

УДК 678

*М.И. Валуева¹, И.В. Зеленина¹, М.А. Хасков¹, А.И. Гуляев¹***ПОДГОТОВКА УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА
К НАНЕСЕНИЮ ИНТЕРФАЗНОГО ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С КЕРАМИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-9-9

Представлены результаты влияния способа удаления аппрета на состояние поверхности углеродного волокна и его свойства, определяющие эффективность последующего нанесения на волокно защитного интерфазного покрытия и получения керамоматричного композиционного материала. Проведены физико-химический и термический анализ, испытания на прочность, исследована микроструктура углеродных наполнителей в присутствии аппрета и после его удаления. Показано, что наиболее технологически оптимальным методом является удаление аппрета посредством отжига углеродного волокна в статической атмосфере воздуха при 400°C.

Ключевые слова: армирующий наполнитель, углеродное волокно, аппрет, удаление аппрета, интерфазное покрытие, керамоматричные композиционные материалы.

The comparative results of surface coating removal from the carbon fiber, which determine the efficiency of interphase coating deposition and ceramic matrix composite manufacturing, are discussed. The physical-chemical and thermal analysis, tensile strength measurements and microstructure of carbon fillers with surface coating and after its removal were carried out. It was shown, that the most optimal method from technological point of view is the surface coating removal by annealing of carbon fiber at static air atmosphere at 400°C.

Keywords: reinforced fillers, carbon fiber, surface coating, surface coating removal, interphase coating, ceramic matrix composite.

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

Развитие двигателестроения идет по пути увеличения коэффициента полезного действия, снижения весовых характеристик и уменьшения вредных выбросов в атмосферу [1–3]. В связи с этим особенно актуально использование в горячей зоне двигателя высокотемпературных керамоматричных композиционных материалов (ККМ) [4]. Керамические материалы обладают уникальным комплексом свойств: устойчивы в окислительной среде при температурах >1200°C, имеют хорошую износостойкость и отличные коррозионные свойства, низкую, по сравнению с металлами, плотность и невысокое тепловое расширение [5]. Однако керамическая матрица хрупка, поэтому для наиболее полной реализации ее уникальных свойств и для повышения прочностных и ударных характеристик применяют различные армирующие наполнители в виде непрерывных или дискретных волокон, тканей разных структур, матов на основе неоксидных соединений – углерода, карбида и нитрида кремния и др. Композиты состава C/C, C/SiC, SiC/SiC отличаются высокими прочностными характеристиками, жаропрочностью, малой плотностью, что позволяет использовать их в авиации и космической технике в качестве высокотемпературных конструкционных материалов – для изготовления элементов газовых турбин, дизельных двигателей, теплообменников, в триботехнике [6, 7].

Углеродные волокна по термостойкости превосходят многие известные материалы – их прочность и модуль упругости в инертной среде не снижаются при температурах до 1500°C. Однако в среде кислорода воздуха термостойкость углеродных волокон находится в пределах 300–400°C [8], что приводит к потере прочности и ограничивает возможность использования наполнителей из углеродного волокна для создания высокотемпературных материалов – например, ККМ. Для получения возможности использования углеродных волокон в качестве конструкционного материала для высокотемпературного применения, необходимо придать им окислительную устойчивость [9]. Согласно научно-техническим литературным данным, наиболее эффективным способом повышения термической стойкости углеродных волокон является создание на поверхности волокна малопроницаемого защитного слоя – интерфазы, содержащего тугоплавкие соединения, устойчивые к окислению. В качестве таких соединений могут быть использованы, в частности, пирокарбиды кремния и циркония, имеющие повышенную стойкость в воздушной среде в интервале температур 600–800°C, в среде углекислого газа – до 800–1000°C [6, 8].

Необходимыми критериями при выборе интерфазы являются термодинамическая совместимость со всеми компонентами композита и окислительная устойчивость во всем рабочем интервале температур. Наиболее часто для создания защитных покрытий применяют карбиды Si, B, Zr, Ti, Ta, Hf; оксиды Al, Si, Ti, Zr, B, Hf, Ce; нитриды Si, Ti, B, Al; бориды Ti, Zr, Hf, а также комбинированные системы [5, 10].

Интерфаза в композите очень важна, поскольку она должна отклонять трещины на границе «волокно–матрица», передавать механическую нагрузку от матрицы к волокну, сохранять химическую и микроструктурную стабильность во всем рабочем интервале температур и быть устойчивой к окислению. Другими словами, задачей интерфазы является создание компромисса между слишком высокой и слишком низкой адгезией матрицы с волокном. Высокая адгезия будет способствовать реализации в ККМ физико-механических свойств, характерных для матрицы с ее низкой трещиностойкостью и хрупкостью. Низкая адгезия не будет приводить к диссипации энергии разрушения на границе «наполнитель–волокно», что также не приведет к повышению механических свойств по сравнению с неармированной керамической матрицей [4]. Интерфазное покрытие выступает также в качестве защитного слоя в процессе изготовления ККМ при взаимодействии прекурсоров керамической матрицы (галогениды, радикалы, карбидообразующие элементы и др.) с наполнителем [9]. В научно-технической литературе описаны различные составы и способы нанесения интерфазного покрытия. Толщина покрытия составляет, по разным данным, от 100–300 нм (как правило) до 1 мкм [6, 9, 11–13].

Для образования такого тонкого и монолитного интерфазного покрытия требуется предварительная подготовка поверхности используемых волокон – в частности, углеродного волокна. Процесс получения углеродных волокон, используемых в качестве армирующих наполнителей, в том числе и для ККМ, на заключительном этапе включает стадию аппретирования или шлихтования. Целью аппретирования является улучшение технологических свойств нитей и жгутов: облегчение процессов переработки (например, ткачества), защита хрупкого волокна от механического повреждения в процессе переработки, а также улучшение адгезии полимерной матрицы к углеродному волокну при его использовании в качестве армирующего компонента полимерных композиционных материалов [14–17]. Аппретирующий состав, как правило, представляет собой эмульсию или суспензию, состоящую из полимерных компонентов – эмульгаторов, пленкообразующих, антистатических и соединяющих агентов, способствующих выравниванию и защите углеродного волокна, улучшающих его смачиваемость. Стандартные аппреты могут содержать эпоксидные смолы, полиэфир, полиамид,

уретан и другие компоненты. В табл. 1 представлены перечень и назначение основных компонентов, которые могут быть включены в состав аппрета [18].

Таблица 1

Основные компоненты аппретирующего состава [18]

Компонент	Основная функция
Вода	Среда для создания смеси
Соединяющий агент	Улучшает связь между матрицей и армирующим наполнителем
Смазка	Предотвращает механическое повреждение волокон
Пленкообразователь	Способствует скреплению волокон и образованию защитного покрытия
Смачивающий агент	Способствует смачиванию волокон полимерной матрицей и пленкообразователем
Перекрестно-сшивающий агент	Способствует формированию перекрестных связей с полимерной матрицей и/или пленкообразователем
Антистатик	Рассеивает статический заряд, образующийся на волокнах

Для информирования о химической природе аппрета производителем углеродных наполнителей может быть применена система обозначений. Например, используемые фирмой Тогауса (Япония) типы аппретов «1», «3» и «6» представляют собой эпоксидные смолы, «4» – эпоксидные, фенольные, бисмалеинимидные смолы, «F» – сложный виниловый эфир, совместимый с эпоксидной смолой [18]. Буква «E» в марке жгутов, выпускаемых фирмой Тохо Тенах (Япония), соответствует применению эпоксидной композиции, буква «F» – эпоксидно-полиуретановой композиции [19].

В работе [20] представлены результаты исследований составов аппретов промышленно выпускаемых углеродных волокон марок T-700, T-800 и T-1000 фирмы Тогауса. Установлено содержание в аппрете на поверхности углеродного волокна марки T-700 эпоксидной смолы E-51 и малеинового ангидрида, аппрет на поверхности углеродных волокон марок T-800 и T-1000 содержит эпоксидную смолу E-51 и фталевый ангидрид. Содержание отдельных химических элементов на поверхности аппретированного углеродного волокна оказывает влияние на его свойства. Так, с увеличением содержания на поверхности волокна углерода возрастает прочность материала, азот повышает твердость и износостойкость, а проникновение атомарного кислорода в поверхностные слои волокна приводит к разрыхлению поверхности и ухудшает его механические характеристики [20].

Поскольку массовая доля аппрета, как правило, не превышает 0,5–2,0% [8], его наличие на волокне будет негативно сказываться на качестве интерфейсного покрытия. Необходимо, чтобы наносимый защитный состав образовывал равномерное, непрерывное, бездефектное покрытие и максимально ограждал волокно от разрушения при высоких температурах, что затруднительно при наличии аппрета, так как сам его состав за счет присутствия атомов кислорода может способствовать развитию негативных процессов термоокисления при пиролизе.

В научно-технической литературе представлены данные о различных способах удаления аппрета. Так, в работах [9, 11–13, 21, 22] проводится отмывка углеродных волокон от аппрета при помощи органических растворителей. Для удаления аппрета предложено использовать ацетоно-спиртовую смесь, сушку волокон с последующей высокотемпературной (по данным различных источников – от 450 до 960°C) обработкой в условиях инертной среды [21], воздуха [13] или вакуума [11, 12].

Целью данной работы являлось исследование влияния способа удаления аппрета на состояние поверхности углеродного волокна и его свойства.

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

Материалы и методы

В качестве объектов исследования в данной работе выбраны углеродный жгут и углеродная ткань (табл. 2), которые далее будут использованы как наполнители для ККМ с предварительно нанесенным интерфазным покрытием.

Таблица 2

Текстильные материалы, используемые в работе

Объекты исследования	Страна-производитель	Технические характеристики, заявленные производителем
<p>Углеродный жгут марки Tenax[®]-E HTS40 E23 12K [19]</p> 	Япония	<p>Линейная плотность 800 текс Плотность волокна 1,77 г/см³ Предел прочности при растяжении 4400 МПа Модуль упругости при растяжении 240 ГПа Относительное удлинение 1,8%</p>
<p>Углеродная ткань марки УТ-900И [23]</p> 	Россия	<p>Равнопрочная ткань на основе углеродного жгута Т-800НВ-6000-40В 6К с линейной плотностью 800 текс Плотность волокна 1,81 г/см³ Тип плетения – саржа 2×2 Ширина 900±7 мм Поверхностная плотность 240±30 г/м² Количество нитей на 10 см: по основе 60±2 по утку 60±2</p>

Экспериментально свойства углеродных волокон оценивали с использованием стандартных методов:

– содержание аппрета в углеродном жгуте и ткани определяли по ГОСТ Р ИСО 10548–2012 «Волокно углеродное. Методы определения содержания аппрета»;

– линейную плотность нити с аппретом и без аппрета определяли по ГОСТ ISO 1889–2013 «Нити армирующие. Метод определения линейной плотности»;

– плотность углеродного волокна определяли по ГОСТ Р ИСО 10119–2012 «Волокно углеродное. Методы определения плотности» методом подгонки плотности жидкости с использованием ацетона в качестве иммерсионной жидкости.

Для определения упруго-прочностных характеристик изготовили образцы микропластиков на основе углеродного жгута марки Tenax[®]-E HTS40 E23 12K и типового эпоксидного связующего марки ЭДТ-69(Н).

Определение предела прочности и модуля упругости при растяжении, деформации нити при максимальной нагрузке проводили по ГОСТ Р ИСО 10618–2012 «Волокно углеродное. Метод определения механических свойств пропитанных смолой нитей при

растяжении». Общая длина испытуемых образцов микропластиков составляла 250 ± 5 мм, длина между петлями 150 ± 5 мм. Испытания на растяжение проведены на универсальной испытательной машине Z-005 (Германия) [24, 25].

Краевой угол смачивания углеродных волокон типовым эпоксидным связующим определяли на оптическом приборе для измерения краевого угла смачивания OCA 15Pro DataPhysics Instruments GmbH.

Исследование морфологии поверхности углеродных волокон проводили на растворяющем электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка от 600 до 800 пА. Предварительно на поверхность углеродных волокон наносили токопроводящий слой (слой платины толщиной 10–15 нм) на установке для ионного напыления JFC-1600. Получены изображения поверхности углеродных волокон в режиме вторичных электронов при увеличениях $\times 5000$ и $\times 15000$ [26].

Термогравиметрические исследования проводили на синхронном термическом анализаторе STA 449 F3 Jupiter фирмы Netzsch (Германия) в перфорированных алюминиевых тиглях в динамической атмосфере сухого воздуха (70 мл/мин) при скорости нагревания 10 К/мин. Для калибровки прибора по температуре использовали стандартные калибровочные образцы [27].

Результаты

Для удаления аппрета, нанесенного на исследуемые углеродные наполнители в процессе изготовления, использовали два способа:

- отмывку аппрета при помощи органического растворителя;
- термическое разложение аппрета пиролизом в муфельной печи при высокой температуре.

Для контроля полноты удаления аппрета определяли его количество на углеродном жгуте и углеродной ткани. Количество аппрета определяли экстракцией растворителя с помощью аппарата Сокслета по ГОСТ Р ИСО 10548–2012.

Методами термогравиметрического анализа в динамической инертной атмосфере определяли температурный интервал термического разложения аппрета. Полученные ТГ-кривые представлены на рис. 1.

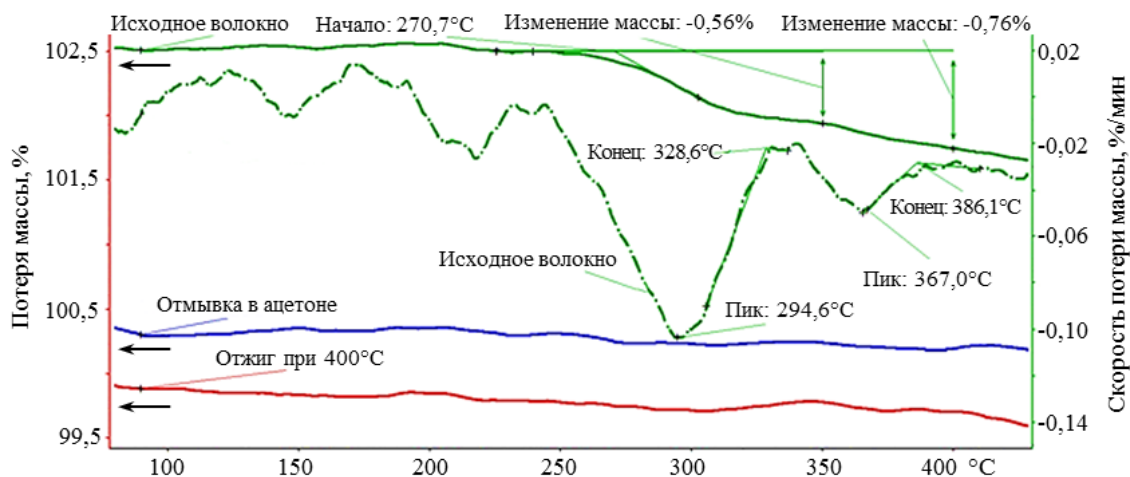


Рис. 1. Данные термогравиметрического анализа в инертной атмосфере азота исходного и обработанных при различных режимах образцов углеродного волокна

Как видно из данных рис. 1, на кривой исходного углеродного волокна, начиная с 270°C , фиксируется потеря массы, значение которой при 350°C достигает $0,6\%$, а при

температуре 400°C достигает значения 0,8%. Данная потеря массы при нагревании образца в инертной атмосфере азота может быть связана с пиролизом аппрета и образованием при данной температуре летучих соединений. При этом, как видно из данных ДТГ указанного образца, этот процесс является многостадийным, причем максимальная скорость потери массы наблюдается при 295°C, тогда как окончание изменения скорости первой стадии данного многостадийного процесса пиролиза заканчивается при 330°C. Вторая стадия пиролиза имеет максимальную скорость при 367°C, тогда как заканчивается при 386°C. В этой связи для удаления аппрета с волокна в окислительных условиях в атмосфере воздуха выбрали температуры отжига 350 и 400°C. Следует отметить, что полученные результаты термогравиметрического анализа при нагреве образца, оттоженного при 400°C и отмытого в ацетоне, свидетельствуют о том, что такая обработка приводит к полному исчезновению потери массы, которая, как предполагали, связана с пиролизом аппрета. Полученные результаты позволяют сделать предположение о равноценности методов отжига при 400°C и отмытки в ацетоне для удаления аппрета с исследуемого типа углеродного волокна.

В табл. 3 приведены данные по количеству аппрета, нанесенного на углеродные наполнители в процессе изготовления, определенные различными методами, а также по количеству аппрета, удаленного различными способами.

Таблица 3

Результаты определения содержания аппрета

Способ удаления аппрета	Количество аппрета, %	
	на углеродном жгуте марки Tenax®-E HTS40 E23 12K	на углеродной ткани марки УТ-900И
Данные производителя	0,75–1,75	0,50–1,50
По ГОСТ Р ИСО 10548–2012	1,155	1,188
С помощью растворителя	1,156	1,190
Термическое разложение при температуре, °C:		
350	–	1,155
400	1,155	1,189

Как видно из данных табл. 3, экспериментально полученные результаты определения содержания аппрета коррелируют между собой и характеризуются достаточно высокой сходимостью. Производители волокон в своей документации указывают широкий диапазон содержания аппрета, а значит, необходимо строго контролировать полноту его удаления в процессе подготовки поверхности углеродных волокон к нанесению интерфазного покрытия.

Для оценки качества удаления аппрета исследовали состояние поверхности углеродных волокон методом растровой электронной микроскопии. На рис. 2 приведены микрофотографии поверхности углеродных волокон. Различные способы удаления аппрета могут оказывать влияние в том числе и на адгезионные свойства волокна. По результатам определения краевого угла смачивания установлено, что его величина для исходного углеродного волокна составляет 51,7 град, для волокна после удаления аппрета с использованием отмытки или отжига 90,2 и 91,9 град соответственно.

Углеродные волокна преимущественно имеют круглое сечение и фибриллярное строение. Каждое моноволокно (филамент) диаметром 6–10 мкм состоит из фибрилл диаметром 150–250 нм, расположенных параллельно друг другу [9].

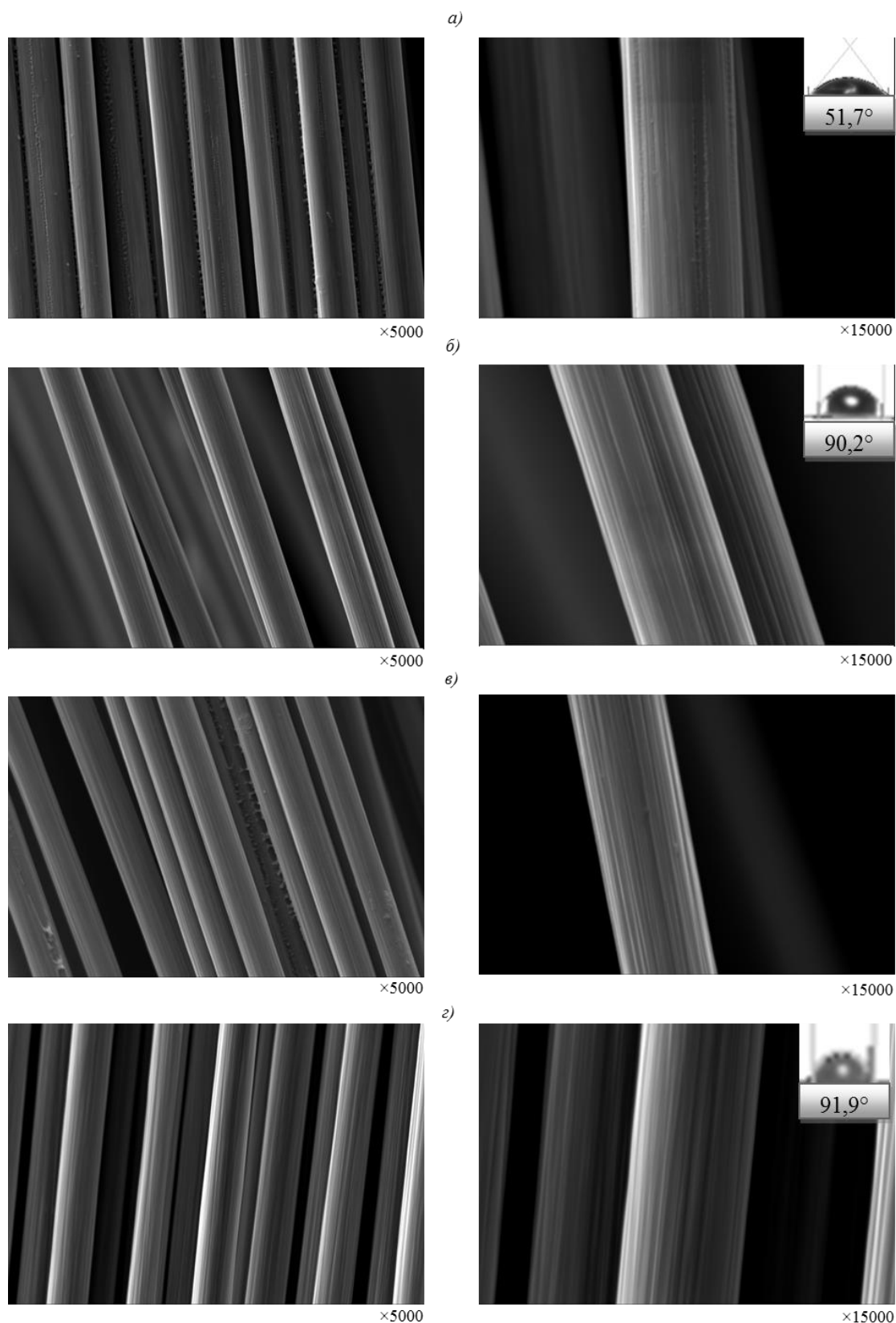


Рис. 2. Микрофотографии углеродных волокон из ткани УТ-900И с разным краевым углом смачивания:

а – в исходном состоянии с нанесенным аппретом; *б* – аппрет удален с помощью растворителя; *в*, *г* – аппрет удален термическим разложением при температурах 350 и 400°C соответственно

На рис. 2, а представлена поверхность исходного аппретированного углеродного волокна из ткани УТ-900И, которая равномерно покрыта слоем аппрета, частично скрывающего фибриллярное строение углеродного волокна. На поверхности также видны небольшие бугорки. Такая неоднородность поверхности может быть обусловлена влиянием состава исходного сырья, от которого «наследуется» структура углеродного волокна, отклонениями технологических параметров вытягивания и пиролиза углеродного волокна, а также неравномерным распределением аппрета. Между волокнами также наблюдаются «тяги» аппрета, связывающие отдельные филаменты друг с другом.

Отмывание аппрета с углеродной ткани с помощью органического растворителя (рис. 2, б) приводит к его полному удалению: видна гладкая поверхность волокна, четко просматривается фибриллярная структура, связывания филаментов друг с другом не наблюдается.

На рис. 2, в, г приведены волокна, аппрет с которых удалялся термическим разложением. Для углеродного волокна из ткани УТ-900И, приведенного на рис. 2, в, температура удаления аппрета составляла 350°C. При этой температуре аппрет удален не полностью: видны остатки аппрета между моноволокон и в виде остатков бугорков и наплывов на поверхности. Неполное удаление аппрета подтверждается данными, приведенными в табл. 3. На рис. 2, г приведены фотографии поверхности волокна, аппрет с которого удален при температуре 400°C. Отжиг при этой температуре приводит к полному удалению аппрета – так же как и на фотографиях волокна после отмывки аппрета органическим растворителем видна его гладкая однородная поверхность с четко выраженной фибриллярной структурой. Дефектов, которые могли быть вызваны высокой температурой обработки, на рис. 2, г не наблюдается.

Для оценки влияния способа удаления аппрета на упруго-прочностные свойства наполнителя изготовлены образцы микропластиков на основе углеродного жгута марки Tenax®-E HTS40 E23 12K (исходного и после удаления аппрета) и типового эпоксидного связующего марки ЭДТ-69(Н). Образцы изготавливали на станке для получения микропластика Microsam MDW 100/2S-2 (Македония) с модулем обогрева маслом Corema.

В табл. 4 представлены результаты испытаний при растяжении образцов микропластиков (по 10 образцов каждого вида). Испытания проведены при температуре 20°C. Для расчета предела прочности микропластиков при растяжении использовано значение площади поперечного сечения углеродного волокна, полученное по результатам экспериментального определения содержания аппрета (ГОСТ Р ИСО 10548–2012), линейной (ГОСТ ISO 1889–2013) и объемной (ГОСТ Р ИСО 10119–2012) плотности углеродной нити без аппрета.

Таблица 4

Результаты испытаний при растяжении микропластиков на основе углеродного жгута марки Tenax®-E HTS40 E23 12K (фирма Toho Tenax, Япония)

Свойства	Значения свойств для углеродного жгута марки Tenax®-E HTS40 E23 12K			
	в исходном состоянии	после пиролиза при температуре, °С		после отмывки
		350	400	
Линейная плотность, текс	811	800	800	800
Плотность углеродного волокна, г/см ³	–	1,781	1,781	1,781
Массовая доля связующего, %	41,1±0,1	42,0±0,2	42,2±0,2	45,0±0,2
Предел прочности при растяжении, МПа	4102	–	4182	3766
Коэффициент вариации	4,5	–	4,7	4,1
СКО	189	–	195	155
Модуль упругости при растяжении, ГПа	240	–	240	234
Коэффициент вариации	1,3	–	1,1	1,6
СКО	3	–	3	4
Удлинение при разрыве, %	1,6	–	1,6	1,6

Как видно из данных табл. 4, при испытании микропластика, полученного из пиролизованного при 400°C волокна, наблюдается увеличение прочности при растяжении на 2%. Некоторое возрастание прочности предварительно отожженного углеродного волокна в этом случае может быть связано с продолжающимся упорядочиванием ароматической структуры и повышением степени ориентации макромолекул [9]. Однако при дальнейшем повышении температуры термообработки до 450°C отмечается существенное (до 25–30%) падение значений механических свойств – начинается термическое разложение. Уровень упруго-прочностных свойств микропластика на основе углеродного волокна, отмытого от аппрета, претерпевает некоторое снижение: по прочности при растяжении – на 8,2%, по модулю упругости – на 2,5%. Снижение прочности углеродного волокна с аппретом, удаленным с помощью экстракции, может быть связано с проявлением или усугублением (после отмытки) поверхностных дефектов, которые могли быть залечены при нанесении аппрета, изломом филаментов, устранением сглаженности рельефа и зарастанием крупных пор и выступов [9].

Обсуждение и заключения

Углеродное волокно выпускается предприятием-изготовителем с нанесенным на его поверхность в ходе технологического цикла производства аппретом. Эффективность создания на поверхности волокна защитного интерфазного покрытия для получения высокотемпературных ККМ [28–30] в существенной степени зависит от чистоты поверхности волокон, определяемой выбранным способом, степенью и качеством удаления аппрета.

Для удаления аппрета в работе использованы химический (отмывка с использованием органического растворителя) и термический (обработка в окислительной атмосфере при повышенных температурах) методы. Значения величины содержания аппрета, определенные по степени его удаления, при исследовании различными способами (экстракция и окисление при повышенной температуре кислородом воздуха) коррелируют между собой.

Исследование морфологии поверхности углеродных наполнителей показало отсутствие «мостиков» и крупных поверхностных дефектов после удаления аппрета, при этом более выражено просматривается фибриллярная структура волокон.

По результатам работы установлено, что уровень физико-механических характеристик углеродного волокна, отмытого от аппрета, существенно снижается по сравнению с исходным волокном. Кроме того, недостатком использования органических растворителей является их экологическая опасность.

Таким образом, представляется перспективным проведение дальнейших работ по исследованию и модифицированию поверхности углеродных волокон с предпочтительным удалением аппрета термическим способом.

Благодарности

Авторы выражают благодарность к.т.н. С.Ю. Сибилевой за предоставление оборудования для измерения динамического краевого угла смачивания, к.х.н. А.М. Шестакову за помощь в проведении экспериментов по его измерению, А.В. Ильичеву за выполнение исследований упруго-прочностных свойств микропластиков, к.т.н. О.Ю. Сорокину.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ-17-03-01163 «Исследование влияния условий формирования интерфазного покрытия и матричного материала на структуру и свойства сверхвысокотемпературного конструкционного керамоматричного композита класса C/(Zr–Si–C)».

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. 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. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
4. Хасков М.А., Шестаков А.М., Сорокин О.Ю., Гуляев А.И., Давыдова Е.А., Сульянова Е.А., Синяков С.Д. Термоаналитические исследования формирования интерфазного покрытия на основе систем поликарбосилан–олигосилазан–Роливсан // Тез. докл. III Всерос. науч.-технич. конф. «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники» (Москва, 17 июля 2017 г.). М.: ВИАМ, 2017. С. 1–14. URL: <https://conf.viam.ru/conf/250/proceedings> (дата обращения: 10.09.2017).
5. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 20–24.
6. Сорокин О.Ю. К вопросу о механизме взаимодействия углеродных материалов с кремнием (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 65–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-65-70.
7. Лебедева Ю.Е., Попович Н.В., Орлова Л.А. Защитные высокотемпературные покрытия для композиционных материалов на основе SiC // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. 2013. №2. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2017).
8. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2007. 192 с.
9. Бакланова Н.И. Интерфейсные покрытия на армирующих углеродных и карбидокремниевых волокнах для композитов с керамической матрицей: автореф. дис. ... докт. хим. наук. Новосибирск, 2010. 40 с.
10. Ткаченко Л.А., Шаулов А.Ю., Берлин А.А. Защитные жаропрочные покрытия углеродных материалов // *Неорганические материалы*. 2012. Т. 48. №3. С. 261–271.
11. Зайцев Б.Н., Бакланова Н.И., Зима Т.М. Исследование методом атомно-силовой микроскопии поверхностно-модифицированных углеродных волокон // *Неорганические материалы*. 2008. Т. 44. №6. С. 682–688.
12. Бакланова Н.И., Зима Т.М., Уткин А.В., Титов А.Т. Микроструктурные особенности TaC-покрытий на углеродных волокнах // *Неорганические материалы*. 2011. Т. 47. №7. С. 812–817.
13. Уткин А.В., Матвиенко А.А., Титов А.Т., Бакланова Н.И. Формирование и исследование многослойного ZrO₂-покрытия на карбидокремниевых волокнах для SiC/SiC-композитов // *Неорганические материалы*. 2011. Т. 47. №10. С. 1176–1181.
14. Углеродные волокна / под ред. С.М. Симамуры. М.: Мир, 1987. 304 с.
15. Morgan P. Carbon fibers and their composites. USA: CRC Press, 2005. 1131 p.
16. Кондрашова И.А., Чеблакова Е.Г., Евтеева Е.Е. Обработка углеродного волокна для дальнейшей эксплуатации в технологических процессах // *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). Технические науки*. 2015. №3 (12). С. 36–38.
17. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
18. Park S.-J. Carbon Fiber. Korea: Springer, 2015. 330 p.
19. Углеродные волокна Tenax® // Компания Toho Tenax: [офиц. сайт] // URL: <https://www.tohotenax.com/ru/produkcija%20d1%8f/uglerodny%D1%8be-volokna-tenax%20ae/zzgut%D1%8b-tenax%20ae/> (дата обращения: 10.09.2017).
20. Цуй Суй, Гусева Р.И., Ли Вэй, Чжан Линюни, Гао Юй. Анализ состояния поверхности высокопрочных композиционных материалов с углеродным волокном и исследование их механических характеристик // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2011. №IV-1 (8). С. 4–8.

21. Урванов С.А. Модифицирование углеродного волокна углеродными наноструктурами: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2016. 20 с.
22. Kern F., Gadow R. Liquid phase process for protective ceramic layers on carbon fibers // *Surface and Coatings Technology*. 2002. Vol. 151–152. P. 418–423.
23. Углеродные ткани // ООО «Аргон»: [офиц. сайт]. URL: <http://rus-carbon.ru/main/catalog/CarbonTk.aspx> (дата обращения: 10.09.2017).
24. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 387–393.
25. Ерасов В.С. Визуализация процессов испытания и экспериментальных данных в 3D-пространстве // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S4. С. 22–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-22-28.
26. Гуляев А.И., Шуртаков С.В. Количественный анализ микроструктуры граничного слоя «волокно–матрица» в углепластиках // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. 2016. №7. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8.
27. Нефедов Н.И., Хасков М.А., Петрова А.П., Бузник В.М. Исследование термических свойств фторпарафинов и гидрофобных покрытий на их основе // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. 2017. №2. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.09.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-11-11.
28. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // *Деловая слава России*. 2013. №2 (40). С. 4–9.
29. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
30. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.