

УДК 678.8

А.И. Сидорина¹**МУЛЬТИАКСИАЛЬНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ТКАНИ
В ИЗДЕЛИЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116

Рассмотрены основные достоинства и недостатки применения мультиаксиальных тканей в качестве армирующих наполнителей для композиционных материалов с полимерной матрицей, указаны наиболее распространенные технологии переработки мультиаксиальных тканей в композиционный материал. Приведены сведения о применении углеродных мультиаксиальных тканей при изготовлении конструкций для изделий авиационной техники на примере производства заднего гермопангоута самолета Airbus A380 и верхней двери грузового отсека самолета Airbus A400M. Даны краткие характеристики ведущих мировых производителей углеродных мультиаксиальных тканей для изделий авиационной техники.

Ключевые слова: углеродные ткани, мультиаксиальные ткани, углеродные волокна, армирующие наполнители, полимерный композиционный материал, полимерные матрицы, углепластик.

А.И. Сидорина¹**MULTIAXIAL CARBON FABRICS
IN THE PRODUCTS OF AVIATION TECHNOLOGY (review)**

The article considers the main advantages and disadvantages of application of multiaxial fabrics as reinforcing fillers for composite materials with a polymer matrix, and specifies the most common processing technologies of multiaxial fabrics into a composite material. The paper provides the information about the use of carbon multiaxial fabrics in the manufacture of structures for aircraft products by the example of the production of the Airbus A380 rear bulkhead and of the Airbus A400M upper cargo door. Brief characteristics of the world's leading manufacturers of carbon fiber multiaxial fabrics for aircraft products are given.

Keywords: carbon fabrics, multiaxial fabrics, carbon fibers, reinforcing fillers, polymer composite material, polymer matrices, carbon plastic.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Композиционные материалы с полимерной матрицей для изделий авиационной техники широко применяются благодаря особым свойствам – низкой плотности, высокой прочности и жесткости [1]. Рост доли композиционных материалов на основе углеродных волокнистых наполнителей и эпоксидных матриц в конструкциях летательных аппаратов наблюдается с 1970-х гг. В большинстве случаев разработка новых материалов была инициирована с целью удовлетворения потребностей производителей военной и специальной техники. В дальнейшем разработанные материалы нашли применение в изделиях гражданской авиации. Так, если в конструкции самолета Airbus A340 (1991 г.) доля композиционных материалов составляла ~17 %, то для A380 (2003 г.) (рис. 1) она возросла до 25 %, а для A350 XWB (2013 г.), в котором фюзеляж и крыло изготавливают преимущественно из углепластиков, –

до 52 %. Для Boeing 787 (2009 г.) доля композиционных материалов в конструкции составляла 50 % против 9 % для модели Boeing 777 (1994 г.).



Рис. 1. Элементы конструкции самолета Airbus A380, выполненные из композиционных материалов [2]

В настоящее время большинство углепластиков, применяемых для производства авиационной техники, имеют термореактивные матрицы и перерабатываются преимущественно по препреговой технологии [3]. Однако высокие производственные затраты и низкая устойчивость к повреждениям из-за расслоения – две основные технические причины, которые ограничивают использование композиционных материалов, получаемых по препреговой технологии из традиционных тканей и жгутовых наполнителей [4].

В редких случаях получение углепластиков для конструкций авиационной техники производится по технологиям вакуумной инфузии (Vacuum-assisted Resin Transfer Molding – VaRTM), пропитки под давлением (Resin Transfer Molding – RTM) или пленочным связующим (Resin film infusion – RFI) [5]. В качестве армирующих наполнителей для таких углепластиков применяются мультиаксиальные ткани.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6].

Виды, свойства и особенности получения мультиаксиальных тканей

Мультиаксиальная ткань представляет собой текстильный нетканый материал, состоящий чаще всего из двух или более параллельных армирующих слоев однонаправленных непрерывных нитей или ровингов, ориентированных не менее чем в двух направлениях под различными углами, скрепленных при помощи системы прошивки или без нее. Применение прошивных нитей позволяет избежать перекосов волокон. В качестве прошивного материала в основном применяются недорогие полиэфирные нити. Прошивка может осуществляться стежками различных видов.

Стандартная ориентация слоев в мультиаксиальных тканях – в направлениях 0° , $+45^\circ$, 90° , -45° (рис. 2). На большинстве типов оборудования технологически возможно изготовить ткани с направлением армирующих слоев в пределах от $+30^\circ$ до -30° . Наиболее широко распространено производство биаксиальных тканей с ориентацией слоев 0° и 90° (рис. 3, а) или $\pm 45^\circ$ (рис. 3, б), триаксиальных тканей (0° и $\pm 45^\circ$ или 90° и $\pm 45^\circ$) (рис. 4) и квадроаксиальных (квазиизотропных) тканей с ориентацией слоев в направлениях 0° , $\pm 45^\circ$ и 90° (рис. 5). За последнее десятилетие стало доступным производство однослойных прошивных тканей с ориентацией в направлении 0° или 90° .

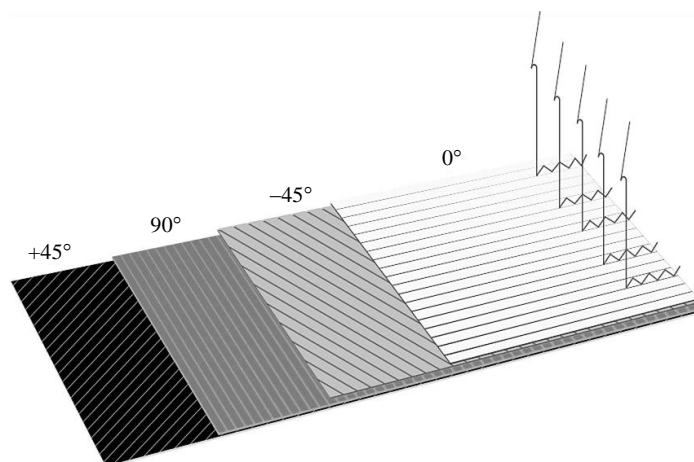


Рис. 2. Стандартное расположение слоев в мультиаксиальных тканях [7]

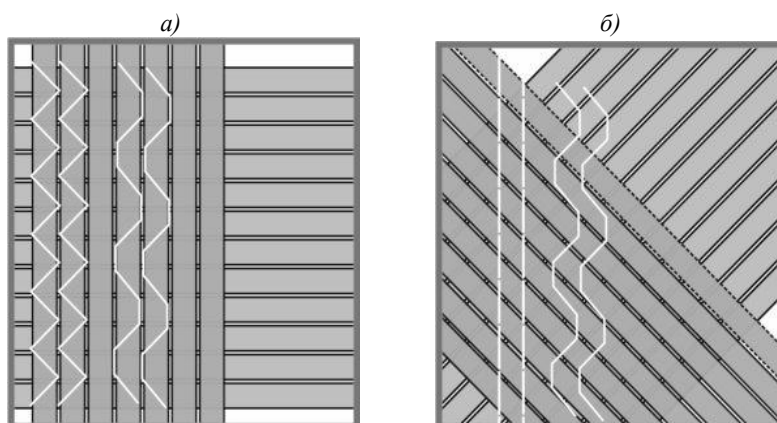


Рис. 3. Ориентация слоев в биаксиальных тканях: 0° и 90° (а) и $\pm 45^\circ$ (б) [8]

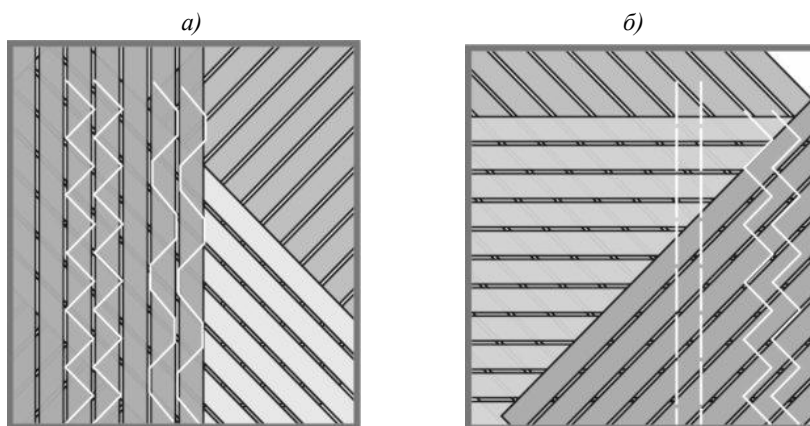


Рис. 4. Ориентация слоев в триаксиальных тканях: 0° и $\pm 45^\circ$ (а), 90° и $\pm 45^\circ$ (б) [8]

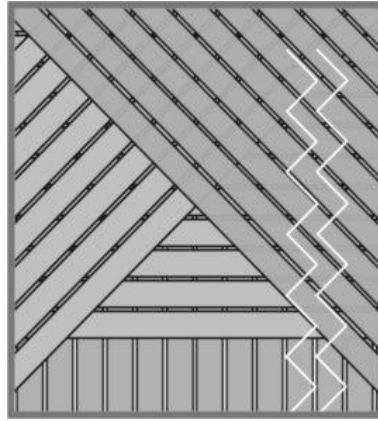


Рис. 5. Ориентация слоев в квадриаксиальных тканях: 0° , $\pm 45^\circ$ и 90° [8]

Технология изготовления мультиаксиальных тканей является более гибкой, чем традиционное ткачество, и позволяет производить ткани, варьируя тип и сочетание волокон, расстояние между волокнами, направление волокон в слое, число и поверхностную плотность слоев, тип скрепления слоев. Таким образом, могут быть получены ткани из слоев с совершенно различными характеристиками. Это предполагает возможность большого количества решений по изготовлению армирующего наполнителя со свойствами, соответствующими требованиям, предъявляемым к готовому изделию.

Основным преимуществом мультиаксиальных тканей является то, что в процессе их получения углеродная нить не подвергается перегибу. Эта технологическая особенность позволяет избежать разрушения отдельных монофиламентов и полностью реализовать упругопрочностные характеристики волокна в композиционном материале – мультиаксиальные ткани обладают высокими механическими свойствами в заданных направлениях. Кроме того, при использовании мультиаксиальной ткани в качестве армирующего наполнителя минимизируется риск расслаивания композиционного материала.

Мультиаксиальные ткани как армирующие наполнители для композиционных материалов

Мультиаксиальные ткани применяются для переработки в композиционные материалы методами вакуумной инфузии, намотки, RTM, пултрузии, по препреговой технологии и т. д. При пропитке таких тканей возможно сократить расход связующего до 30 % за счет повышенной пропитываемости: более плотная укладка волокон и отсутствие перегибов создают меньшее сопротивление при пропитке по сравнению с традиционными тканями [9]. Некоторые производители применяют цветные прошивные нити при изготовлении мультиаксиальных тканей для обозначения определенных областей в материале.

Основными параметрами, влияющими на технологичность переработки мультиаксиальных тканей, являются последовательность укладки слоев, поверхностная плотность ткани, тип волокон, натяжение волокон и схема прошивки.

По сравнению с традиционными тканями композиционные материалы на основе мультиаксиальных тканей с одинаковой поверхностной плотностью часто имеют более высокие механические характеристики (прочность при растяжении, изгибе и сжатии) – на уровне материалов из однонаправленных жгутовых препрегов, а также более высокую устойчивость к переменным нагрузкам.

Мультиаксиальные и прошивные однонаправленные ткани с высокой поверхностной плотностью подходят для применения при изготовлении деталей большой толщины. Кроме того, мультиаксиальные ткани обладают хорошей драпируемостью и

подходят для изготовления деталей сложной кривизны. В зависимости от типа и длины прошивных стежков ткани будут обладать различной степенью драпируемости.

К недостаткам мультиаксиальных тканей можно отнести наличие полиэфирных нитей в материале, которые могут оказывать влияние на прочность композиционного материала, сложность технологии изготовления и низкую скорость процесса производства тканей, а также высокую стоимость оборудования, что приводит к более высокой стоимости ткани по сравнению с традиционной. В случае применения мультиаксиальных гибридных тканей необходима тщательная отработка технологии пропитки.

Известно, что композиционные материалы, полученные по инфузионным технологиям [10], имеют меньшую устойчивость к ударным и переменным нагрузкам по сравнению с композиционными материалами, полученными по препреговой технологии, по причине более высокого содержания связующего и его технологических свойств (низкой вязкости, продолжительного времени гелеобразования и т. д.), что приводит к увеличению площади повреждений [9].

Существует несколько подходов к решению данной проблемы. Например, использование в качестве армирующего наполнителя традиционных тканей (или плетеных 2D-форм) повышает устойчивость к ударным воздействиям по сравнению с композиционными материалами на основе жгутовых наполнителей или мультиаксиальных тканей, предотвращает рост трещин и сокращает площадь повреждений. Вторым значимым способом повышения устойчивости к ударным воздействиям композиционных материалов на основе инфузионных связующих является модифицирование низковязкой полимерной матрицы материалами из термопластов (например, полиамида или полисульфона) в виде порошков, нетканых материалов или введение тонких жгутов из термопластов в текстильную преформу [9].

Для улучшения характеристик композиционных материалов на основе инфузионных связующих и мультиаксиальных тканей могут быть применены биндеры [11]. Введение биндера возможно между слоями ткани или путем предварительного нанесения на волокно. Применение биндера повышает стабильность текстильной заготовки, однако препятствует смещению слоев в процессе драпировки ткани.

Несмотря на недостатки инфузионных связующих, основными технологиями, по которым перерабатываются мультиаксиальные ткани для изделий авиационной техники, остаются инфузионные. Следовательно, к подобным композиционным материалам предъявляются дополнительные специфические требования – возможность изготовления конструкций большой кривизны и быстрый набор толщины детали при послойной выкладке.

Особенностью инфузионной технологии переработки мультиаксиальных тканей является возможность придания нужной формы армирующему наполнителю в «сухом» виде без появления складок и заломов, которые могли бы повлиять на механические свойства композиционных материалов. Однако во время драпировки мультиаксиальных тканей может происходить смещение слоев таким образом, что в результате могут измениться их ориентация и поверхностная плотность. Подобные изменения следует учитывать на этапе проектирования конструкции [9].

Применение углеродных мультиаксиальных тканей для изделий авиационной техники

В авиации мультиаксиальные ткани применяются для изготовления корпусов самолетов и вертолетов, несущих и рулевых винтов вертолетов, крыльев, обтекателей и пассажирских сидений [4].

Удачными примерами применения мультиаксиальных тканей в авиации являются конструкции заднего гермошпангоута самолета Airbus A380 (рис. 6) и двери грузового отсека самолета A400M (рис. 7).



Рис. 6. Размещение преформы из мультиаксиальной углеродной ткани на оснастке при изготовлении заднего гермошпангоута самолета A380 [9]

Впервые задний гермошпангоут из композиционного материала с полимерной матрицей был изготовлен для самолета Airbus A340-500/600. В конструкции самолета A340 применены препрег на основе традиционной ткани и ручная выкладка, в конструкции следующего поколения самолетов – мультиаксиальные ткани из углеродного волокна, а уже для самолета A380 изготовлена одна из самых крупных деталей на основе мультиаксиальной ткани в изделиях авиационной техники – задний гермошпангоут, который представляет собой несущую конструкцию в виде куполообразной перегородки с ребрами жесткости.

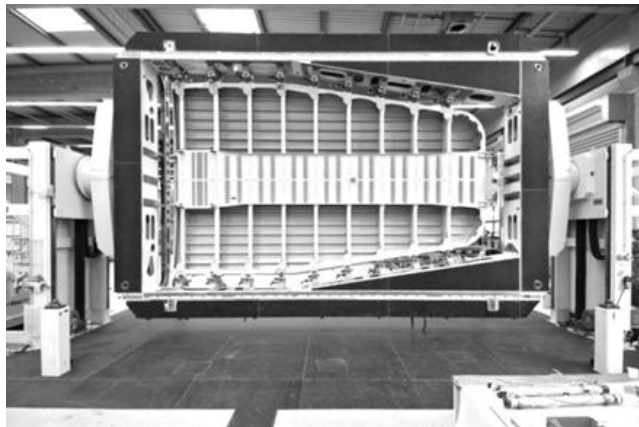


Рис. 7. Производство задней двери грузового отсека самолета Airbus A400M [9]

Преформу для этой детали изготавливают на основе мультиаксиальных прошивных тканей с ориентацией слоев 0° (верхний слой) и 90° (нижний слой) из высокомодульных углеродных волокон номиналом 6K и 12K фирмы Teijin Carbon America, Inc. Ткани производит подразделение немецкой компании Saertex USA LLC. Технология изготовления гермошпангоута разработана кооперацией Airbus, European Aeronautic Defense and Space Co (EADS) Innovation Works (в настоящее время Airbus Group), Saertex GmbH и KSL Keilmann GmbH [12]. Ткань изготавливается на оборудовании марки

Liba (в настоящее время – Karl Mayer) [13]. Шесть полотен ткани шириной 1270 мм сшиваются на портальной швейной машине слепой строчкой, с перекрытием 25 мм, образуя единое полотнище шириной 7 м и длиной 7,4 м. Пропитка преформы осуществляется по технологии RFI с применением пленки связующего СУСОМ 977-2. Шесть полотнищ ткани помещаются на пленку связующего, размещенную на стальной формообразующей оснастке. На преформу помещаются слои углепрепрега для усиления отдельных участков конструкции, после чего осуществляется первый этап отверждения. К отвержденной в автоклаве конструкции толщиной 3 мм присоединяются стрингеры в количестве 15 шт., помещаются два слоя стеклопрепрега по периметру детали, после чего осуществляется окончательное формование в автоклаве. Готовая перегородка размером 6,2×5,5 м имеет массу ~240 кг [9, 14].

Задняя верхняя грузовая дверь военно-транспортной модификации самолета Airbus A400M имеет размеры 7 м в длину и 4 м в ширину и изготавливается на основе углеродной мультиаксиальной ткани с дополнительным усилением однонаправленной тканью Hexcel [15]. Конструкцию изготавливают по безавтоклавной технологии [16] – по технологии вакуумной инфузии VAP (Vacuum Assisted Process), разработанной фирмами EADS Military Air Systems (Airbus Group) и Premium Aerotec [17], с последующим отверждением в печи. Преформу из нескольких полотен мультиаксиальной ткани производства компании Saertex с ориентацией слоев $0^\circ/90^\circ$ и $\pm 45^\circ$ выкладывают на композиционную оснастку, на нее помещают подготовленные интегральные стрингеры в количестве 16 шт. Стрингеры также изготавливают из комбинации мультиаксиальной ткани Saertex и однонаправленной ткани Hexcel. Для того чтобы стрингеры сохраняли форму при выкладке, часть тканей дублируют полиамидной вуалью, которая позволяет удерживать форму стрингеров при нагревании во время сборки. Пропитку преформы осуществляют связующим РТМ-6 Hexcel, после чего следуют вакуумирование и отверждение в печи. В результате применения данной технологии достигается экономия порядка 3000 крепежных элементов, которые потребовались бы для крепления стрингеров к внешней обшивке, что значительно сказывается на трудозатратах, времени выполнения и стоимости работ, а также на увеличении весовых характеристик изделия [9, 18].

По технологии VAP на основе углеродных мультиаксиальных тканей и эпоксидных связующих фирма Premium Aerotec производит также некоторые другие детали для изделий авиационной техники.

Мировые производители мультиаксиальных тканей для изделий авиационной техники

Разработкой и производством мультиаксиальных тканей занимаются многие ведущие компании, специализирующиеся на армирующих наполнителях для композиционных материалов, такие как A&P Technology (США) [19], Hexcel Corporation (США) (линейка мультиаксиальных тканей HiMax™) [20], Zoltek (США) [21], SGL Carbon (Германия) [22], PGTEX (Китай) [7].

Selcom SRL Multiaxial Technology (Италия) [8] – ведущая компания, специализирующаяся на производстве мультиаксиальных тканей из углеродных, арамидных, стеклянных, базальтовых и других волокон для применения в композиционных материалах. Имея 30-летний опыт изготовления традиционного текстиля, с 1992 г. компания переориентировалась на производство высококачественных технических стеклотканей для промышленного применения. На мощностях компании была запущена первая в Италии промышленная линия для производства мультиаксиальных тканей. К 2012 г. производство расширилось до 9 линий с мощностью 2500 т – по стеклоткани и 50 т – по углеродной ткани. К 2017–2018 гг. компания вышла на мощность 3800 т – по стеклотканям, 300 т – по углетканям и 100 т – по тканям на основе других волокон. В настоящее время производство осуществляется на 14 линиях.

Ткани компании Selcom применяются в качестве наполнителей для композиционных материалов в автомобилестроении, строительстве, ветроэнергетике, производстве спортивного инвентаря, средств индивидуальной защиты, судостроении и т. д. Ткани производятся с поверхностной плотностью от 50 до 1200 г/м² (для углеродных тканей) и от 200 до 3000 г/м² (для стеклотканей) и шириной от 1270 до 2540 мм или могут быть порезаны на ленты.

В ассортименте компании имеются углеродные мультиаксиальные ткани, предназначенные для применения в аэрокосмической промышленности, которые могут быть изготовлены из волокон с различным аппретом (ненасыщенный полиэфирный, винилэфирный, эпоксидный, полиуретановый, полипропиленовый) и с различной поверхностной плотностью: от 50 до 1200 г/м² – для биаксиальных тканей, от 225 до 900 г/м² – для триаксиальных тканей и от 300 до 800 г/м² – для quadroаксиальных тканей.

Мультиаксиальные ткани компании Selcom могут быть выпущены с дополнительной обработкой:

- комбинированы слоями нетканого материала (10–100 г/м²) или матом из штапельного волокна (50–450 г/м²);
- порошковым покрытием из различных материалов;
- эпоксидным клейким покрытием.

Группа компаний *Saertex* (Германия), основанная в 1982 г., начала свое развитие с производства технического текстиля – прошивных мультиаксиальных тканей для применения в качестве армирующих наполнителей. С 1990 г. компания производит ткани на основе углеродных волокон. В настоящее время в состав компании *Saertex Group* входят 14 производственных предприятий, расположенных в 9 странах: ЮАР, США, Франция, Индия, Германия, Португалия, Китай, Бразилия и Турция. Материалы, производимые на предприятиях компании *Saertex*, широко применяются при конструировании ветрогенераторов, в судостроительной, авиакосмической промышленности и автомобилестроении. Компания предлагает ткани под марками SAERTEX и SAERTOW.

В ассортименте компании *Saertex* представлено более 3000 вариантов прошивных мультиаксиальных тканей SAERTEX, получаемых на основе различных стеклянных, углеродных и арамидных волокон, в широком диапазоне поверхностных плотностей (до 4000 г/м²), с различными углами ориентации (от –22,5° до +22,5°) и максимальной шириной 3810 мм. Стандартные однонаправленные ткани SAERTEX имеют ориентацию слоя 0° или 90°, биаксиальные 0°/90° или ±45°, триаксиальные 0°/±45° или 90°/±45°, quadroаксиальные 0°/±45°/90°. Армирующие наполнители SAERTEX совместимы со многими типами связующих – эпоксидными, полиэфирными, винилэфирными, полиуретановыми, полипропиленовыми, полиамидными и др. Для изготовления тканей применяется углеродное волокно *Panex 35* фирмы *Zoltek*.

Из мультиаксиальных тканей компании *Saertex* изготавливают такие конструктивные элементы летательных аппаратов, как стрингеры, обтекатели, перегородки, элементы конструкции крыла. В 2020 г. компания *Saertex* подписала 10-летний контракт с компанией *Safran Nacelles* [23], согласно которому компания *Saertex* будет поставлять мультиаксиальные ткани из углеродного волокна для изготовления на их основе по инфузионной технологии мотогондолы двигателей для различных самолетов.

Компания *Chomarlat* (Франция) [24], основанная в 1898 г., в настоящее время осуществляет свою деятельность на четырех производственных площадках во Франции, Тунисе, США и Китае.

В ассортименте компании представлено большое количество традиционных тканей, плетеных преформ, эстетических тканей, выполненных на основе углеродных волокон ведущих мировых производителей. В линейке тканей C-Ply™ представлены мультиаксиальные ткани из углеродных волокон с поверхностной плотностью от 50 до 600 г/м². Ткани изготавливают из волокон номиналом 12К, 24К, 48К и 50К, высокопрочных, среднемодульных и высококомодульных – например, марок Toray T700S 12К, T700SC 12К, T700SC 24К, Zoltek Panex 35 50К и Mitsubishi TRW40 50К. Ткани компании Chomarat применяются для основных и второстепенных конструкций летательных аппаратов, а также для деталей интерьера самолетов. Мультиаксиальные ткани востребованы для изготовления деталей сложной кривизны.

На мультиаксиальные ткани компании Chomarat при необходимости возможно нанесение эпоксидного порошкового покрытия с плотностью от 5 до 30 г/м² (с одной или двух сторон) и покрытий из вуалей (полиэфир, стекло и т. д.).

Компания VX Aerospace [25] применяет мультиаксиальные ткани производства компании Chomarat North America для дрона VX-1 KittyHawk в конструкции крыла, горизонтальных стабилизаторов, вертикального киля и рулевых поверхностей [26].

Компания Sigmatech (Великобритания) [27], основанная в 1986 г., до настоящего времени занимается разработкой и производством армирующих наполнителей для композиционных материалов из углеродных волокон, в том числе стандартных 2D-тканей, 3D-форм, текстильных форм из плетеных жгутов, однонаправленных и мультиаксиальных тканей.

Мультиаксиальные ткани из высокопрочных и среднемодульных волокон производятся компанией Sigmatech в широком ассортименте с поверхностной плотностью слоев от 50 г/м² и поверхностной плотностью тканей от 100 до 2000 г/м². Возможно изготовление тканей из 9 слоев с различной ориентацией. Максимальная ширина тканей 2540 мм.

Один из мировых лидеров в производстве углеродного волокна – компания Teijin Ltd (Япония) начала свою деятельность в 1934 г. с производства синтетических волокон. Исследованиями в области углеродных волокон занимается с 1969 г., а выпуском таких волокон – с 1972 г. С 1975 г. компания выпускала углеродное волокно под маркой Besfight®, которое в 2006 г. переименовано в Tenax®. Углеродное волокно Tenax применяется для производства изделий в авиационно-космической отрасли с 1987 г. В настоящее время углеволокнистая продукция компании производится на заводах в Японии, Германии и США.

Одним из основных направлений деятельности компании Tenax является производство армирующих наполнителей для композиционных материалов (Dry Reinforcements Tenax®) [28], применяемых в авиакосмической отрасли, в виде различных текстильных форм, которые позволяют достичь высоких механических свойств в композиционных материалах, при этом возможно изготовление изделий сложной кривизны. Данная линейка наполнителей включает стандартные (Tenax® Dry Reinforcements Woven Fabrics – DRWF) и мультиаксиальные ткани (Tenax® Dry Reinforcements Non-Crimp Fabrics – DRNF). Мультиаксиальные ткани изготавливают, в частности, из углеродных волокон марок Tenax®-E HTS45 E23 12К и Tenax®-E IMS65 E23 24К. Возможно изготовление таких тканей с количеством слоев до 7 с поверхностной плотностью слоя от 80 г/м². Максимальная ширина тканей 2540 мм. Кроме того, ткани могут быть порезаны на полотна.

Мультиаксиальные ткани Tenax DRNF применены в конструкции интерцептора крыла самолета Airbus A320neo (рис. 8), изготовленного по технологии RTM. Ткани специально разработаны для процессов инфузии и RTM и в конструкции интерцептора крыла используются в качестве заполнителей полостей.



Рис. 8. Интерцептор крыла самолета Airbus A320neo [29]

Дальнейшее расширение применения композиционных материалов на основе углеродных тканей для изделий авиационной техники возможно интенсифицировать при условии снижения стоимости материалов и технологий их переработки по сравнению с существующими препреговыми технологиями пропитки и автоклавного формования [30]. Мультиаксиальные ткани могут получить преимущества с увеличением их доли в конструкциях изделий авиационной техники в случае применения высокоавтоматизированных производственных линий (для резки, выкладки и т. д.), а также при решении проблемы устойчивости к повреждениям композиционных материалов на основе инфузионных связующих – например, путем модификации мультиаксиальных тканей термопластами в виде порошков, нетканых материалов, жгутов и т. п. При этом необходимо учитывать следующие факторы:

- снижение подвижности слоев относительно друг друга в мультиаксиальных тканях при введении частиц термопласта;
- возможность вымывания/растворения частиц термопласта в процессе инфузии;
- возможное поглощение влаги гидрофильными частицами термопласта, что приведет к снижению эксплуатационных характеристик композиционных материалов при высоких температурах и влажности.

Заключения

Анализ ассортимента и областей применения мультиаксиальных тканей, выпускаемых ведущими мировыми производителями, показал, что в настоящее время аэрокосмическая область не является основной областью применения мультиаксиальных тканей из углеродных волокон. Однако в некоторых конструкциях изделий авиационной техники, таких как задний гермошпангоут самолета Airbus A380 и дверь грузового отсека самолета Airbus A400M, подобные ткани находят применение.

Мультиаксиальные ткани для изделий авиационной техники перерабатываются в углепластики преимущественно по технологиям вакуумной инфузии, что требует тщательного проектирования и точного расчета материала и конструкции, а также отработки технологии пропитки и отверждения с целью нивелировать недостатки композиционных материалов на основе инфузионных связующих и в максимальной степени реализовать механические свойства углеродных волокон в конструкции.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.

2. Ferreira L.M. Study of the behaviour of non-crimp fabric laminates by 3D finite element models: PhD Dissertation. Sevilla: Universidad De Sevilla, 2012. URL: https://www.researchgate.net/figure/The-AIRBUS-A380-aircraft-composite-applications-wwwairbuscom_fig1_303144941 (дата обращения: 25.02.2021).
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
4. Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials / ed. С. Meola, S. Voccardi, G.M. Carlomagno. Woodhead Publishing Ltd., 2015. 180 p.
5. Григорьев М.М., Коган Д.И., Твердая О.Н., Панина Н.Н. Особенности изготовления ПКМ методом RFI // Труды ВИАМ. 2013. № 4. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2021).
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
7. Composite Reinforcement Fabric // PGTEX. URL: <http://pgtex.cn/20170324.pdf> (дата обращения: 29.07.2020).
8. Multiaxial – Non Crimp Fabrics (NCFs) for Aerospace // Selcom. Multiaxial Technology. URL: <https://www.multiaxialfabrics.com/sectors-aerospace-applications/?lang=en> (дата обращения: 12.02.2021).
9. Non-Crimp Fabric Composites: Manufacturing, Properties and Applications / ed. S.V. Lomov. Woodhead Publishing Ltd., 2011. 544 p.
10. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Коротков И.А. Некоторые особенности жидкостного формования полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 2 (50). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-8-8.
11. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Терехов И.В., Донецкий К.И. Термореактивные связующие и полимерные биндеры для полимерных композиционных материалов, получаемых методом вакуумной инфузии (обзор) // Пластические массы. 2018. № 1–2. С. 57–64.
12. Pressure bulkhead for the Airbus A380 // KSL. URL: <http://www.ksl-lorsch.de/en/projects/pressure-bulkhead-for-the-airbus-a380> (дата обращения: 12.02.2021).
13. Composite machines for multiaxial textiles // KARL MAYER. URL: <https://www.karlmayer.com/en/products/technical-textiles/composite-machines/composite-machines-for-producing-multiaxial-structures> (дата обращения: 12.02.2021).
14. Black S. An Elegant Solution For A Big Composite Part // Composites World. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/an-elegant-solution-for-a-big-composite-part> (дата обращения: 12.02.2021).
15. Unidirectional Fabrics // HEXCEL. URL: <https://www.hexcel.com/Products/Fabrics-Reinforcements/Unidirectional-Fabrics> (дата обращения: 12.02.2021).
16. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
17. Premium AEROTEC supplies around 70 percent of all A400M fuselage structures // Premium AEROTEC. URL: <https://www.premium-aerotec.com/en/media/press-releases/premium-aerotec-supplies-around-70-percent-of-all-a400m-fuselage-structures/> (дата обращения: 12.02.2021).
18. Black S. A400M cargo door: Out of the autoclave // Composites World. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/inside-manufacturing-a400m-cargo-door-out-of-the-autoclave> (дата обращения: 11.03.2021)
19. QISO® Braided Triaxial Fabric // A&P Technology. URL: <https://www.braider.com/Products/QISO-Braided-Triaxial-Fabric.aspx> (дата обращения: 25.02.2021).
20. HiMax™ Carbon Multiaxials // HEXCEL. URL: <https://www.hexcel.com/Products/Fabrics-Reinforcements/HiMax-Carbon-Multiaxials> (дата обращения: 12.02.2021).

21. ZOLTEK PX35 Multi-Directional Fabric. 2018. 16 p. URL: https://zoltek.com/wp-content/uploads/2018/02/2018_PX35-Brochure_FINAL.pdf (дата обращения: 12.02.2021).
22. SIGRATEx® non-crimp textiles // The Drapables: our textile materials made from carbon, glass and aramide fibers. Meitingen: SGL Technologies GmbH, 2020. P. 8–11. URL: <https://www.sglcarbon.com/pdf/SGL-Brochure-The-Drapables-EN.pdf> (дата обращения: 12.02.2021).
23. Acoustics & composites // Safran Nacelles. URL: <https://www.safran-nacelles.com/innovation-0#2-1> (дата обращения: 25.02.2021).
24. C-PLY™ // Chomarar. URL: <https://composites.chomarar.com/en/brand/c-ply/> (дата обращения: 25.02.2021).
25. Kitty Hawk – Our Blended Wing Aircraft // VX Aerospace. URL: <https://www.vxaerospace.com/vxaerospaceproducts> (дата обращения: 25.02.2021).
26. Gardiner G. VX Aerospace: Small company, big performance // Composite World. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/vx-aerospace-small-company-big-performance-> (дата обращения: 18.02.2021).
27. Multiaxial Fabrics // Sigmater. Material Innovation. URL: <https://www.sigmater.com/multiaxial-fabrics> (дата обращения: 18.02.2021).
28. Сухие наполнители Tenax® Dry Reinforcements // TEIJIN LIMITED. URL: <https://www.tejincarbon.com/ru/produkcija/kompozity-tenaxr/tenaxr-dry-reinforcements> (дата обращения: 18.02.2021).
29. Tenax® Non-Crimp Fabrics and Tenax® Braided Fibers qualified for Airbus A320neo Spoilers // TEIJIN LIMITED. URL: https://www.teijin.com/news/2020/07/21/20200721_01.pdf (дата обращения: 14.10.2020).
30. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.