

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-82-95

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЛЬНЯНЫХ ВОЛОКОН

К.И. Донецкий¹, А.В. Хрульков¹, Н.А. Городилова¹, Д.А. Мельников¹

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

Аннотация. Экологические проблемы, в первую очередь такие как отсутствие возможности вторичной переработки материалов и вследствие этого образование неконтролируемых мусорных полигонов, являются мощными стимулами для разработки биоразлагаемых материалов. Благодаря экологическим и экономическим преимуществам, а также своим техническим характеристикам, натуральные волокна становятся вероятной заменой синтетических для использования в качестве наполнителей в полимерных композиционных материалах. Волокна льна, ввиду их высокой доступности и специфики свойств, являются наиболее ценными продуктами лубяного типа. Физическая и химическая обработка волокон позволяет использовать их и для конструкционных материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, «зеленые» композиты, биополимеры, натуральное волокно, льняное волокно, биополимерное связующее, адгезия волокна, формование

Для цитирования: Донецкий К.И., Хрульков А.В., Городилова Н.А., Мельников Д.А. Перспективы применения полимерных композиционных материалов на основе льняных волокон // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-82-95.

Scientific article

PROSPECTS FOR THE USE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON FLAX FIBERS

K.I. Donetskiy¹, A.V. Hrulkov¹, N.A. Gorodilova¹, D.A. Melnikov¹

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

Abstract. Environmental problems, primarily such as the inability to recycle materials and, consequently, the formation of uncontrolled landfills, are powerful incentives for the development of biodegradable materials. Due to its environmental and economic advantages, as well as its technical characteristics, natural fibers become a likely replacement for synthetic ones for use as fillers in polymer composite materials. Flax fibers, due to their high availability and specific properties, are the most valuable products of the bast type. Physical and chemical processing of fibers allows them to be used for structural materials as well.

Keywords: polymer composite materials, «green» composites, biopolymers, natural fiber, flax fiber, biopolymer binder, fiber adhesion, molding

For citation: Donetskiy K.I., Hrulkov A.V., Gorodilova N.A., Melnikov D.A. Prospects for the use of polymer composite materials based on flax fibers. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-82-95.

Введение

При разработке и изготовлении самой разнообразной продукции полимерным композиционным материалам (ПКМ) уделяется большое внимание благодаря их уникальным свойствам. Эти материалы состоят из двух и более компонентов с существенно различающимися физическими и химическими параметрами, в сочетании они образуют материал со свойствами, отличающимися от исходных. Прочность и жесткость при восприятии нагрузок обеспечиваются наполнителем (армирующими волокнами), а матрица (связующее) в свою очередь объединяет наполнитель в единую конструкцию, которая становится прочным несущим материалом с новым комплексом свойств.

Свойства ПКМ позволяют широко применять их в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая и автомобильная, а также при производстве товаров для спорта и других [1–8]. Одним из основных ограничений для этих материалов является отсутствие биоразлагаемости, что при утилизации увеличивает количество материала, который попадает на мусорные полигоны, вызывая загрязнение. Обычно ПКМ изготавливают из стеклянных, углеродных или арамидных волокон с матрицей на основе эпоксидных, ненасыщенных полиэфирных, фенолформальдегидных и других термореактивных смол. В течение последних десятилетий ученые-материаловеды разрабатывают материалы, которые получают из растительного сырья и могут утилизироваться после истечения срока их службы, чтобы уменьшить негативное воздействие на окружающую среду [9], поэтому существует постоянная заинтересованность в разработке так называемых «зеленых» композитов.

Технология изготовления ПКМ с использованием растительных волокон и биополимерных связующих принципиально не отличается от традиционной, которая применяется при изготовлении ПКМ на основе углеродных или стеклянных волокон и полимерных связующих (рис. 1).

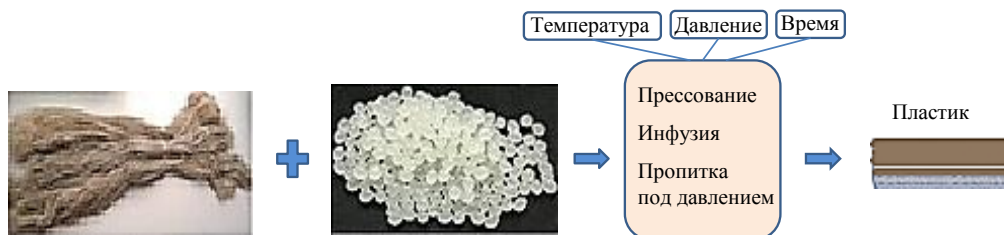


Рис. 1. Схема изготовления полимерных композитов на основе растительных волокон и биополимерных связующих

Применение биокомпозитов постоянно увеличивается, хотя доля натуральных волокон не доминирует в общей массе материалов (рис. 2) [10].

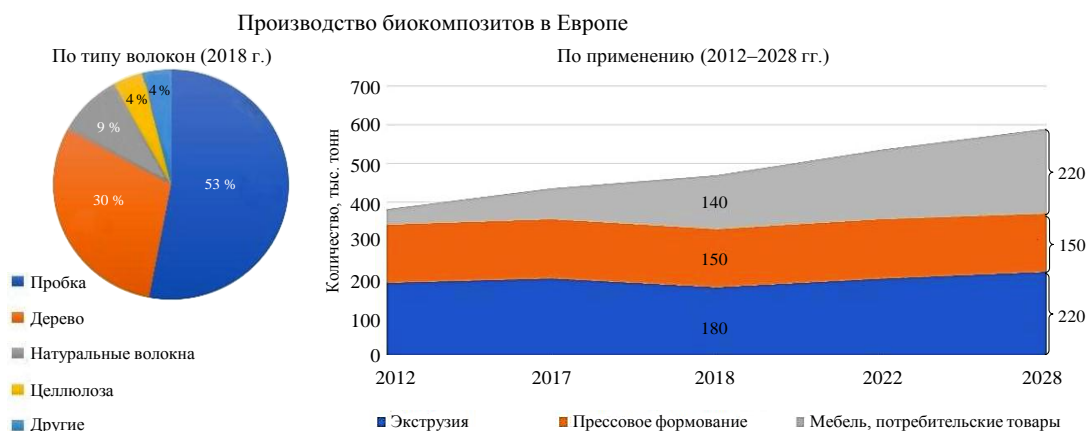


Рис. 2. Доля производимых в 2018 г. натуральных волокон (всего 9 %) от общего объема биокомпозитов и прогноз роста объема производства до 2028 г. [10]

Краткая история создания и применения «зеленых» композитов

Полимерные композиционные материалы, полученные путем армирования биополимерами (натуральными волокнами), называются «зелеными» композитами. Кокосовая койра, лен, сизаль, конопля и т. д. являются источниками натуральных волокон, а крахмал и PLA (Polylactic Acid – полимолочная кислота) – примером биополимеров, используемых в качестве связующих для изготовления «зеленых» композитов [11]. Разработка первых «зеленых» композитов относится к концу 1980-х гг. Необходимо отметить, что они не только более экологичны по сравнению с традиционными материалами, но и имеют стоимость, сравнимую со стоимостью обычных ПКМ.

Если не принимать во внимание использование в древние времена при строительстве таких материалов, как ива, лоза, тростник и подобных материалов, для армирования стен и возведения глинобитных зданий [12], то первым реальным применением природных материалов в начале XX в. стало изготовление корпусов радиоприемников и динамиков из древесной муки с бакелитовой фенольной формовочной смолой [13].

В 1920-х гг. ПКМ из натуральной ткани использовали уже для производства такого ответственного изделия, как воздушные винты самолетов. Синтетический материал под названием Gordon Aerolite, изготовленный путем горячего прессования небеленой льняной пряжи, пропитанной фенольной смолой, использовали для изготовления лонжерона главного крыла легкого бомбардировщика Bristol Blenheim (рис. 3) и фюзеляжа истребителя Supermarine Spitfire [14].

Изготовление осуществляли путем укладки полосок ткани, пропитанных смолой, после выкладки производили нагрев и прессование материала. В готовом пластике 75 % по объему составляло волокно, доля связующего – оставшиеся 25 %. Материал имел при растяжении предел прочности и модуль упругости около 480 МПа и 48 ГПа соответственно.



Рис. 3. Наполнитель для ПКМ (а) и самолет Bristol Blenheim (б) [15]

После Второй мировой войны использование композитов из натуральных волокон было значительно сокращено, поскольку синтетические полимеры синтезировали из дешевых полимеров на нефтяной основе. В конце 1990-х гг. поиск легких и прочных материалов для аэрокосмической промышленности вновь был сосредоточен на композитах, армированных натуральными волокнами [16]. Так появились современные биокомпозиты, в которых используются смолы и армирующие наполнители, полученные из возобновляемых ресурсов.

Натуральные волокна

Натуральные волокна – это волокна, полученные из растительных возобновляемых ресурсов. Экологичность и низкая стоимость таких волокон, по

сравнению с синтетическими, сделали их потенциально альтернативными материалами для производства ПКМ [17].

Большинство натуральных волокон состоят из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и нескольких водорастворимых соединений. Прочность и жесткость натурального волокна зависят от количества в нем целлюлозы. Механические свойства также зависят от углов ориентации микрофибрилл и степени полимеризации целлюлозы [18]. Кроме того, на свойства натуральных волокон влияют экотип, уровень зрелости и место произрастания растения, а также процесс выделения волокна [19]. Выбор волокна в основном зависит от требований к прочности при эксплуатации. Важными параметрами, которые могут определять свойства волокон, являются плотность, угол ориентации микрофибрилл, модуль упругости и удлинение волокна. Благодаря удачному сочетанию экологических и экономических преимуществ, становится возможным применение натуральных волокон для армирования композитов в качестве альтернативы синтетическим волокнам [20].

Механические свойства натуральных волокон меньше по сравнению с синтетическими стеклянными и углеродными волокнами, тем не менее свойства натуральных волокон можно улучшить и сделать сопоставимыми со свойствами синтетических волокон за счет надлежащей обработки поверхности. Значение удельного модуля упругости для некоторых натуральных волокон (в том числе и льняного) того же порядка, что и для стеклянных волокон. Низкая плотность и сопоставимый удельный модуль упругости натуральных волокон привлекли разработчиков перспективных материалов, поэтому такие волокна стали потенциальными кандидатами на применение в экологически чистых композитах (рис. 4) [21].

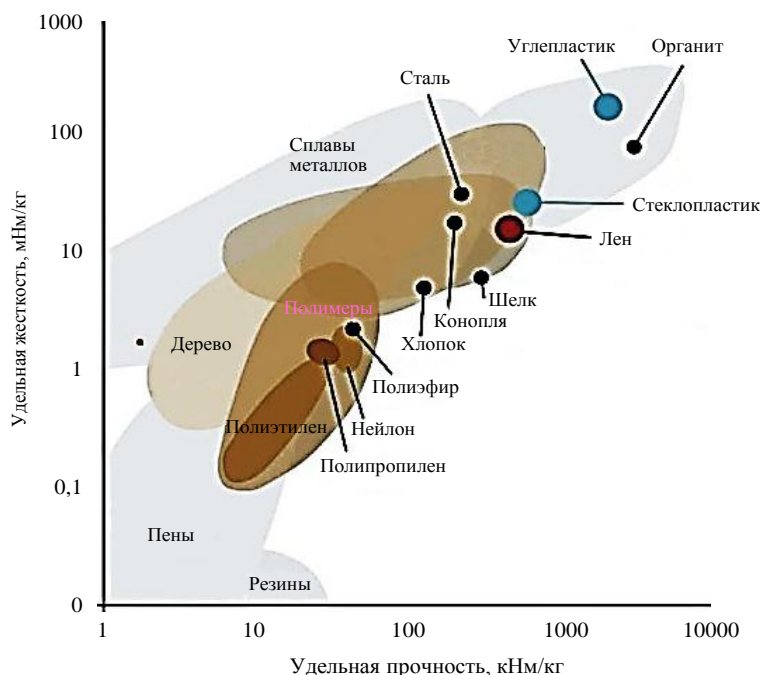


Рис. 4. Сравнительные показатели удельных свойств некоторых материалов [21]

Преимуществами натуральных волокон являются их низкая плотность (1,25–1,50 г/см³), хорошие удельные механические свойства, возможность вторичной переработки, биоразлагаемость, широкая доступность и т. д.

Другим существенным фактором является значительно более низкая цена натуральных волокон – в среднем ~600 долларов за 1 тонну. Стоимость стеклянного

волокна составляет ориентировочно от 1200 до 1800 долларов за 1 тонну [22]. Эти особенности позволяют рассмотреть возможность использования натуральных волокон в качестве армирующих материалов для производства ПКМ с полимерным связующим. Однако использование натуральных волокон в качестве армирующих материалов в этом случае имеет некоторые недостатки: плохая смачиваемость, несовместимость с некоторыми типами полимерных связующих и высокое влагопоглощение. Отметим основные преимущества и недостатки натуральных волокон:

Основные преимущества	Недостатки
Низкая плотность (1,25–1,50 г/см ³)	Отсутствие хорошей адгезии волокна к матрице
Низкая цена натуральных волокон	Гидрофильная природа
Низкая абразивность	Низкая термическая стабильность
Биоразлагаемость	Плохая огнестойкость

Наиболее распространенным недостатком композитов из натуральных волокон является отсутствие надлежащей адгезии волокна к матрице, что может привести к ухудшению механических свойств ПКМ. Для компенсации этого недостатка необходимо обеспечить хорошую адгезию между волокном и матрицей с помощью предварительной подготовки волокна.

Еще одним существенным недостатком, присущим натуральным волокнам, является их гидрофильная природа. Для уменьшения ее влияния доступен широкий спектр химических, физических и биологических обработок, например с помощью ацетона и щелочи. Такая обработка уменьшает количество загрязнений на поверхности волокон и их гидрофильность, что в свою очередь увеличивает совместимость волокна/матрицы и повышает механические свойства ПКМ [23].

Необходимо также отметить, что льняные волокна, конопля, джут и рами (китайская крапива) имеют высокое содержание целлюлозы и низкий угол ориентации микрофибрилл, что приводит к повышенным значениям прочности при растяжении в сравнении с другими натуральными волокнами. Например, хлопковые волокна имеют высокое содержание целлюлозы (82,7 %), но при этом их прочность при разрыве ниже, чем у вышеперечисленных, из-за большого угла ориентации микрофибрилл (20–30 градусов). Лен и джут сочетают в себе высокое содержание целлюлозы и низкий угол ориентации микрофибрилл, что привлекает внимание разработчиков к изучению этих волокон в качестве армирующих материалов. Однако для российских реалий именно льняное волокно имеет наибольшую ценность.

Обработка натуральных волокон

Плохая совместимость натуральных волокон с полимерными матрицами обусловлена наличием остатков некоторого количества воды и гидроксильных групп. Поскольку материалы имеют высокое содержание целлюлозы, обработка их направлена на изменение ее структуры путем замены гидроксильных групп на другие, обеспечивающие большее сродство к полимерным смолам [24].

Физические же методы обработки – такие как растяжение, каландрование, плазменная обработка – модифицируют волокна и улучшают механические характеристики ПКМ. Химический состав волокон при этом не сильно изменяется, поэтому улучшение поверхности раздела в этом случае обусловлено усилением механической связи между волокном и матрицей.

Обработка плазмой – один из наиболее часто используемых методов модификации поверхности волокон. Плазма представляет собой частично ионизированный газ с высоковозбужденными атомарными, молекулярными, ионными и радикальными частицами со свободными электронами и фотонами. При обработке

газом происходит увеличение адгезии волокна к матрице, а также повышается шероховатость поверхности, что в свою очередь приводит к увеличению механического взаимодействия между связующим и волокном [25].

Для улучшения поверхности волокна используются также химические методы подготовки поверхности, такие как подщелачивание, ацелирование, бензоилирование, отбеливание и обработка кремнийорганической жидкостью. При химической обработке из волокон удаляются гемицеллюлоза и лигнин, а из-за удаления примесей достигается увеличение площади поверхности и, следовательно, улучшается адгезия волокна к матрице. При использовании химических методов концентрация и продолжительность обработки также влияют на качество и состав поверхности волокон и свойства ПКМ на их основе [26].

Необходимо отметить, что обработка щелочью и кремнийорганической жидкостью является наиболее часто используемой химической обработкой натуральных волокон. Щелочная обработка также известна как мерсеризация и включает обработку волокон водным раствором гидроксида натрия, что приводит к частичному удалению лигнина и гемицеллюлозы и полному удалению пектина, воска, масел и других органических соединений [27].

Особенности формирования ПКМ на основе натуральных волокон

Полимерные композиционные материалы на основе натуральных волокон со свойствами, близкими к свойствам материалов на основе стекловолокна, можно получить, контролируя такие параметры производства, как вязкость связующего, давление, продолжительность выдержки и температуру, значения которых выбирают в первую очередь в зависимости от типа матрицы. При изготовлении пластиков с использованием натурального волокна важным является соблюдение осторожности при выборе температуры изготовления, поскольку разница между температурой переработки связующего и температурой деструкции волокна относительно невелика. При температуре $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет происходить значительное снижение прочности волокна [28], соответственно, необходим компромисс между выбором температуры отверждения связующего и предотвращением разрушения волокна. Результаты исследования, в котором изучали производственный диапазон температур, показали, что температура $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ является оптимальной для получения требуемых значений прочности ПКМ на основе льна [29].

Тенденции применения «зеленых» композитов

Полимерные композиционные материалы следующего поколения будут разрабатывать с учетом особых функциональных характеристик, таких как требуемая прочность, жесткость или ударная вязкость; они должны быть автономно самовосстанавливающимися, огнестойкими, а также пригодными для биомедицинского применения. С использованием натуральных волокон будет возможно получение легких вспененных композитов и материалов с барьерными свойствами, которые будут обладать высокой прочностью и жесткостью. В настоящее время основной задачей является производство волокон, обладающих такими характеристиками. Так, результаты исследований, проведенные в Университете Гронингена, позволили организовать производство высокопрочных целлюлозных волокон по технологии растворения чистой целлюлозы в высококонцентрированной фосфорной кислоте с образованием жидкокристаллической фазы с последующим изготовлением волокна. В результате показано, что волокна обеспечивают при растяжении прочность $1500\text{--}1700\text{ МПа}$ и модуль упругости $\sim 40\text{ ГПа}$ [30], что сопоставимо со свойствами ПКМ на основе стекловолокна.

Некоторые исследователи также сосредоточились на синтезе и производстве огнестойких «зеленых» композитов. Например, протеины, в химическом составе которых содержится большое количество азота, плохо горят – эти виды протеинов можно использовать при производстве огнезащитных композитов [31].

Натуральные волокна могут применяться в самовосстанавливающихся [32] и функционально-градиентных материалах, свойства которых постепенно изменяются в зависимости от их размеров. Эти материалы привлекли большое внимание из-за их изменяемых свойств по толщине и месту положения в конструкции [33–36].

Как указано ранее, натуральные волокна появились в качестве новой альтернативы искусственным волокнам, таким как стекловолокно, арамидное волокно и т. д. К этим волокнам относятся и волокна льна, поскольку они обладают сравнимой прочностью при растяжении и жесткостью, как у стекловолокна, и обладают низкой абразивностью и способностью демпфирования вибрации.

Натуральные волокна из льна легче минеральных волокон, а также обладают такими преимуществами, как низкая стоимость и способность к биодеструкции. В связи с общемировым ростом потребности в ПКМ и стремлением снизить экологические издержки при утилизации традиционных материалов, разработке полимеров из растительных возобновляемых ресурсов уделяется значительное внимание. Биополимеры и натуральные волокна вместе могут обеспечить возможность создания легких конструкций для интерьера и наружных структурных элементов. Более того, в будущем такие материалы смогут частично заменить используемые в настоящее время ПКМ и найти свою потребительскую нишу.

Некоторые примеры конструкций из ПКМ, изготовленных с использованием волокон льна

На европейской конференции ECCM15 в июне 2012 г. в рамках проекта ECOSHELL была представлена разработка полностью возобновляемых ПКМ для изготовления высоконагруженных автомобильных деталей. Цель проекта была направлена на внедрение инновационных биоматериалов в производство сверхлегкого кузова электромобиля Citi-Zen, разработанного компанией Citi Technologies (Италия). В качестве наполнителей применены нетканый толстый мат из льна, а также равнопрочная и однонаправленная ткань из того же материала, которые пропитаны смолой биологического происхождения [37].

На рис. 5 представлены фотографии автомобиля и корпуса из ПКМ на основе льна. Детали корпуса электромобиля отформованы на гидравлическом 100-тонном прессе, позволяющем точно контролировать давление уплотнения [37].

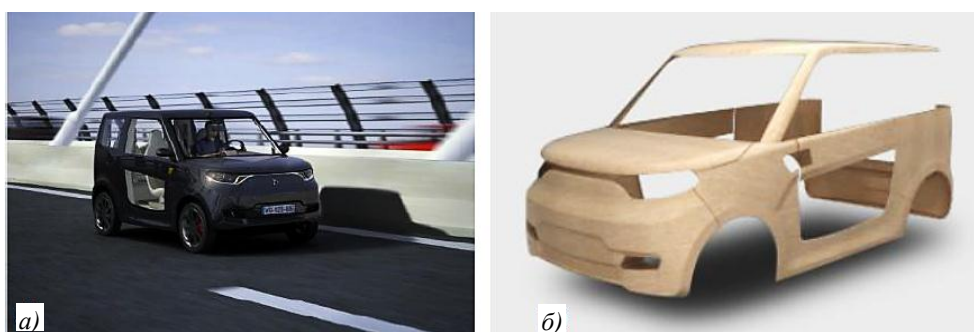


Рис. 5. Электромобиль Citi-Zen (а) и корпус из 100%-ного биокомпозита (б) [37]

В 2013 г. фирма Kaïros Environnement использовала льняное волокно вместо стекловолокна при строительстве небольшого семиметрового тримарана Gwalaz (рис. 6) [38]. Это первый пример серийного производства, когда в яхтенной индустрии детали интерьера были изготовлены из ПКМ с применением наполнителей из льна. При этом технические характеристики отвечают требованиям стандартов, предъявляемым к этому типу лодок.



Рис. 6. Корпус (а) и интерьер (б) тримарана Gwalaz [38]

В Нидерландах для пешеходов и велосипедистов спроектирован и построен композитный мост (рис. 7) с использованием наполнителя в виде льняного волокна, а в качестве несъемной оснастки, которая встраивается в конструкцию, применены пенополиуретановые блоки [39]. Длина моста составляет 15 метров, он рассчитан на нагрузку, соответствующую общей массе 275 человек.

Процесс изготовления конструкции моста состоит из укладки льняного полотна поверх блоков из полиуретана и последующей вакуумной инфузии, при которой смола пропитывает льняной наполнитель, после чего происходит отверждение связующего (рис. 8).



Рис. 7. Мост из льна и биосмолы в Нидерландах [39]



Рис. 8. Подготовленная к процессу вакуумной инфузии заготовка моста из льна и биосмолы [39]

Перила моста также изготовлены с использованием льняного волокна (рис. 9).



Рис. 9. Декоративные перила моста из полимерного композита на основе льна [39]

При изготовлении моста использовано 3,2 тонны льняного волокна. В качестве связующего использовалась полиэфирная смола, 25 % которой изготовлено с добавлением природных возобновляемых биокомпонентов. По заявлениям разработчиков для будущих проектов мостов необходимо увеличить эту долю до ~60 %.

Для постоянного контроля деформаций в процессе эксплуатации в конструкцию установили ~100 датчиков. Следует отметить, что схожий метод контроля эксплуатационных характеристик использован при строительстве углепластикового моста в Ульяновской области [40].

Швейцарская фирма Vcomr разработала армирующий наполнитель Amplitex, состоящий из ткани на основе льняных волокон, который можно пропитывать обычной эпоксидной смолой. Из льняного волокна, также как и из углеродного, можно ткать ткани различными способами с требуемой массой с учетом различных областей применения. Например, для использования в таких изделиях, как кузовные панели, наполнитель Amplitex приклеивается к внутренним поверхностям силовыми накладками, также изготовленными из льна, но напоминающими своего рода 3D-сетку, для придания жесткости готовому компоненту [41].

Эти материалы использованы при изготовлении деталей автомобиля Cayman 718 GT4 CS MR фирмы Porsche Motorspor (рис. 10).

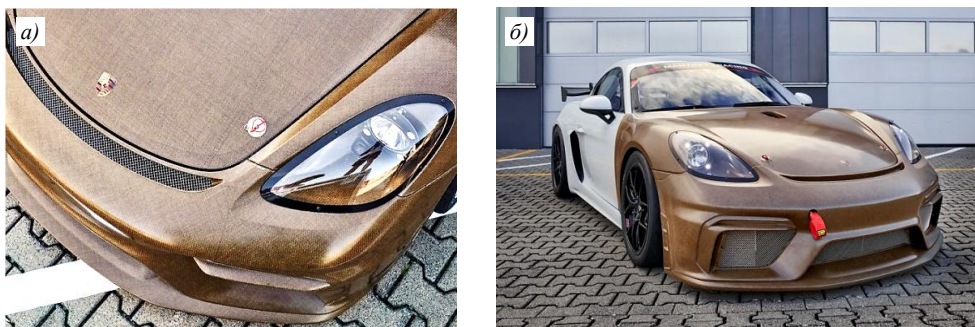


Рис. 10. Автомобиль Cayman 718 GT4 CS MR с деталями из полимерного композита на основе волокон льна [41]

Работы, связанные с использованием льняного волокна при изготовлении изделий из ПКМ, проводятся и в Российской Федерации. Так, на предприятии Татнефть-Пресскомполит изготавливают профили на основе льняных волокон методом экструзии серии Eсо (рис. 11) для использования в уличных скамейках, осветительных столбах и других изделиях [42, 43].

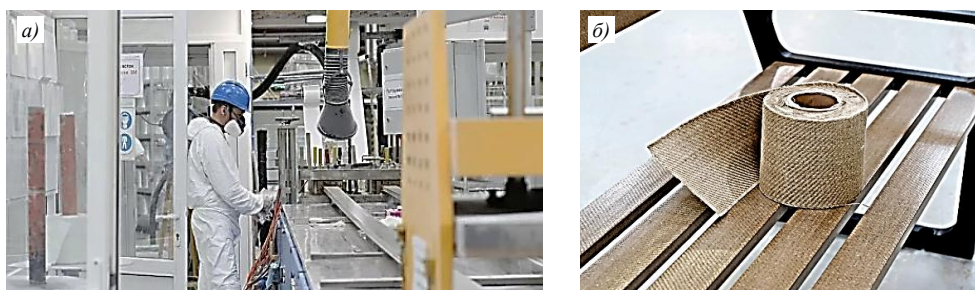


Рис. 11. Изготовление профиля серии Eсо (а) и уличная скамейка (б) из полимерного композита на основе льняных волокон [42, 43]

Заключения

Рост объема использования натуральных волокон при изготовлении конструкций из ПКМ объясняется рядом их преимуществ:

– возобновляемые источники растительного происхождения, из которых изготавливают натуральные волокна, например лен, выращиваемый в различных странах, в том числе и в Российской Федерации;

– энергия, потребляемая при переработке натуральных волокон, намного меньше, чем у стекловолокна. Например, энергия, необходимая для производства натуральных волокон из льна, составляет ~17 % от энергии, необходимой для производства того же количества стекловолокна, при этом при производстве изделий на 85 % сокращаются выбросы углекислого газа;

– удельные прочностные свойства ПКМ на основе льняных волокон близки к свойствам стеклопластиков. Кроме того, применение волокон из льна придает ПКМ на их основе хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства, наблюдается меньший износ инструмента при механической обработке;

– волокна из льна поддаются биологическому разложению и вторичной переработке, что делает их экологически чистыми и подходящими для экономики замкнутого цикла, поэтому «зеленая» химия и экологическая инженерия рассматриваются как основные возможности для расширения применения следующего поколения материалов и процессов при использовании ПКМ на основе льняных волокон.

В то же время имеются серьезные недостатки, которые сдерживают быстрое и широкое внедрение натуральных волокон:

– высокое влагопоглощение, что ограничивает использование натуральных волокон в полимерах и требует подготовки поверхности перед их применением для совместимости с полимерными связующими;

– низкая (до 150 °С) допустимая температура обработки, что сужает выбор полимерной матрицы до связующих, которые имеют низкие температуры плавления;

– неравномерность формы, так как волокна не имеют одинакового поперечного сечения по длине. Это затрудняет прогнозирование механических свойств из-за большого разброса величин прочности.

В настоящее время льняные волокна применяют при изготовлении из ПКМ деталей автомобилей, строительных конструкций, корпусов лодок, деталей интерьера и спортивных товаров.

В перспективе применение натуральных волокон, в том числе льняных, будет расти, вытесняя синтетические волокна из тех областей, где их свойства отвечают требованиям по прочности, теплостойкости, жесткости и другим потребительским свойствам.

Дальнейшее использование льняных волокон в изделиях из ПКМ потребует дополнительных исследований и научно-исследовательских работ по выбору способов обработки поверхности исходных волокон с целью их совместимости с применяемыми связующими, выбору технологий изготовления.

Данное направление является перспективным, в том числе и для НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, при разработке новых типов связующих и ПКМ на основе льняных волокон.

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

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
3. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites // Journal of Physics: Conference Series. «International Conference on Engineering Systems 2020». 2020. P. 012029.
4. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Применение натуральных волокон при изготовлении полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2015. № 2. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-9-9.
5. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Громова А.А., Гусев Ю.А. Влияние эксплуатационных факторов на основные физико-механические свойства изделий из стеклопластика ВПС-31 // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90.

6. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
7. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
8. Донецкий К.И., Быстрикова Д.В., Караваев Р.Ю., Тимошков П.Н. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 3 (87). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.
9. Gonzalo M., Figueiro R. PLA Composites Reinforced with Flax and JuteFibers—A Review of Recent Trends, Processing Parameters and Mechanical Properties // *Polymers*. 2020. No. 12 (2373). P. 1–29.
10. Mohamad Midani M., Elseify L.A. Natural Fiber Composites: Practical Guide for Industrial Utilization // *International Fiber Journal*. 2022. No. 2. P. 26–29.
11. Shekar H.S., Ramachandra M. Green Composites: A Review // *Materials Today Proceedings*. 2018. No. 5. P. 2518–2526.
12. Mulhaupt R. The Use of Renewable Resources—Possibilities and Limitations // *Energies*. 1996. No. 50. P. 191–198.
13. Siakeng R., Jawaid M., Ariffin H. et al. Natural fiber reinforced polylactic acid composites: A review // *Polymer Composites*. 2019. Vol. 40. Is. 2. P. 446–463. DOI: 10.1002/pc.24747.
14. McMullen P. Fiber/resin composites for aircraft primary structures: A short history // *Composites*. 1984. No. 15. P. 222–230.
15. Bristol Blenheim. URL: http://www.pilotfriend.com/photo_albums/timeline/ww2/Bristol%20Blenheim.htm (дата обращения: 24.08.2023).
16. Middleton D.H. Composite Developments in Aircraft Structures – Part 1 // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 1992. Vol. 64. No. 5. P. 2–8. DOI: 10.1108/eb037234.
17. Sáez A. Industrial Applications of Natural Gas // *InTech Open*. 2010. No. 9. P. 11–28.
18. Bos H.L. The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials. Technische Universiteit Eindhoven. 2004. DOI: 10.6100/IR575360.
19. Xie Y., Hill C.A.S., Xiao Z. et al. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review // *Polymer Composites*. 2010. No. 41. P. 806–819.
20. Pacheco-Torgal F., Jalali S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibers: A review // *Polymer Composites*. 2011. No. 25. P. 575–581.
21. Сидорина А.И. Натуральные армирующие наполнители для полимерных композиционных материалов (обзор) // *Химические волокна*. 2023. № 1. С. 56–65.
22. Jawaid M., Khalil H.A. Cellulosic/synthetic fiber reinforced polymer hybrid composites: A review // *Polymer Composites*. 2011. No. 86. P. 1–18.
23. Hart A., Summerscales J. Effect of time at temperature for natural fibers // *Procedia Engineering*. 2017. No. 200. P. 269–275.
24. Mohanty A.K., Misra M., Dreal L.T. Surface Modifications of Natural Fibers and Performance of the Resulting Biocomposite // *Composite Interfaces*. 2001. No. 8. P. 313–343.
25. Cruz J., Figueiro R. Surface Modification of Natural Fibers: A Review // *Procedia Engineering*. 2016. No. 155. P. 285–288.
26. Cho D., Lee H.S., Han S.O. Effect of Fiber Surface Modification on the Interfacial and Mechanical Properties of Kenaf Fiber-Reinforced Thermoplastic and Thermosetting Polymer Composites // *Composite Interfaces*. 2009. No. 16. P. 711–729.
27. Ferreira D.P., Cruz J., Figueiro R. Surface Modification of Natural Fibers in Polymer Composites // *Composite Interfaces*. 2019. No. 6. P. 30–41.
28. Herrmann A., Nickel J., Riedel U. Construction materials based upon biologically renewable resources—From components to finished parts // *Procedia Engineering*. 1998. No. 59. P. 251–261.
29. Pickering K.L., Efendy M.A., Le T.M. A review of recent developments in natural fiber composites and their mechanical performance // *Composite Interfaces*. 2016. No. 83. P. 98–112.

30. Netravali A.N. Advanced green composites: New directions // *Advanced Composite Materials*. 2019. No. 8. P. 32–38.
31. Netravali A.N., Huang X., Mizuta K. Advanced «Green» Composites // *Advanced Composite Materials*. 2018. No. 7. P. 12–24.
32. Chow W.S., Ishak Z.A.M. Smart polymer nanocomposites: A review // *Procedia Engineering*. 2020. No. 14. P. 16–35.
33. Zhang N., Khan T., Guo H., Shi S., Zhong W., Zhang W. Functionally Graded Materials: An Overview of Stability, Buckling and Free Vibration Analysis // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. No. 5. P. 1–18.
34. Singh R., Bhavar V., Kattire P., Thakare S., Patil S., Singh R.K.P. A Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications // *Procedia Engineering*. 2017. No. 229. P. 22–36.
35. Pereira J.F., Ferreira D.P., Pinho E., Figueiro R. Chemical and Biological Warfare Protection and Self-Decontaminating Flax Fabrics Based on CaO Nanoparticles // *Key Engineering Materials*. 2019. No. 812. P. 75–83.
36. Costa S.M., Ferreira D.P., Ferreira A., Vaz F., Figueiro R. Multifunctional Flax Fibers Based on the Combined Effect of Silver and Zinc Oxide (Ag/ZnO) Nanostructures // *Nanomaterials*. 2018. No. 8. P. 10–30.
37. Njuguna J., Nassiopoulos E. Development of flax-reinforced bio-composites for high-load bearing automotive parts // *Composite Materials*. 2012. No. 4. P. 17–30.
38. Torterat C. Flax fiber, the material that will replace fiberglass in boat building? // *Boats news : International Boats magazine*. URL: <https://www.boatsnews.com/story/39468/flax-fiber-the-material-that-will-replace-fiberglass-in-boat-building> (дата обращения: 12.07.2023).
39. Гладунова О. Мост из льна и биосмолы в Нидерландах // *Compositeworld*. <https://compositeworld.ru/articles/app/id627b59b50e5c8ff00199ab8d6> (дата обращения: 24.08.2023).
40. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // *Труды ВИАМ*. 2017. № 6 (54). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.
41. Crosse J. Amplitex, which consists of woven fabric made of flax fibres, could be an alternative to carbon-fibre. URL: <https://www.autocarindia.com/auto-features/fun-flax-an-eco-friendly-alternative-to-carbon-fibre-419419> (дата обращения: 13.07.2023).
42. Игнатъева А. Татнефть вывела на рынок композитные профили с использованием эко-материала. URL: <https://neftegaz.ru/news/Oborudovanie/726857-tatneft-vyvela-na-rynok-kompozitnye-profil-i-s-ispolzovaniem-eko-materiala/> (дата обращения: 12.07.2023).
43. Достичь углеродной нейтральности: «Татнефть» начала выпуск композитов из льна. URL: <https://www.tatar-inform.ru/news/dostic-uglerodnoi-neitralnosti-tatneft-nacala-vypusk-kompozitov-iz-lna-5856880> (дата обращения: 12.07.2023).

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
3. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites. *Journal of Physics: Conference Series. «International Conference on Engineering Systems 2020»*, 2020, pp. 012029.
4. Donetskij K.I., Khrulkov A.V. Application of natural fibers for manufacturing of polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2015, no. 2, paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 05, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-9-9.
5. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Gromova A.A., Gusev Yu.A. Influence of operational factors on the main physical and mechanical properties of a fiberglass product VPS-31. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90.

6. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: February 01, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
7. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
8. Donetskiy K.I., Bystrikova D.V., Karavaev R.Yu., Timoshkov P.N. Application of polymeric composite materials for creation of elements of transmissions of aviation engineering (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 19, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.
9. Gonzalo M., Fangueiro R. PLA Composites Reinforced with Flax and Jute Fibers—A Review of Recent Trends, Processing Parameters and Mechanical Properties. *Polymers*, 2020, no. 12 (2373), pp. 1–29.
10. Mohamad Midani M., Elseify L.A. Natural Fiber Composites: Practical Guide for Industrial Utilization. *International Fiber Journal*, 2022, no. 2, pp. 26–29.
11. Shekar H.S., Ramachandra M. Green Composites: A Review. *Materials Today Proceedings*, 2018, no. 5, pp. 2518–2526.
12. Mulhaupt R. The Use of Renewable Resources—Possibilities and Limitations. *Energies*, 1996, no. 50, pp. 191–198.
13. Siakeng R., Jawaid M., Ariffin H. et al. Natural fiber reinforced polylactic acid composites: A review. *Polymer Composites*, 2019, vol. 40, is. 2, pp. 446–463. DOI: 10.1002/pc.24747.
14. McMullen P. Fiber/resin composites for aircraft primary structures: A short history. *Composites*, 1984, no. 15, pp. 222–230.
15. Bristol Blenheim. Available at: http://www.pilotfriend.com/photo_albums/timeline/w2/Bristol%20Blenheim.htm (accessed: August 24, 2023).
16. Middleton D.H. Composite Developments in Aircraft Structures – Part 1. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1992, vol. 64, no. 5, pp. 2–8. DOI: 10.1108/eb037234.
17. Sáez A. Industrial Applications of Natural Gas. *InTech Open*, 2010, no. 9, pp. 11–28.
18. Bos H.L. *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials*. Technische Universiteit Eindhoven, 2004. DOI: 10.6100/IR575360.
19. Xie Y., Hill C.A.S., Xiao Z. et al. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Polymer Composites*, 2010, no. 41, pp. 806–819.
20. Pacheco-Torgal F., Jalali S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibers: A review. *Polymer Composites*, 2011, no. 25, pp. 575–581.
21. Sidorina A.I. Natural reinforcing fillers for polymer composite materials (review). *Khimicheskie volokna*, 2023, no. 1, pp. 56–65.
22. Jawaid M., Khalil H.A. Cellulosic/synthetic fiber reinforced polymer hybrid composites: A review. *Polymer Composites*, 2011, no. 86, pp. 1–18.
23. Hart A., Summerscales J. Effect of time at temperature for natural fibers. *Procedia Engineering*, 2017, no. 200, pp. 269–275.
24. Mohanty A.K., Misra M., Dreal L.T. Surface Modifications of Natural Fibers and Performance of the Resulting Biocomposite // *Composite Interfaces*, 2001, no. 8, pp. 313–343.
25. Cruz J., Fangueiro R. Surface Modification of Natural Fibers: A Review. *Procedia Engineering*, 2016, no. 155, pp. 285–288.
26. Cho D., Lee H.S., Han S.O. Effect of Fiber Surface Modification on the Interfacial and Mechanical Properties of Kenaf Fiber-Reinforced Thermoplastic and Thermosetting Polymer Composites. *Composite Interfaces*, 2009, no. 16, pp. 711–729.
27. Ferreira D.P., Cruz J., Fangueiro R. Surface Modification of Natural Fibers in Polymer Composites // *Composite Interfaces*, 2019, no. 6, pp. 30–41.
28. Herrmann A., Nickel J., Riedel U. Construction materials based upon biologically renewable resources—From components to finished parts. *Procedia Engineering*, 1998, no. 59, pp. 251–261.
29. Pickering K.L., Efendy M.A., Le T.M. A review of recent developments in natural fiber composites and their mechanical performance. *Composite Interfaces*, 2016, no. 83, pp. 98–112.
30. Netravali A.N. Advanced green composites: New directions. *Advanced Composite Materials*, 2019, no. 8, pp. 32–38.

31. Netravali A.N., Huang X., Mizuta K. Advanced «Green» Composites. *Advanced Composite Materials*, 2018, no. 7, pp. 12–24.
32. Chow W.S., Ishak Z.A.M. Smart polymer nanocomposites: A review. *Procedia Engineering*, 2020, no. 14, pp. 16–35.
33. Zhang N., Khan T., Guo H., Shi S., Zhong W., Zhang W. Functionally Graded Materials: An Overview of Stability, Buckling and Free Vibration Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, no. 5, pp. 1–18.
34. Singh R., Bhavar V., Kattire P., Thakare S., Patil S., Singh R.K.P. A Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications. *Procedia Engineering*, 2017, no. 229, pp. 22–36.
35. Pereira J.F., Ferreira D.P., Pinho E., Figueiro R. Chemical and Biological Warfare Protection and Self-Decontaminating Flax Fabrics Based on CaO Nanoparticles. *Key Engineering Materials*, 2019, no. 812, pp. 75–83.
36. Costa S.M., Ferreira D.P., Ferreira A., Vaz F., Figueiro R. Multifunctional Flax Fibers Based on the Combined Effect of Silver and Zinc Oxide (Ag/ZnO) Nanostructures. *Nanomaterials*, 2018, no. 8, pp. 10–30.
37. Njuguna J., Nassiopoulos E. Development of flax-reinforced bio-composites for high-load bearing automotive parts. *Composite Materials*, 2012, no. 4, pp. 17–30.
38. Torterat C. Flax fiber, the material that will replace fiberglass in boat building? *Boats news: International Boats magazine*. Available at: <https://www.boatsnews.com/story/39468/flax-fiber-the-material-that-will-replace-fiberglass-in-boat-building> (accessed: July 12, 2023).
39. Gladunova O. *Bridge made of flax and bioresin in the Netherlands*. Available at: <https://compositeworld.ru/articles/app/id627b59b50e5c8f00199ab8d6> (дата обращения: 24.08.2023).
40. Mishkin S.I., Raskutin A.E., Evdokimov A.A., Gulyaev I.N. Technologies and the main stages of construction of the arch bridge first in Russia from composite materials. *Trudy VIAM*, 2017, no. 6 (54), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 05, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.
41. Crosse J. *Amplitex, which consists of woven fabric made of flax fibres, could be an alternative to carbon-fibre*. Available at: <https://www.autocarindia.com/auto-features/fun-flax-an-eco-friendly-alternative-to-carbon-fibre-419419> (accessed: July 13, 2023).
42. Ignatieva A. *Tatneft brought to the market composite profiles using eco-material*. Available at: <https://neftegaz.ru/news/Oborudovanie/726857-tatneft-vyvela-na-rynok-kompozitnye-profilispolzovaniem-eko-materiala/> (accessed: July 12, 2023).
43. *Achieve carbon neutrality: Tatneft began production of flax composites*. Available at: <https://www.tatar-inform.ru/news/dostic-uglerodnoi-neitralnosti-tatneft-nacala-vypusk-kompozitov-iz-lna-5856880> (accessed: July 12, 2023).

Информация об авторах

Донецкий Кирилл Игоревич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Хрульков Александр Владимирович, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Городилова Наталья Александровна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Мельников Денис Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Kirill I. Donetskiy, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Alexander V. Hrulkov, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Natalia A. Gorodilova, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Denis A. Melnikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.09.2023.
 The article was submitted 04.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 19.09.2023.