

УДК 678.8

В.А. Гончаров¹, П.Н. Тимошков¹, М.Н. Усачева¹**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА
КРУПНОГАБАРИТНЫХ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-55-62

В настоящее время крылья для самолетов Boeing 787 и Airbus A350 изготавливают из полимерных композиционных материалов в виде препрегов на основе углеродного волокна, заготовки из которых формуют в автоклаве. Ожидается, что к 2025–2030 гг. будут активно применять метод вакуумной инфузии, что потребует проведения глобальных исследований по выбору связующих и армирующих материалов, отработке процесса вакуумной пропитки и отверждения, автоматизации и освоению новых технологических методов выкладки заготовок деталей, ускорению процесса и сокращению продолжительности цикла.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, автоклавное формование, вакуумная инфузия, крылья самолетов, препреги, связующие, наполнители, автоматизация.

V.A. Goncharov¹, P.N. Timoshkov¹, M.N. Usacheva¹**PROSPECTS OF THE PRODUCTION OF LARGE-SIZED AIRCRAFT
PARTS FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review)**

Today wings for Boeing 787 and Airbus A350 aircraft are made of polymer composite materials in the form of prepregs based on carbon fiber, the blanks of which are molded in an autoclave. It is expected that by 2025–2030 will actively use the vacuum infusion method, which will require global research on the selection of binding and reinforcing materials, development of the vacuum impregnation and curing process, automation and development of new technological methods for laying out workpieces of parts, accelerating the process and shortening the cycle time.

Keywords: polymer composites materials, autoclave molding, vacuum infusion, aircraft wings, prepregs, resin, filler, automation.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Авиационные конструкции, изготавливаемые из материалов на основе углеродного волокна и полимерного связующего, используют достаточно давно, однако их производство никогда не росло такими темпами, которые ожидаются для производства деталей для узкофюзеляжных самолетов следующего поколения.

На открытии Международного авиационно-космического салона МАКС-2021 Владимир Путин отметил особую важность создания авиационной техники для нашей бескрайней страны [1]. Несомненно, что новые конструкции летательных аппаратов (пилотируемых самолетов, беспилотников, сверхзвуковых и небольших региональных самолетов) будут создавать с использованием новых полимерных композиционных

материалов (ПКМ) и новых технологий их переработки [2]. Развитие авиационной промышленности всегда сопровождается разработкой усовершенствованных материалов и для планера, и для двигателей [3–4]. Для системной работы в этом направлении в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан стратегический план исследований и создания новых материалов до 2030 г. [5].

Несмотря на пандемию, вызванную распространением коронавирусной инфекции, в мире продолжается планомерное создание новых материалов и технологий. В настоящее время из углепластика изготавливают различные конструкции для народного хозяйства – космические корабли, летательные аппараты, автомобили, мосты, трансмиссионные валы, спортивные товары и многое другое [6, 7]. Разработаны материалы на основе плетеных преформ и объемных наполнителей, а также технологии их переработки с использованием инфузионных методов пропитки [8–10]. Для автоматизированных технологий разработаны углепластики на основе однонаправленных углеродных лент и эпоксидных связующих [11, 12]. Проводятся исследования по совершенствованию методов формования, использованию ПКМ для изготовления изделий медицинского назначения, технологической оснастки [13–17].

Полимерные композиционные материалы, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, нашли применение в различных отраслях народного хозяйства. Так, для строительства моста в п. Языково Ульяновской области разработаны связующие для изготовления арочных элементов из углепластика. Данные элементы благодаря использованию инфузионной технологии можно изготавливать в полевых условиях. Для создания стеклопластикового настила сконструирована и изготовлена специальная разборная композитная оснастка, отличающаяся от металлической – тяжелой и дорогостоящей. Кроме того, разработано связующее холодного отверждения, на основе которого изготовлены шпунты, обладающие высокой химической и влагостойкостью, что позволило в короткий срок построить на основе разработанных материалов и технологий вместо старого деревянного моста новый [18].

Применение улучшенных, высокодеформативных связующих и совершенствование технологий их получения, в том числе автоматизированных, открыло новые возможности в создании многих конструкций в самолете (детали и изделия для механизации крыла, хвостовое оперение, детали капота и двигателя) [19, 20].

Компании Boeing и Airbus, прежде чем принять решение об изготовлении основных конструкций широкофюзеляжных самолетов 787 и A350 соответственно из ПКМ на основе углеродного волокна, рассмотрели бесчисленное множество вариантов типов связующего, армирующего волокна и производственного процесса. В значительной степени принятие решений в пользу ПКМ обусловлено наличием производимых материалов, доступными технологиями, допустимыми затратами на материалы и капитальное оборудование, внутренними производственными мощностями и производственными мощностями поставщиков, а также ожидаемыми темпами изготовления самолетов.

Решение по изготовлению конструкции крыла (кессона крыла, лонжеронов, нервюр и обшивки) было простым по сравнению с решениями, касающимися конструкции фюзеляжа. Протяженные, с умеренной кривизной поверхности конструкции крыла хорошо подходили для применения технологий автоматической укладки ленты (ATL) и автоматической укладки волокон (AFP). Эти автоматизированные технологии обеспечивали точную и последовательную укладку значительного количества препрега на больших площадях [21]. И даже тот факт, что матрица из эпоксидной смолы, используемая в данных препрегах, требовала длительного отверждения в очень больших автоклавах, является частью достигнутого на тот момент уровня техники, обеспечивающего

приемлемую стоимость процесса и требуемую производительность. Кроме того, автоклав обеспечивает эффективное уплотнение заготовок из ПКМ и достижение уровня пористости $<1\%$, что требуется для надежной работы деталей аэрокосмической техники.

Данная технология осталась без изменения с 2013 г., когда компания Boeing запустила производство самолета 777, который в настоящее время имеет самые большие в мире композитные крылья, изготовленные из углеродного волокна, общий размах которых составляет 72 м. Их производят на заводе по изготовлению крыльев для компании Boeing в г. Эверетт (США) с использованием технологии AFP и крупнейших в мире автоклавов диаметром 8,5 м и длиной 37 м, изготовленных компанией ASC Systems (США). Для сравнения следует отметить, что у самолета Boeing 787-8 размах крыльев достигает 60,1 м, а у самолета Airbus A350: 64,75 м [20, 22].

Однако, по мере того как интенсивно развивается аэрокосмическая промышленность, технология производства крыла из препрегов становится все менее привлекательной: необходимость использования морозильных камер для хранения препрега и контроля его срока годности снижает вероятность выбора данного материала при изготовлении конструкций и деталей [23].

В том случае если компании Boeing или Airbus примут решение о разработке новых самолетов на замену 737 и A320 в ближайшие пять лет, им придется рассмотреть множество вариантов новых материалов и технологий. Это жизненно необходимо, поскольку эксплуатация этих воздушных судов приносит большую экономическую прибыль обеим компаниям. С учетом того, что объемы производства самолетов, как ожидается, могут достигнуть до 100 шт. в месяц, их, несомненно, будут производить по таким технологиям, которые обеспечат быстрое изготовление композитных конструкций без использования автоклавов.

Известно, что алюминий и углепластики используют в обеих компаниях для производства конструкций фюзеляжа и крыла [24].

Переход от препреговой технологии и автоклавного формования деталей к усовершенствованным методам потребует значительных инвестиций в исследования, разработку производства, изготовление оборудования и подготовку специалистов. Препреги, несмотря на существующие недостатки, остаются привлекательными по двум важным причинам. Во-первых, многие аэрокосмические препреги уже квалифицированы, а в аэрокосмической сфере квалификация – это процесс, на проведение которого необходимо много средств и времени. Во-вторых, препреги поставляют с содержанием связующего и волокна в точно требуемых соотношениях, что обеспечивает стабильность производственного процесса, который и так сильно загружен переменными технологическими факторами [20].

Переход на инфузионную технологию

Преимуществом инфузионной технологии в первую очередь является то, что данный процесс проводится вне автоклава. Вместо этого сухие армирующие, либо однонаправленные волокна, либо в виде многослойных тканей разрезают, подгоняют, помещают на оснастку, а затем проводят вакуумирование, где одно- или двухкомпонентное связующее в результате перепада вакуумного давления поступает в технологический пакет и пропитывает заготовку будущей детали.

Далее осуществляют формование, которое проводят в термопечах. Однако отказ от автоклава и зависимость процесса от атмосферного давления для достижения необходимого качества материала при отверждении увеличивают опасность отклонения от требуемых свойств материала, таких как соотношение наполнитель/связующее, низкая пористость, а также требуемая толщина монослоя [25].

Тем не менее, вакуумная инфузия не новая технология для коммерческой аэрокосмической промышленности. Даже несмотря на то, что большая часть деталей, полученных с использованием инфузионной технологии, была небольшого размера (закрылки, напорные переборки и т. д.), по данной технологии изготавливали и крупногабаритные детали – например, грузовую дверь для военно-транспортного самолета Airbus A400M, который вышел на рынок в 2010 г.; подвижную заднюю кромку крыла Boeing 787, изготовленную по запатентованной технологии CAPRI; напорную переборку для самолета Airbus A380, полученную по технологии поперечной пропитки с использованием полимерного пленочного связующего; крылья самолета MC-21.

Следует также указать, что крылья для узкофюзеляжного самолета Airbus A220 изготовлены с применением комбинированной технологии – пропиткой преформы под вакуумом с последующим автоклавным формованием. Самолет A220 оснащен полученными по инфузионной технологии крыльями, которые отверждают в автоклаве в компании Bombardier Aerostructures and Engineering Services (г. Белфаст, Северная Ирландия). Для изготовления крыльев для самолета A220 используют углеродное волокно Tenax фирмы Teijin (Япония), с которой компания Bombardier продлила до 2025 г. контракт на поставку углеродного волокна для производства крыльев [26].

Поскольку освоение производства крыльев для самолета MC-21 находится на начальной стадии, эксперты по аэрокосмическим композитам данные конструкции рассматривают в первую очередь в качестве примера для внедрения технологии инфузии при изготовлении самолетов следующего поколения. Компания АО «АэроКомпозит», производящая крылья для самолета MC-21, вместе с европейскими и американскими партнерами-поставщиками около 10 лет занималась разработкой материалов, оснастки, автоматизации и отработкой технологических процессов, используемых для изготовления конструкций, составляющих крыло. В результате получилась высокоинтегрированная конструкция (обшивка крыла, стрингеры, лонжероны), использование которой позволяет оптимизировать процесс сборки, устраняя необходимость в значительном количестве операций, требующихся для изготовления конструкций крыла, получаемых с помощью отвержденных в автоклаве препрегов. Тем не менее полный цикл производства деталей из ПКМ, начиная с укладки заготовок и до их доставки на сборку, в настоящее время занимает ~2 мес. На инфузию связующего и отверждение приходится ~20 ч.

Самый актуальный вопрос, возникающий при производстве крупногабаритных конструкций методом инфузии, заключается в том, насколько быстро их можно изготовить. Поэтому необходимо более подробно изучить данный процесс и оценить его жизнеспособность. При изготовлении крыльев для самолетов MC-21 и A220 используют инфузионную технологию относительно небольших деталей. Освоить данную технологию при изготовлении крупногабаритных конструкций для самолетов возможно, но это дорого и трудно достижимо.

Действительно, для внедрения процесса инфузии при изготовлении больших деталей не только должны быть приняты конструктивные решения, но и создано производство, которое позволит реализовать данную технологию. Рассмотрим, например, как происходит выбор между одно- или двухкомпонентной смолой. В большей части инфузионных процессов используют двухкомпонентную систему, которая сочетает эпоксидную смолу и отвердитель, смешиваемые непосредственно перед инфузией. Риск здесь двоякий: это касается и точности дозирования смолы/отвердителя, и экзотермического процесса, представляющего собой сложную задачу при учете большого объема смолы, который поступает в преформу при изготовлении конструкции крыла. Кроме того, смесь смолы и отвердителя в пресс-форме немедленно инициирует отверждение, что ограничивает продолжительность инфузии.

По этой причине предпочтительно использовать высокотемпературную отверждаемую однокомпонентную полимерную матрицу, которая исключает варибельность дозирования отвердителя и позволяет изготовителю подавать смолу при достаточно высокой температуре, чтобы минимизировать ее вязкость в процессе инфузии, но без начала отверждения. Появляется время, необходимое для пропитки волокон до начала процесса отверждения.

Компания АО «АэроКомпозит» при производстве крыльев для самолета МС-21 использует только однонаправленные ткани, выкладываемые на оснастку с помощью технологии AFP.

Альтернативой таким тканям является многослойная ткань, обеспечивающая удобную квазиизотропную структуру, однако отходов при данной технологии больше. При этом необходимо решить проблему, касающуюся физических свойств волокна и его проницаемости, а также вязкости смолы. Использование однонаправленных волокон и технологии AFP приводит к хорошей производительности при небольшом количестве отходов. Наличие сшивания в многослойных тканях уменьшает общий объем волокна, что может повлиять на конечные механические свойства структуры. Использование однонаправленных волокон – это лучший вариант получения требуемой объемной доли волокна в ПКМ в сочетании с высокой производительностью.

Тем не менее тонкослойные многослойные ткани становятся все более популярными при изготовлении больших конструкций, такие как двух- или четырехслойная ткань с поверхностной плотностью от 100 до 1200 г/см², где используются углеродные волокна от 12 до 50К. Производитель тканей – компания Vectorply Corp. (США) – много лет работает с компанией Boeing и Университетом штата Миссисипи над разработкой новых многослойных тканей, оптимизированных для крупносерийного производства самолетов [27].

В том случае, если технические проблемы, возникающие при использовании инфузии, будут решены, достоинства этой технологии очевидны – простота обработки материалов, отсутствие необходимости использования автоклава, интегрированные структуры, снижение стоимости отверждения, что вполне подходит для внедрения данного процесса при изготовлении будущего коммерческого самолета. Однако многое будет зависеть также от производителей оборудования.

Компания Airbus со своей стороны прилагает максимальные усилия по ускорению внедрения инфузионной технологии в производство самолетов следующего поколения, запустив программу «Крыло завтрашнего дня» [28]. Это научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа, проводимая на мощнейших заводах Airbus по производству крыльев в городах Филтон и Бристоль (Великобритания). Программа частично поддерживается Национальным композитным центром (Великобритания), Передовым исследовательским центром производства (Великобритания), а также коммерческими партнерами – компаниями Northrop Corp. Grumman (США), General Electric Aviation (Великобритания), Spirit AeroSystems (США) и концерном GKN (Великобритания).

Цель программы «Крыло завтрашнего дня» – разработка высокоскоростного процесса производства конструкций крыльев для коммерческих самолетов. Это означает максимальное внедрение автоматизации, использование малого количества деталей, освоение высокоскоростного производства, неразрушающего контроля и сборки крыльев.

В настоящее время компания Airbus интенсивно использует ПКМ для изготовления конструкций для самолета А350, чтобы выйти на уровень производства 10 самолетов в месяц. В том случае, если такие материалы будут использовать для

изготовления крыльев новой модификации самолета А320, вероятный темп производства которого будет составлять 100 самолетов в месяц, потребуются изготовление трех комплектов крыльев в день. Может ли процесс инфузии быть достаточно оптимизирован для достижения этой цели?

Партнеры программы «Крыло завтрашнего дня» работают с Национальным композитным центром в рамках поэтапной программы разработки технологии инфузии, применяемой при изготовлении лонжеронов крыла, стрингеров и обшивок. С этой целью центр разработает интегрированные структуры обшивок и лонжерона, причем инфузионная технология будет осуществляться с использованием промышленно производимых смол. Данная работа требует наличия значительных площадей и капитальных вложений. С этой целью Национальный композитный центр расширяет свои мощности для проекта «Крыло завтрашнего дня» и добавляет 10 новых единиц оборудования, включая машины для выкладки сухого волокна, пресс-формы и дозирующие системы.

Является ли это правильным технологическим выбором для компании Airbus? Перспективы на данный момент многообещающие.

Хотя компания Boeing не является противником применения инфузионной технологии, однако ограничивает серийное производство деталей из ПКМ, изготовленных с использованием метода инфузии, конструкциями массой не более 22 кг. Большая часть технологических разработок для таких деталей выполнена в компании Boeing Australia, где производят закрылки задней кромки крыла для самолета 787 с использованием многослойных тканей и применением инфузионной технологии.

В 2015 г. компания Boeing объявила, что выбрала летно-исследовательскую лабораторию Raspet Университета штата Миссисипи для размещения Исследовательского центра сшитых композиционных материалов, который, как следует из названия, ориентирован на использование сшитых, негофрированных тканей в процессе вакуумной инфузии.

В то же время для самолета Boeing 777X планируют изготавливать детали крыла по той же технологии с использованием волокнистого препрега автоклавного отверждения, из которого производят крылья для самолета 787. Однако для того чтобы компания Boeing освоила инфузионную безавтоклавную технологию, потребуются очень высокий уровень инвестиций в обучение персонала и капитальное оборудование. В настоящее время компания не может обеспечить такой уровень. В любом случае при изготовлении крыльев для самолета будут использованы детали, предварительно отвержденные в автоклаве.

Объединенная авиастроительная корпорация (ОАК, г. Москва, Россия), владеющая компанией «Иркут», создала совместное предприятие с компанией Commercial Aircraft Corp. of China Ltd (CRAIC, Китай). Компании совместно работают над разработкой широкофюзеляжного пассажирского самолета 929, аналогичного самолетам 787 и А350, который, по прогнозам, поступит в эксплуатацию в Российской Федерации и Китае в 2027 г. Этот самолет почти наверняка будет иметь крылья, изготавливаемые по инфузионной технологии.

Заключения

Рассмотрены перспективные методы заготовок преформ, которые позволят снизить трудоемкость и сократить время изготовления композитных конструкций крыльев.

Ожидается, что в течение следующих лет будут проведены глобальные исследования и разработки по выбору связующих и армирующих наполнителей, видов

предварительного формования деталей, автоматизации и освоению новых технологических методов выкладки заготовок деталей, ускорению процесса и сокращению продолжительности цикла, а также по снижению общей сложности вакуумной инфузии крупных деталей. В том случае, если технология инфузии будет иметь развитие, то уже к 2025–2030 гг. появится возможность увеличить масштабы ее применения для изготовления крыльев коммерческих самолетов следующего поколения.

Библиографический список

1. Путин отметил важность проведения МАКС-2021 в форматах онлайн и офлайн. URL: https://tass.ru/armiya-i-opk/11942899?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (дата обращения: 20.08.2021).
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. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
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: 19.08.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
7. Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности состава полимерной матрицы и схем армирования трансмиссионных валов из полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-85-96.
8. Кудрявцева А.Н., Ткачук А.И., Григорьева К.Н., Гуревич Я.М. Использование связующего марки ВСЭ-30, перерабатываемого по инфузионной технологии, для изготовления низко- и средненагруженных деталей конструкционного назначения // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.
9. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 4 (45). С. 54–59. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-54-59.
10. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
11. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // Труды ВИАМ. 2015. № 3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
12. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.08.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
13. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 3. С. 20–26.

14. Минаков В.Т., Постнов В.И., Хрульков А.В., Постнов А.В., Плетинь И.И. Особенности склеивания деталей из ПКМ с использованием полимерной оснастки // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. № 5. С. 24–29.
15. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследование и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 292–301.
16. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 1. С. 18–26.
17. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н. Перспективы использования полимерных композиционных материалов при изготовлении протезов (обзор) // Пластические массы. 2021. № 5–6. С. 40–43.
18. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Постнова М.В., Баранников А.А. Опыт применения вакуум-инфузионных технологий в производстве конструкций из ПКМ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4 (3). С. 344–350.
19. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Григорьева Л.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Роботизированная выкладка препрега как альтернатива технологиям ATL и AFP (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-87-98.
20. Large, high-volume, infused composite structures on the aerospace horizon // Composites world: офиц. сайт. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/large-high-volume-infused-composite-structures-on-the-aerospace-horizon> (дата обращения: 18.08.2021).
21. Rajan S., Sutton M.A., Wehbe R. et al. Experimental investigation of prepreg slit tape wrinkling during automated fiber placement process using StereoDIC // Composites. Part B: Engineering. 2019. Vol. 160. P. 546–557.
22. Boeng 787-8 // AirlinesInfo: офиц. сайт. URL: <https://www.airlines-inform.ru/commercial-aircraft/boeing-787.html> (дата обращения: 20.08.2021).
23. Yavuz H. Materials Selection for Aircraft Skin Panels by Integrating Multiple Constraints Design with Computational Evaluations // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 21. P. 112–119.
24. Thermoplastic composites: Poised to step forward // Composites world: офиц. сайт. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-poised-to-step-forward> (дата обращения: 20.08.2021).
25. Baker A., Dutton S., Kelly D. Composite materials for aircraft structures. 2nd ed. AIAA, 2004. 602 p.
26. Chahroudi D. Low cost manufacture of laminar wings // Technical Soaring. 1997. Vol. 21. No. 2. P. 55–61.
27. The spread of spread tow // Composites world: офиц. сайт. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/the-spread-of-spread-tow> (дата обращения: 20.08.2021).
28. Update: Lower wing skin, Wing of Tomorrow // Composites world: офиц. сайт. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/update-lower-wing-skin-wing-of-tomorrow> (дата обращения: 20.08.2021).