. Форд и С. Мичелл разработали процесс получения углеродных волокон на основе термообработки вискозы при температуре до 3000 °С. В 1964 г. Р. Бэкон и В. Шаламон усовершенствовали этот процесс путем горячего растяжения и ориентации графитовых слоев, а в 1965 г. компания Union Carbide выпустила на рынок углеродное волокно марки Thornel 25 с модулем упругости, близким к 200 ГПа.

Военно-воздушные силы США в то время активно поддерживали исследования и разработки в области углеродных волокон и композитов для ракет и авиационных конструкций. И если в США акцент делали на углеродные волокна на основе целлюлозы (вискозы) в качестве прекурсора, то в Японии в 1961 г. стали использовать ПАН в качестве прекурсора углеродных волокон, а в 1964 г. начали опытное производство таких волокон. В компании Royal Aircraft Establishment (Великобритания) в 1963 г. также начали проводить исследования и разработки по волокну ПАН марки Orlon® производства компании Courtaulds. На основе этого прекурсора компания Rolls-Royce выпустила первое углеродное волокно марки Hufil®, которое использовали для создания композитных лопаток турбины реактивного двигателя RB211.

Японцы вернули себе лидерство в производстве углеродных волокон на основе ПАН (в частности, компания Toray industries) и в 1970 г. подписали технологическое соглашение с компанией Union Carbide.

В 1970-х и 1980-х гг. в западном мире углеродные волокна представляли интерес для военной промышленности ввиду их небольшой массы по сравнению со стеклянными волокнами. Однако из-за падения железного занавеса в 1989 г. интерес к ним для военного и оборонного применения на Западе значительно снизился. Исследования и разработки в области углеродных волокон продолжались в Японии. С начала 1970-х гг. компания Toray разработала широкий ассортимент углеродных волокон на основе ПАН с различными механическими свойствами.

Следует отметить, что за последние 50 лет прочность углеродных волокон на основе ПАН-прекурсора увеличилась практически в 2,5 раза (см. рисунок). Так, приблизительно за 20 лет прочность углеродных волокон (T300–T800) повысилась в 1,6 раза, а за следующие 30 лет (T800–T1100) – в 1,2 раза. Таким образом, можно предположить, что данная технология достигла пика своего развития [11].



Развитие технологий получения углеродных волокон из ПАН-волокна (●) и гидратцеллюлозы (■)

Производители углеродных волокон

В свое время ведущими производителями углеродных волокон являлись многие известные компании, некоторые из них уже покинули данный сектор (такие как Asahi, BP, ICI, Courtaulds и BASF). В Европе углеродные волокна разработали в компании Courtaulds (Великобритания). Компания BASF (Германия) также была очень активна в 1980-х гг. и разработала новые способы получения волокон (формование из расплава), однако в конце холодной войны эти производители исчезли из данной области производства.

На 2022 г. общая мощность заводов – производителей углеродных волокон составляет ~160 тыс. тонн в год с ежегодными темпами роста за последние десятилетия ~5 %. По прогнозам, рынок углеродного волокна в мире вырастет более чем на 8 % – с 7 (2020 г.) до 8,9 млрд долл. к 2031 г. В основном широкое применение и развитие волокна получают в таких отраслях, как ветроэнергетика, аэрокосмическая и оборонная промышленность [12].

В Китае в настоящее время (2022 г.) производителями углеродного волокна являются следующие компании (производство в тоннах в год): HengShen (8), CNBC (6), Jilin-Jingong (9), Zhongjian Technology (3), Sinopec Shanghai Petrochem (2), Weihai Guangwei (2,5), Bluestar (1,5).

Прекурсоры для углеродных волокон

Прекурсором для производства углеродных волокон в настоящее время является почти исключительно ПАН и его сополимеры. Полиакрилонитрил может быть получен с помощью процессов полимеризации в растворе, суспензии и/или эмульсии, и все они классифицируются как радикальные полимеризации.

Важными вопросами являются развитие кристалличности и результирующей морфологии во время формования ПАН-прекурсора из раствора и влияние (если таковое имеется) морфологии волокна при формовании на конечные свойства углеродного волокна. Стандартный способ получения ПАН-волокон – мокрое формование. В этом случае фильеру погружают в ванну для коагуляции, и начинается сложное взаимодействие, вызванное взаимной диффузией нерастворителя/растворителя в сформованные волокна. Произойдет разделение фаз «жидкость–жидкость» и «жидкость–твердое вещество», а именно кристаллизация. Как следствие коагуляции – сформованные волокна демонстрируют отчетливые эффекты оболочки и сердцевин с пустотами, а структура и морфология волокон в целом далеки от однородных.

Сухо-мокрое формование

В работе [13] рассмотрена разница между стандартным мокрым формованием с коагуляцией и формованием с воздушным зазором. В случае использования небольшого воздушного зазора поверхность углеродного волокна более гладкая. Следует отметить, что при сухо-мокроем формовании, в отличие от формования в растворе (геле), при осаждении нити преодолевают небольшой воздушный зазор, однако затем погружаются в ванну для коагуляции, и происходят процессы массообмена.

Расплавное формование

Для получения ПАН-волокон из раствора используют либо водные ионные среды, такие как растворы $ZnCl_2$ или $NaSCN$ в воде, либо полярные органические растворители, такие как ДМФА и DMSO. Формование из расплава имеет преимущество – не требуется использовать вредные для окружающей среды растворители, а скорость формования выше скорости при мокрым и сухо-мокрым формованиями и может

приближаться к скорости формования термопластов, таких как полипропилен или полиэтилентерефталат.

Основной особенностью ПАН является его термическая нестабильность при температуре плавления $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как сложная реакция внутри- и межмолекулярной циклизации начинается с температуры $222\text{ }^{\circ}\text{C}$. Следовательно, переработка расплава гомополимера ПАН практически невозможна. Поэтому в течение нескольких десятилетий предпринимались усилия для того, чтобы сделать ПАН пригодным для переработки через расплав. Важно различать подходы с использованием внешнего пластификатора (смесь полимера с добавками) и внутренней пластификации (сополимеризация). В обоих случаях взаимодействие нитрильных ($-\text{CN}$)-групп нарушается и происходит плавление при температуре меньше температуры разложения.

Уже в 1970-х гг. компании Du Pont и American Cyanamid (США) разработали серию патентов, касающихся формования из расплава гомополимера и сополимеров ПАН с использованием всех видов пластифицирующих растворителей. Крупнейшие патенты на внутреннюю пластификацию принадлежат компании Standard Oil, в которых изначально описаны и заявлены все возможные классы сомономеров [14].

В 1980-х гг. компания BASF предприняла серьезные усилия по формованию из расплава ПАН и последующему формированию углеродного волокна. Так, смесь воды и ацетонитрила использовали в качестве пластификаторов при формовании из расплава. Таким образом можно было получить ПАН-прекурсор, который вполне пригоден для получения углеродных волокон с прочностью до 4 ГПа с соответствующими модулями в диапазоне 275–300 ГПа. Кроме того, заявлено о снижении производственных затрат до 30 %, по сравнению с формованием из раствора, и увеличении скорости линии в 4 раза.

В 1991 г. программа была прекращена в связи с окончанием холодной войны. Однако усилия, предпринятые командой BASF, не оказались напрасными – исследования в аналогичном направлении проводятся и в настоящее время. Параллельно специалисты Института прикладных исследований полимеров им. Фраунгофера (IAP, Германия) утверждают, что их технология ComCarbon® сделает возможным формование волокна из расплава при низких затратах [14].

Электроформование ПАН-прекурсора

Считается, что прочность при разрыве увеличивается с уменьшением диаметра волокна, и это явление хорошо известно в случае неорганических стеклянных волокон, где прочность определяется дефектами (теория Гриффита). Однако вопрос состоит в том, касается ли это ориентированных органических волокон.

В случае с ПАН и, в частности, с полученным из него углеродным волокном не выяснено, влияет ли диаметр волокна на прочность при растяжении. В случае со стеклянными волокнами прочность увеличивается потому, что во время горячей вытяжки устраняются поверхностные дефекты, которые являются инициаторами трещин, тогда как в случае с углеродными волокнами их внутренняя структура (морфология) неоднородна по сравнению с однородными аморфными стеклянными волокнами. Методом получения углеродных волокон со сверхмалыми диаметрами является электроформование – универсальный инструмент для производства полимерных волокон в диапазоне от нано- до микрометра [15].

Полученные методом электроформования углеродные волокна (с различными диаметрами) обладают модулем упругости, равным ~ 60 ГПа, и прочностью при разрыве от 0,3 до 0,9 ГПа. Более низкие механические свойства этих углеродных нановолокон, по сравнению с коммерческими углеродными волокнами, обусловлены главным

образом относительно плохой ориентацией макромолекул и нарушениями в структуре «ядро–оболочка» этих углеродных нановолокон [16].

Получение углеродных нановолокон на основе ПАН также показано в работе [17], где достигнуты значения модуля упругости от 40 до 60 ГПа и прочности при разрыве от 0,3 до 0,6 ГПа. Авторы работы сообщают об оптимизированных технологических условиях для получения прочных углеродных нановолокон на основе ПАН [18], а также о значениях модуля упругости до 200 ГПа и прочности при разрыве до 3,5 ГПа при карбонизации, что свидетельствует о приближении свойств данных волокон к механическим характеристикам базового углеродного волокна T300, но не превосходящих их. Однако в настоящее время электроформование все еще находится в академической сфере и его трудно масштабировать, хотя некоторые альтернативные разработки (например, роторно-струйное прядение) могут иметь несколько больший потенциал для масштабирования сверхтонких волокон [19].

Волокна на основе углеродных нанотрубок

Итак, в 1958 г. Роджер Бэкон [8] изготовил то, что он назвал графитовыми нитями, полученными в дуге постоянного тока (в компании Union Carbide), и сообщил об их уникальных свойствах: прочность достигала ~20 ГПа, а соответствующая жесткость 700 ГПа. В 1978 г. Моринобу Эндо в рамках своей докторской диссертации в Орлеанском университете (Франция) использовал метод выращивания графитовых нитей из пара [20] и мог производить их очень малого диаметра (~7 нм). Однако в то время эти нити не были признаны углеродными нанотрубками. После открытия фуллеренов в 1985 г. исследователи начали изучать различные аллотропы углерода.

Несколько групп исследователей стремились разработать макроскопические нити, изготовленные исключительно из УНТ, в качестве прямой замены нитей из углеродного волокна путем прядения выровненных массивов нанотрубок [21]. Свойства этих нитей часто были в лучшем случае невысокими. Один из более ранних примеров формирования таких нитей – это метод Рэя Баумана и его коллег с использованием процесса, который включал одновременно вытягивание и скручивание из «леса нанотрубок» [22]. Однослойные нити имели очень низкую прочность при разрыве (~250 МПа), в то время как двухслойные нити достигали прочности ~400 МПа. После инфильтрации поливинилового спирта прочность материала достигла 800 МПа. Модуль упругости составлял самое большее 25 ГПа, и, следовательно, уровень свойств этих нитей был значительно меньше, чем у базовых углеродных волокон.

Причины таких низких значений довольно очевидны и являются фундаментальной проблемой для всех скрученных нитей из УНТ. Нанотрубки в этих скрученных нитях ориентированы под углом спирали к оси нити, в то время как предельная прочность определяется кручением и трением между трубками, а не их внутренней прочностью. Это означает, что свойства определяются механикой нити, а не внутренними характеристиками УНТ.

Масштабирование (от лабораторного до промышленного) является еще одной проблемой в непрерывном производстве УНТ-волокон, лент и пленок. Значительные усилия предприняты компанией Nanocomp Technologies Inc. (Мерримак, Нью-Йорк, США), которая утверждает, что производит самые длинные УНТ длиной 1–10 мм, но диаметром всего 3–5 нм, что дает соотношение сторон >106.

Согласно данным компании Nanocomp, их волокна марки Miralon® обладают прочностью при разрыве, значение которой приближается к уровню прочности арамидных волокон, а благодаря меньшей плотности такие волокна могут конкурировать по сопротивлению усталости с углеродными волокнами. Очень важной характеристикой этих

непрерывных УНТ-волокон является их высокая прочность «на узлы», поскольку они являются гибкими в отличие от хрупких углеродных волокон. Углеродное волокно теряет >90 % своей прочности при завязывании, в то время как волокна марки Miralon® сохраняют ее благодаря тому, что состоят из миллионов гибких и запутанных УНТ длиной 1 мм. В компании Nanocomp возлагали большие надежды на такие волокна – предполагалось множество их будущих применений. К сожалению, в 2018 г. компанию Nanocomp приобрела компания Huntsman, на веб-сайте которой нити Miralon® выглядят уже менее впечатляющими, чем первоначально предполагалось.

Заключения

Технологии производства углеродных волокон достигли высокого уровня, а предложение лидера рынка – компании Toray – существенно не изменилось с середины 1980-х гг. Тем не менее в последнее время наблюдается большое количество исследований в области снижения затрат при производстве углеродных волокон и создания более дешевых волокон-прекурсоров на основе лигнина или полиэтилена. В то же время существует повышенный интерес к разработкам в области углеродных наноматериалов и волокон на основе УНТ.

Следует отметить, что перспективы применения волокон на основе углеродных нанотрубок в настоящее время не выглядят многообещающими, поскольку только малая часть разработок материализовалась в реальные коммерческие продукты. Возможно, дальнейшее развитие технологий позволит использовать данные материалы на уровне существующих углеродных волокон.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексашин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
4. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
5. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
6. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.06.2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-3-105-116.
7. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
8. Bacon R. Growth, structure, and properties of graphite whiskers // Journal of Apply Physics. 1960. P. 283–290.
9. Радужкевич Л.В., Лукьянович В.М. О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте // Журнал физической химии. 1952. Т. 26. № 1. С. 88–95.

10. Oberlin A., Endo M., Koyama T. Filamentous growth of carbon through benzene decomposition // *Journal of crystal growth*. 1976. Vol. 1. No. 32 (3). P. 335.
11. Колобков А.С. S-образная кривая развития технологии производства углеродных волокон. *Композитный мир*. 2018. № 3 (78). С. 24–25.
12. Гладунова И.О., Лысенко А.А. Рынок полимерных композиционных материалов. Тенденции и перспективы // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна*. Сер. 1: Естественные и технические науки. 2021. № 2. С. 96–100.
13. Wang Y., Tong Y., Zhang B. et al. Formation of surface morphology in polyacrylonitrile (PAN) fibers during wet-spinning // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2018. No. 13. P. 52–55.
14. Udakhe J. Melt Processing of Polyacrylonitrile (PAN) Polymers // *Journal of the Textile Association*. 2011. No. 71. P. 233–241.
15. Reneker D.H., Yarin A.L. Electrospinning jets and polymer nanofibers // *Polymer*. 2008. No. 13. P. 425.
16. Zussman E., Chen X., Ding W. et al. Mechanical and structural characterization of electrospun PAN-derived carbon nanofibers // *Carbon*. 2005. No. 43. P. 2175–2185.
17. Zhou Z., Lai C., Zhang L. Development of carbon nanofibers from aligned electrospun polyacrylonitrile nanofiber bundles and characterization of their microstructural, electrical, and mechanical properties // *Polymer*. 2009. No. 50. P. 2999–3006.
18. Arshad S.N., Naraghi M., Chasiotis I. Strong carbon nanofibers from electrospun Polyacrylonitrile // *Carbon*. 2011. Vol. 1. No. 49 (5). P. 1710–1719.
19. Rogalski J.J., Bastiaansen C.W., Peijs T. Rotary jet spinning review – a potential high yield future for polymer nanofibers // *Nanocomposites*. 2017. Vol. 2. No. 3 (4). P. 97–121.
20. Oberlin A., Endo M., Koyama T. Filamentous growth of carbon through benzene decomposition // *Journal of crystal growth*. 1976. Vol. 1. No. 32 (3). P. 335.
21. Hayashi Y., Chiba Y., Inoue H. et al. A review of dry spun carbon nanotube yarns and their potential applications in energy and mechanical devices // *Journal of Fiber Science and Technology*, 2020. No. 76 (2). P. 72–78.
22. Zhang M., Atkinson K.R., Baughman R.H. Multifunctional carbon nanotube yarns by downsizing an ancient technology // *Science*. 2004. No. 306 (5700). P. 1358–1361.

References

1. Kablov E.N., Valueva M.I., I.V. Zelenina, Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 1, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
2. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp 97–105.
4. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 1, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
5. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
6. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 1, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
7. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F., Tyumeneva T.Yu. Adhesive prepregs as promising materials for parts and assemblies from polymeric composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.

8. Bacon R. Growth, structure, and properties of graphite whiskers. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 1960, p. 283–290.
9. Radushkevich L.V., Lukyanovich V.M. On the structure of carbon formed during the thermal decomposition of carbon monoxide on an iron contact. *Journal of Physical Chemistry*, 1952, vol. 26, no. 1, pp. 88–95.
10. Oberlin A., Endo M., Koyama T. Filamentous growth of carbon through benzene decomposition. *Journal of crystal growth*, 1976, vol. 1, no. 32 (3), p. 335.
11. Kolobkov A.S. S-shaped curve of development of technology for the production of carbon fibers. *Kompozitnyy mir*, 2018, no. 3 (78), pp. 24–25.
12. Gladunova I.O., Lysenko A.A. The market of polymer composite materials. Trends and prospects. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna*. Ser. 1: Natural and technical sciences, 2021, no. 2, pp 96–100.
13. Wang Y., Tong Y., Zhang B. et al. Formation of surface morphology in polyacrylonitrile (PAN) fibers during wet-spinning. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2018, no. 13, pp. 52–55.
14. Udakhe J. Melt Processing of Polyacrylonitrile (PAN) Polymers. *Journal of the Textile Association*, 2011, no. 71, pp. 233–241.
15. Reneker D.H., Yarin A.L. Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*, 2008, no. 13, pp. 425.
16. Zussman E., Chen X., Ding W. et al. Mechanical and structural characterization of electrospun PAN-derived carbon nanofibers. *Carbon*, 2005, no. 43, pp. 2175–2185.
17. Zhou Z., Lai C., Zhang L. Development of carbon nanofibers from aligned electrospun polyacrylonitrile nanofiber bundles and characterization of their microstructural, electrical, and mechanical properties. *Polymer*, 2009, no. 50, pp. 2999–3006.
18. Arshad S.N., Naraghi M., Chasiotis I. Strong carbon nanofibers from electrospun Polyacrylonitrile. *Carbon*, 2011, vol. 1, no. 49 (5), pp. 1710–1719.
19. Rogalski J.J., Bastiaansen C.W., Peijs T. Rotary jet spinning review – a potential high yield future for polymer nanofibers. *Nanocomposites*, 2017, vol. 2, no. 3 (4), pp. 97–121.
20. Oberlin A., Endo M., Koyama T. Filamentous growth of carbon through benzene decomposition. *Journal of crystal growth*, 1976, vol. 1, no. 32 (3), pp. 335.
21. Hayashi Y., Chiba Y., Inoue H. et al. A review of dry spun carbon nanotube yarns and their potential applications in energy and mechanical devices. *Journal of Fiber Science and Technology*, 2020, no. 76 (2), pp. 72–78.
22. Zhang M., Atkinson K.R., Baughman R.H. Multifunctional carbon nanotube yarns by downsizing an ancient technology. *Science*, 2004, no. 306 (5700), pp. 1358–1361.

Информация об авторах

Колобков Александр Сергеевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander S. Kolobkov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.06.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.06.2022.
The article was submitted 14.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 16.06.2022.