

УДК 678.747.2

В.С. Кири¹, А.Е. Сорокин¹, А.С. Бойчук¹

УГЛЕПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-22-31

Представлена разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных тканей саржевого плетения и полиэфирэфиркетон. Опробованы пленочная и препреговая технологии получения термопластичных ПКМ на основе полиэфирэфиркетон зарубежного производства. Сформулированы требования к свойствам полиэфирэфиркетон для получения углепластика. Для оценки потенциала листовых углепластиков как конструкционных материалов проведены исследования дефектности их структуры и определены прочностные характеристики образцов из дефектных и бездефектных зон.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон, термопластичные углепластики, полимерный композиционный материал, прессование углепластиков.

V.S. Kirin¹, A.E. Sorokin¹, A.S. Boychuk¹

CARBON FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC ON THE BASIS OF POLYETHERETHERKETONES

The article is devoted to the development of polymer composite materials (PCMs) based on carbon fabrics of sarge weaving and polyester ether ketones. Film and prepreg technologies for production of thermoplastic PCMs based on polyether ether ketones of foreign manufacture have been tested. Requirements for fluidity of polyether ether ketones for obtaining carbon plastic are formulated. In order to assess the potential of obtained sheet carbon plastics as structural materials, studies were carried out on the defect of their structure and determination of strength characteristics of samples from normal and defective areas.

Keywords: polyetheretherketone, carbon fiber reinforced thermoplastic, polymer composite material, pressing carbon plastics.

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

При производстве перспективных летательных аппаратов и ряда других видов техники особое значение приобретает «борьба» за снижение массогабаритных характеристик деталей без снижения их прочности [1–7]. В конце прошлого века эту проблему решали путем широкого применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), преимущественно на основе термореактивных смол и угле- или стекловолокон [8, 9]. Относительно традиционных металлических сплавов данные материалы позволяют снизить массу детали за счет существенно меньшей плотности ПКМ, по сравнению с алюминием. Хотя толщина детали из углепластика зачастую больше, чем у металлического аналога, ее масса в целом оказывалась меньше за счет разницы плотностей металла и ПКМ. В то же время дальнейшее развитие технологий летательных аппаратов поставило перед разработчиками материалов новые задачи, сформулированные уже на основе анализа недостатков ПКМ на термореактивной матрице [10–15].

Так, традиционные технологии изготовления термореактивных ПКМ предполагают использование значительного количества органических растворителей, утилизация которых связана с нагрузкой на окружающую среду. Данный аспект в настоящее время представляет серьезную проблему для производителей – как техническую и финансовую, так и имиджевую (особенно при работе на европейском и североамериканском рынках). Полуфабрикаты для изготовления термореактивных стекло- и углепластиков (препрегов) имеют весьма ограниченный срок хранения, лимитируемый временем жизнеспособности связующего, а химическая структура связующего и его физико-механические свойства во многом определяются условиями формования углепластика. Ремонт и утилизация ПКМ на основе реактопластов крайне затруднены. Утилизация возможна только при их использовании в качестве наполнителей для неотчетственных материалов, что создает объективные трудности, а также резко снижает их «популярность» из-за общественного запроса на «экологичные» материалы. Ремонт деталей из таких материалов осуществляется фактически по тем же технологиям, что и ремонт металлических деталей [16–21].

Решить большую часть этих проблем возможно применяя ПКМ на основе термопластичных термостойких матриц, таких как полиэфиримид, полисульфон или полиэфирэфиркетон. Такие материалы традиционно представляют собой несколько слоев тканого наполнителя, пропитанного расплавом термопластичного полимера и спрессованного в плоскую плиту. В настоящее время приобретают популярность также и новые методы создания термопластичных ПКМ – автоматическая выкладка пропитанного термопластом жгута и 3D-печать наполненным термопластичным филаментом.

Термопластичные ПКМ имеют практически неограниченный срок хранения препрегов, при их производстве не нужны растворители, они демонстрируют высокую стойкость к ударным воздействиям, структура матрицы незначительно зависит от условий формования, а их ремонт и вторичная переработка могут быть осуществлены гораздо легче, чем ПКМ на основе реактопластов, за счет способности их матрицы многократно переходить в вязкотекучее состояние и обратно [22].

Использование рассматриваемых матриц начало практиковаться на Западе еще в 1980-е гг., и с тех пор наблюдается устойчивая тенденция к росту их доли в конструкциях летательных аппаратов и космической техники. Очевидно, что для термопластичных ПКМ на современном уровне развития технологии образовалась весьма существенная потребность на рынке композиционных материалов, которая еще не полностью удовлетворена.

Из таких материалов изготавливают широкий спектр изделий различного назначения, в том числе работающих под нагрузкой при повышенных температурах, такие как элементы крыльев и хвостового оперения, детали мотогондолы ГТД, кабель-каналы, короба, люки, кронштейны, а также декоративные элементы интерьера.

Современные и перспективные летательные аппараты имеют высокую массовую долю ПКМ в своем составе. Так, в Boeing 787 Dreamliner их содержание составляет 50%, в Airbus A350 XWB – 52%, в российском самолете МС-21 – более 40%. Большая часть из ПКМ – это материалы на основе реактопластов, однако доля термопластичных ПКМ устойчиво растет, что делает весьма актуальной их разработку в Российской Федерации [23–27].

Особенно остро стоит вопрос о применении термопластичных ПКМ в России в связи с некоторым отставанием нашей страны от Запада еще во времена СССР и почти полным свертыванием работ в этом направлении после перестройки. К настоящему времени утеряно достаточно много документации по советским технологиям и производствам, особенно по производствам термостойких матриц. Остро также стоит проблема разработки аппаратов для повышения совместимости таких матриц с углеродными

и стеклянными волокнами. Тем не менее в последние годы в России предпринимаются попытки организовать малотоннажное производство таких материалов, в частности в АО «Институт пластмасс» и ФГБУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова». Налажен также выпуск отечественных углеродных тканей, например, производства ФГУП «ВИАМ» или фирмы Umatex Group. Таким образом, создается некоторая база для проведения исследований по разработке ПКМ на термопластичной матрице на основе отечественного сырья.

Однако существенным препятствием для таких исследований является некоторая неясность в вопросах требований к свойствам отечественных термостойких термопластичных связующих, а также необходимого для эффективной работы марочного ассортимента. Поэтому исследования логично начать с комплексных исследований зарубежных марок связующих как основы для создания ПКМ и их сравнения с существующими в настоящее время отечественными аналогами.

Одними из наиболее перспективных типов термостойких термопластичных полимерных матриц для ПКМ являются полиэфирэфиркетоны (ПЭЭК). Их достоинства – высокие физико-механические свойства, термостабильность, химическая стойкость. Наряду с полиэфиримидами и полисульфонами эти материалы широко используются в агрегатах авиационной техники, работающих под нагрузкой и при повышенных температурах. Недостатками ПЭЭК, частично вытекающими из их достоинств, в частности, являются: сложность их механической обработки, неспособность растворяться в растворителях, высокие энергозатраты на их формование [28–31]. Основные поставщики ПЭЭК в виде порошка и гранул – фирмы: Victrex (Англия), Zyreex (Китай), Ketron (Бельгия), SustaPEEK, TesaPEEK и GehrPEEK (Германия). В данной статье проведено сравнение ряда зарубежных марок ПЭЭК компаний Victrex и Zyreex, опробованных в качестве матриц для угленасыщенных ПКМ, и выработаны требования к их отечественным аналогам.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Материалы и методы

Для изготовления углепластиков использовали ПЭЭК марок Victrex 90P и Zyreex 330UPF производства Англии и Китая соответственно, а также пленку марки TK Lite производства Австрии. Компании поставляют ПЭЭК в виде порошков с размером частиц <100 мкм и пленок толщиной 50–100 мкм.

Углепластики получали прессованием между стальными прокладочными листами, затем производили вырезку образцов для испытаний на станке с ЧПУ.

Температуры стеклования, кристаллизации и плавления определяли по ГОСТ Р 55134–2012, температуру деструкции – по ГОСТ 29127–91. Предел прочности при растяжении определяли по ГОСТ 25.601–80, при статическом изгибе – по ГОСТ 25.604–82, при сжатии – по ГОСТ 25.602–80; прочность при межслойном сдвиге на короткой балке – по ГОСТ 32659–2014. Показатель текучести расплава (ПТР) определяли по ГОСТ 11645–73.

Неразрушающие исследования образцов проводили ультразвуковым эхо-импульсным методом с использованием автоматизированной ультразвуковой установки серии LS-500 фирмы ScanMaster (Израиль) с частотой преобразователя 5 МГц (для плит, отформованных в прессе с усилием 10 т) и ручного дефектоскопа OmniScan MX с фазированной решеткой на частоту 5 МГц (для плит, отформованных в прессе серии ПКМВ-65). Настройку оборудования осуществляли по амплитуде донного эхо-сигнала в условно годном месте.

Результаты и обсуждение

В ходе работы опробованы две различные технологии изготовления углепластиков – пленочная и препреговая. В первом случае пакет, собранный из предварительно нарезанных заготовок углеродной ткани и полимерной пленки, непосредственно формовали между стальными прокладочными плитами прессы, использовали пленку марки ТК Lite (Австрия). Во втором случае процессу прессования предшествовал процесс пропитки каждой заготовки углеродной ткани связующим с образованием полуфабриката – препрега.

Для получения ПКМ данным методом использовали порошковые ПЭЭК марок Victrex 90P и Zureek 330UPF. Препреги получали путем нанесения порошков ПЭЭК на углеродную ткань методом электростатического напыления в специальной камере и дальнейшим оплавлением на линии непрерывного формования ЛНРЗ-700, образцы углепластиков – методом прессования между цулагами. Массовую долю связующего варьировали в пределах 40–45% (по массе).

Указанные методы отличаются прежде всего возможностью использования разных видов сырья (порошкообразного или пленочного), а также их технологичностью.

Результаты исследования деформационно-прочностных характеристик углепластиков приведены в табл. 1. В качестве наполнителей выбраны углеродные ткани марок УТ-1000-200 производства ООО «Алабуга-волокно» и ВТкУ-2.200 производства ФГУП «ВИАМ».

Таблица 1

**Деформационно-прочностные характеристики углепластиков
на основе различных марок полиэфирэфиркетонов**

Свойства	Значения свойств углепластиков на основе углеродной ткани			
	УТ-1000-200 (аналог арт. 3692)		ВТкУ-2.200	
	полиэфирэфиркетонов в виде			
	порошка Zureek 330UPF (Китай)	порошка Victrex 90P (Англия)	Пленки ТК Lite (Австрия)	
Предел прочности, МПа:				
при изгибе	930	970	790	730
при сжатии	620	620	610	–
при межслойном сдвиге	35	55	40	–
Пористость, %	0,3	0,1	0,2	–

Как показывает анализ экспериментальных данных, углепластики, полученные на основе английского и китайского порошкового связующего, обладают сходными значениями прочности при изгибе и сжатии. Так, их прочность при сжатии находится на одном уровне, а прочность при изгибе имеет отличие в 5%. При этом по прочности при межслойном сдвиге углепластик на основе английского материала превосходит китайский аналог более чем на 30%. Следует отметить, что показатель прочности при сдвиге во многом определяется текучестью термопластичного связующего и его способностью проникать в межволоконное пространство. Английское связующее имеет ПТР, в ~4 раза превышающий показатель китайского аналога, что объясняет такую значительную разницу в значениях прочности при сдвиге между двумя образцами углепластика.

Таким образом, для оценки влияния свойств ПЭЭК на свойства полученных на их основе углепластиков проведены исследования текучести, температурных переходов и физико-механических характеристик вышеприведенных ПЭЭК (табл. 2).

Таблица 2

**Физико-механические характеристики и текучесть полиэфирэфиркетонов
различных марок**

Полиэфирэфиркетон	Предел прочности при разрыве, МПа	Удлинение при разрыве, %	Показатель при текучести расплава при 360 °С и нагрузке 5 кг
Zyreex 330UPF (Китай)	56,5	5,45	44,9
Victrix 90P (Англия)	105	20	120,2

Деформационно-прочностные и технологические свойства полимерных матриц существенно различаются. Текучесть образца Zyreex 330UPF более чем в 2 раза меньше текучести образца Victrix 90P; аналогичные результаты исследования и у прочностных характеристик: у образца китайской марки этот показатель практически вдвое меньше.

Исследование температурных переходов материалов проводили методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА). Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Температурные переходы полиэфирэфиркетонов различных марок

Полиэфирэфиркетон	Температура, °С		
	кристаллизации	плавления	деструкции
Zyreex 330UPF (Китай)	278,9	342,4	589,7
Victrix 90P (Англия)	303,3	342,5	582,6

Полученные значения температуры плавления у китайского и английского ПЭЭК практически идентичны, при этом температура деструкции ПЭЭК марки Zyreex 330UPF больше на 7 °С.

Текучесть оказывает серьезное влияние на качество конечного углепластика. Для того чтобы наполнитель и полимерная матрица превратились в бездефектный композиционный материал, в котором каждый компонент полностью исполняет свои функции, необходимо обеспечить достаточное для данного конкретного случая межфазное взаимодействие. В случае с углепластиковыми критическое значение имеет глубина проникновения расплава (или раствора) матрицы внутрь тканого слоя наполнителя. В случае плохой пропитки вместо композиционного образуется слоистый материал, в котором чередуются слои из подплавленной пленки полимера и более или менее сухой углеродной ткани.

Проблема плохой пропитки предлагаемого на отечественном рынке углеволокна расплавом термопластов вообще стоит весьма остро вследствие того, что оно обычно выпускается аппретированным под наиболее распространенные в настоящее время эпоксидные связующие. Помимо просто плохой совместимости этого аппрета с термопластом, при использовании такой ткани имеется еще и проблема термического разложения аппрета, не рассчитанного на температуры плавления термостойких конструкционных термопластов. При этом граница раздела «полимер–наполнитель» загрязняется продуктами распада аппрета с дальнейшим снижением межфазного взаимодействия.

В работах [32–34] предлагается ряд методов повышения пропитываемости углеродного волокна расплавом полимеров – от использования специально разработанных для конкретного полимера аппретов до механических устройств, раздвигающих волокна ткани во время пропитки.

Изучение полученных образцов углепластиков, разрушенных в ходе механических испытаний, показывает, что углеволокно пропитано неравномерно даже в самых лучших по прочности образцах. Поэтому также проведены исследования, направленные на повышение совместимости углеволокна с ПЭЭК.

Работы по переаппретированию углеродной ткани выполняли с целью повышение ее совместимости с полимерной матрицей. В данном случае применяли технологию переаппретирования, основанную на нанесении аппрета из раствора. В качестве аппрета использовали полиимидное связующее полимеризационного типа марки ВС-51 (ТУ1-595-12-1682–2017), а в качестве растворителя – этиловый спирт. Концентрацию аппрета в растворителе варьировали в пределах 1–5% (по массе). Связующее ВС-51 наносили на углеткань, с которой предварительно удаляли эпоксидный аппрет.

Результаты испытания углепластиков, полученных на основе переаппретированных наполнителей, приведены на рис. 1. Установлено, что протестированный в ходе работы аппрет не позволяет улучшить совместимость ПЭЭК с углеродной тканью. Более того, наблюдается существенное снижение свойств материала. Сделан вывод о необходимости продолжения работы над высокоэффективными аппретами для углеволокна, совместимыми с ПЭЭК, и совершенствования технологии их нанесения.

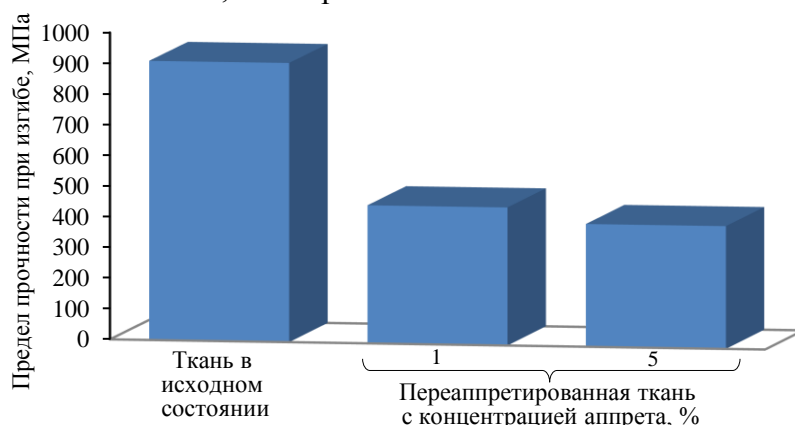


Рис. 1. Деформационно-прочностные характеристики углепластиков на основе переаппретированного углеродного наполнителя – ткани УТ-1000-200

Наличие дефектов в структуре полученных углепластиков оценивали по значению объемных долей микропористости, определение которых проводили на металлографическом комплексе фирмы Leica при увеличении $\times 200$ в соответствии с МИ1.2.018–2010. Для оценки объемной доли пористости суммарную площадь всех обнаруженных на шлифе пор относили к общей площади шлифа. Согласно полученным данным, образец из углепластика на основе Victrex 90P имеет пористость $\sim 0,1\%$, а образец на основе Zyreex 330UPF: $0,3\%$, что является неплохим показателем для данных материалов (рис. 2).

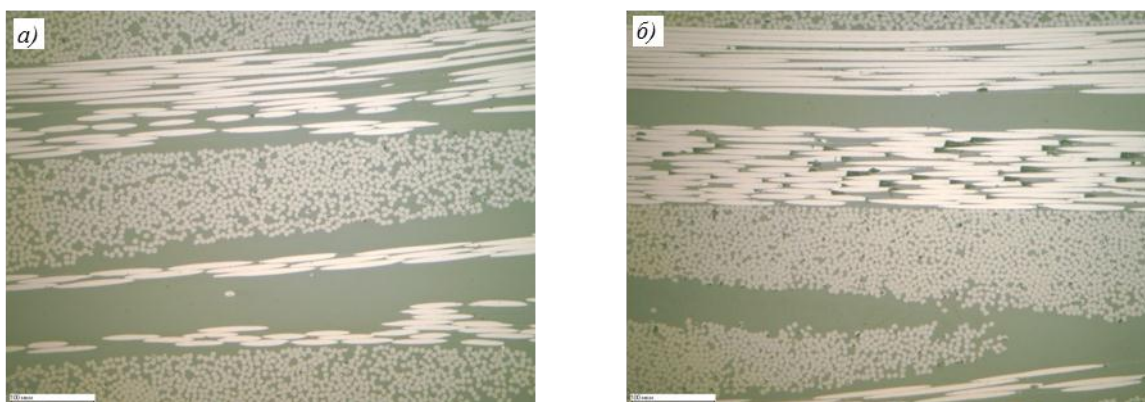


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) образцов из термопластичного углепластика на основе полиэфиракетона Zyreex 330UPF и тканей УТ-1000-200 (а) и ВТкУ-2.200 (б)

Для оценки влияния масштабного фактора и условий переработки на качество получаемых ПКМ проведены неразрушающие ультразвуковые исследования структуры углепластиков, полученных на различном оборудовании (на прессах с усилием 10 т и серии ПКМВ-65). На рис. 3 представлены результаты ультразвукового исследования углепластиков на основе углеродных тканей УТ-1000-200 и ВТкУ-2.200, изготовленных на прессе с усилием 10 т между цулагами (цветом от фиолетового до красного обозначена амплитуда донного эхо-сигнала соответственно от 0 до 100%). Установлено, что образцы, полученные на прессе с усилием 10 т с размером плит 200×200 мм между цулагами, оказались проформованными (пропитанными) лишь в центральной части плиты (амплитуда донного эхо-сигнала в этой зоне составляет $\sim(80\pm 10)\%$ для образца на основе углеродной ткани УТ-1000-200 и $50\pm 20\%$ – из углеродной ткани ВТкУ-2.200), в то время как на краях (по ~ 50 мм от края) наблюдается непропитка или наличие пористости $>4\%$ (ультразвуковой сигнал полностью затухает).

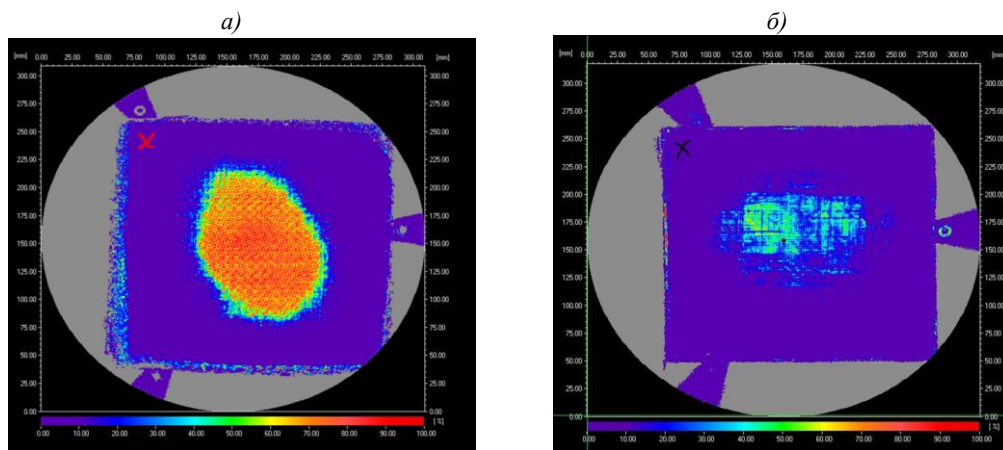


Рис. 3. Результаты (в виде С-сканов) ультразвукового исследования углепластиков на основе углеродных тканей УТ-1000-200 (а) и ВТкУ-2.200 (б), полученных на прессе с усилием 10 т между цулагами

Сравнение полученных результатов, которые представлены на рис. 3, позволяет сделать вывод, что размер проформованной (пропитанной) зоны приблизительно одинаковый в образцах из углепластиков, полученных на основе углеродных тканей УТ-1000-200 производства ООО «Алабуга-Волокно» и ВТкУ-2.200 производства ФГУП «ВИАМ». Тем не менее при одинаковой настройке оборудования амплитуда донного эхо-сигнала для образца на основе ткани ВТкУ-2.200 несколько ниже, чем на основе ткани УТ-1000-200, что может свидетельствовать о худшей проформованности (пропитке) углепластика на основе ткани ВТкУ-2.200, чем на основе ткани УТ-1000-200, т. е. о меньшем уровне межфазного взаимодействия между полимером и наполнителем.

Результаты ультразвукового исследования углепластика на основе ПЭЭК марки ТК Lite и углеродной ткани УТ-1000-200, изготовленного по пленочной технологии на прессе серии ПКМВ-65 с размером плит 500×500 мм, приведены на рис. 4 (цветом от белого до красного обозначена амплитуда донного эхо-сигнала соответственно от 0 до 100%). Видно, что размеры проформованной зоны листа при использовании пресса серии ПКМВ-65 составляют не менее 3/4 заготовки, а зоны непропитки или высокой пористости ($>4\%$) сосредоточены по краям и в углах листа.

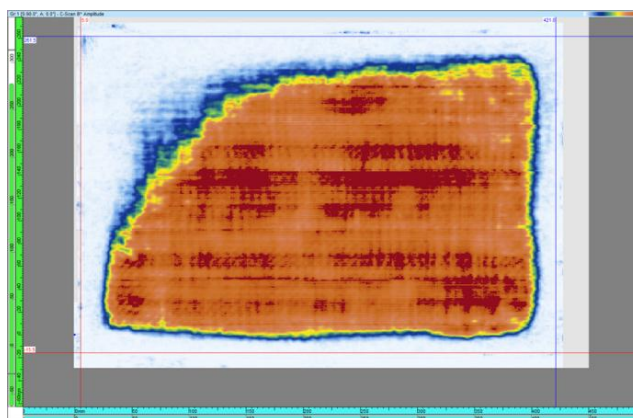


Рис. 4. Результаты (в виде С-сканов) ультразвукового исследования углепластика на основе полиэфирэфиркетона ТК Lite и углеткани УТ-1000-200, полученного по пленочной технологии на прессе серии ПКМВ-65

При прессовании углепластиков между стальными листами, несмотря на удовлетворительный разброс температур по плоскости прессования (± 5 °С), пропитка углеволокна связующим существенно различается в центре плиты и по ее краям. Зона ~50 мм и больше во всех рассмотренных случаях остается частично непропитанной, что может приводить к ее попаданию в состав формуемого из листа изделия или вырезаемого из листа образца для испытаний. В соответствии с действующими в настоящее время нормативными документами это недопустимо и данная зона должна полностью обрезаться.

Для оценки возможных последствий попадания подобных зон в состав изделий проведены сравнительные испытания физико-механических свойств образцов, взятых из дефектных и бездефектных зон (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение значений прочности дефектных и бездефектных зон плит углепластиков, полученных на различном оборудовании

Вид испытаний и тип прессы	Бездефектная зона		Дефектная зона		Падение средней прочности, %
	Среднее значение	Разброс значений	Среднее значение	Разброс значений	
Прочность при изгибе образцов, полученных на прессе с усилием 10 т, МПа	731	648–812 (20%)	560	266–754 (64%)	23
Прочность при сжатии образцов, полученных на прессе серии ПКМВ-65, МПа	710	660–760 (13%)	664	570–740 (23%)	6,5

Таким образом, при некоторых видах испытаний полученных образцов, вырезанных в краевых зонах листа, визуально ничем не отличавшихся от центральных, снижение средней прочности углепластиков могло составлять до 1/4. Однако этим проблема не ограничивается – как видно из данных по разбросу значений прочности в дефектных зонах, в этих зонах встречаются образцы как с высокой прочностью, так и с прочностью вдвое меньше средней. При этом разброс значений существенно зависит от типа используемого оборудования. Поэтому даже при получении визуально однородного листа необходим тщательный контроль качества пропитки плит термопластичного углепластика, особенно когда его необходимо использовать в составе ответственных изделий.

Заключения

Проведены опробование ПЭЭК зарубежного производства в качестве матриц для угленасыщенных ПКМ и исследование их свойств.

Использованы две технологии получения термопластичных ПКМ – пленочная и препреговая. Установлено, что применение порошковых ПЭЭК с низкой текучестью нецелесообразно для изготовления углепластиков методом электростатического напыления связующего на наполнитель с последующим прессованием, так как они не обеспечивают надлежащую пропитку волокна расплавом.

Для оценки потенциала полученных листовых углепластиков как конструкционных материалов проведены исследования дефектности их структуры и определены прочностные характеристики образцов из дефектных и бездефектных зон. Установлено, что размеры полностью и частично проформованных зон листа коррелируют с размерами плит пресса и доля качественного углепластика возрастает с увеличением размеров зоны формования. Показано, что прочность дефектных зон в отдельных случаях может соответствовать прочности бездефектных зон, а в других – быть вдвое меньше прочности бездефектных зон.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.В. Малышенку за помощь в работе.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 7–17.
2. 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.
3. Комаров Г.А. Состояние, перспективы и проблемы применения ПКМ в технике // *Полимерные материалы*. 2009. №2. С. 5–9.
4. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2011. С. 32–33.
5. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 30–40.
6. Нефедов Н.И., Кондрашов Э.К., Семенова Л.В., Лебедева Т.А. Эрозионностойкие покрытия для защиты изделий из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №33. С. 25–27. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-25-27.
7. Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Платонов М.М., Юрков Г.Ю. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-60-67.
8. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 277–286.
9. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гуреева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2013. №11. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2020).
10. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2015. №11. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-5-5.
11. Головкин Г.С. Регулирование механических свойств ПКМ методами целенаправленного формирования межфазной зоны // *Полимерные материалы*. 2009. №11. С. 26–28.
12. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н. Влияние климатических факторов на свойства углепластика на полифениленсульфидном связующем // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2015. №1. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-10-10.

13. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Исследование свойств углепластика на полифениленсульфидном связующем после ускоренных и натуральных климатических испытаний // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 66–72. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-66-72.
14. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе. СПб.: Профессия, 2006. С. 33–346.
15. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
16. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
17. Николаев А.Ф. Термостойкие полимеры. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1988. С. 3–11.
18. Головкин Г.С. Технологические свойства термопластичных связующих для армированных пластиков // *Пластические массы*. 2005. №1. С. 35–40.
19. Мажирын П.Ю. Полифениленсульфид в авиастроении // *Полимерные материалы*. 2003. №2. С. 22–24.
20. Li J. Effect of silane coupling agent on the tensile properties of carbon fiber-reinforced thermoplastic polyimide // *Composites A: Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2010. Vol. 49. P. 337–340.
21. Тростянская Е.Б., Степанова М.И., Рассохин Г.И. Теплостойкие линейные полимеры. Ростов н/Д: РГАСХМ, 2002. С. 3–22.
22. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
23. Buznik V.M., Kablov E.N. Arctic materials science: current state and prospects // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2017. Vol. 87. No. 5. P. 397–408.
24. Лазарева Т.К., Ермакин С.Н., Костягина В.А. Проблемы создания композиционных материалов на основе конструкционных термопластов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2010. Т. 24. №4. С. 58–63.
25. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
26. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2011. С. 545–549.
27. Jones Fr. A review of interphase formation and design in fibre-reinforced composites // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2010. Vol. 24. No. 1. P. 171–202.
28. Drzal L., Raghavendran V. Adhesion of thermoplastic matrices to carbon fibers: effect of polymer molecular weight and fiber surface chemistry // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2003. Vol. 16. P. 21–30.
29. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Дыкун М.И. Аппретирование углеродных волокон-наполнителей термопластичных карбопластиков // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2014. №10. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-3-3.
30. Thostenson E.T., Chou T.-W. Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and mechanical characterization // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002. Vol. 35. P. L77–L80.
31. Chuang L., Chu N.-J. Effect of polyamic acids on interfacial shear strength in carbon fiber/aromatic thermoplastics // *Journal of Applied Polymer Science*. 1990. Vol. 41. P. 373–382.
32. Сорокин А.Е., Петрова Г.Н. Замасливатели и аппреты в процессах «жидкофазной» модификации поверхности угле- и стекловолоконистых наполнителей при производстве конструкционных материалов. Обзор // *Химическая технология*. 2019. Т. 20. №6. С. 257–264. DOI: 10.31044/1684-5811-2019-20-6-257-264.
33. Сорокин А.Е., Петрова Г.Н., Донских И.Н. Химическая и электрохимическая обработка в процессах «жидкофазной» модификации поверхности угле- и стекловолоконистых при производстве конструкционных материалов (Обзор) // *Химическая технология*. 2019. Т. 20. №7. С. 316–323. DOI: 10.31044/1684-5811-2019-20-7-316-323.
34. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.