

УДК 539.319:678.027.94

А.В. ГАЙДАЧУК¹, А.В. ЧЕСНОКОВ², И.В. ГУРИН³, А.М. ПОТАПОВ⁴¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина*² *Восточнoукраинский национальный университет им. В.Даля, Украина*³ *Национальный научный центр "ХФТИ", Украина*⁴ *Государственное предприятие «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля, Украина*

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПОЛНОГО ЦИКЛА ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УКРАИНЕ

Обоснована необходимость производства углерод-углеродных композиционных материалов в Украине. Выделены основные стадии производства материала и обоснована необходимость выполнения их без международной кооперации. Предложена концепция конкурентоспособного производства УУКМ в Украине, базирующаяся на отечественных разработках, не уступающих мировым аналогам. Обоснована необходимость применения коэффициентов технологичности при проектировании и производстве УУКМ. Выделена острая необходимость освоения производства углеродных волокон и ПАН и/или пекового прекурсора. Показано, что процессы изготовления армирующих каркасов и их насыщения пироуглеродом матрицы достаточно хорошо изучены, но необходимо уделить внимание их взаимодействию. Приведены технологии механической обработки и испытания УУКМ, применяемые в Украине. Предложено создать организацию, координирующую и внедряющую инновационные технологии производства УУКМ.

Ключевые слова: углеродное волокно, армирующий каркас, термостойкое насыщение, углерод-углеродный композиционный материал.

Введение

Совершенствование техники требует постоянного улучшения эксплуатационных характеристик применяемых материалов и технологий их изготовления. Углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ) получил широкое применение благодаря высокой температуре сублимации, высокой прочности при температурах свыше 2800°C, хорошему сопротивлению термическим и механическим нагрузкам, химической и радиационной стойкости, низкой плотности. УУКМ заслуженно привлекает внимание разработчиков изделий и оборудования, которое работает при высоких температурах в безокислительной среде. Создание конструкций современной ракетно-космической техники, используемых в условиях высоких температур и повышенных термомеханических нагрузок, не эффективно без применения деталей из УУКМ. В ракетно-космической технике используется примерно 18% от общего объема производства УУКМ, который в настоящее время составляет свыше 1000 т/год и увеличивается ежегодно. УУКМ используется для изготовления сопловых блоков, раструбов, наконечников спускаемых аппаратов, в кромках стабилизаторов, в элементах рулевых и маневровых двигателей космических аппаратов, что позволяет существ-

венно расширить ресурсы работоспособности конструкций и повысить их экономичность [1].

Требования к УУКМ, используемым в ракетно-космической технике, наиболее высокие по сравнению с другими сферами их применения и постоянно ставятся задачи повышения эксплуатационных характеристик. Совершенствование технологии производства УУКМ во всем мире относится к приоритетным направлениям, определяющим обороноспособность и научно-технический потенциал государства, владеющего ими [2].

Объемы мирового производства УУКМ постоянно увеличиваются, потому что технологии освоили КНР, Индия, Южная Корея и другие страны. После остановки гонки вооружений потребление УУКМ ракетно-космического назначения заметно уменьшилось. Развивается конверсионное применение УУКМ. Они стали интенсивно применяться для производства фрикционных и антифрикционных изделий, тиглей и пресс-форм, в медицине для производства имплантатов и др.

УУКМ состоит из углеродного армирующего каркаса (преформы), изготовленного из углеродных волокон, и углеродной или графитовой (пирографитовой) матрицы. Деталь и материал производятся одновременно. Можно выделить основные стадии работ над созданием изделия, отвечающего эксплуа-

тационным требованиям:

1. Анализ температурных, силовых и прочих воздействий на изделие. Расчет структуры и формы изделия.
2. Производство и подготовка углеродных армирующих материалов к переработке.
3. Изготовление армирующих каркасов.
4. Насыщение каркасов углеродом матрицы.
5. Механическая обработка.
6. Нанесение защитных покрытий в случае необходимости (SiC).
7. Сборка изделий.
8. Анализ полученных свойств изделия.

Каждая из перечисленных составляющих имеет целый ряд способов реализации, что существенно влияет на себестоимость получаемого изделия и его характеристики. Для обеспечения технологической готовности к производству изделий на основании научно обоснованных подходов необходимо реализовать функции технологической подготовки производства, включающие: обеспечение технологичности конструкции; разработку технологических процессов (ТП); проектирование и изготовление средств технологического оснащения; контроль и управление ТП.

Концепция производства

Для удовлетворения текущих потребностей ракетно-космического комплекса и других отраслей в изделиях из УУКМ и планируемого повышения спроса, поддержания конкурентоспособности отечественной техники, необходима разработка и реализация полного цикла производства их в стране.

Стабилизация свойств изделий возможна только при устойчивом выполнении всех ТП изготовления УУКМ, что позволяет снизить коэффициент запаса прочности изделия и его вес. Для обеспечения устойчивости ТП должны быть определены требования к каждому ТП и раскрыта их взаимосвязь.

Концепция производства изделий из УУКМ в Украине включает следующие принципы:

- обеспечение благоприятных условий выполнения каждого ТП изготовления деталей ЛА из УУКМ на основании определения критериев технологичности для каждого ТП;
- создание производства углеродных волокон на основе ПАН и/или пековых прекурсоров;
- обеспечение стабильности параметров АК и автоматизация их производства. Применение технологических методов повышения газопроницаемости АК, предотвращение повреждения армирующих волокон. Применение эффективных методов подготовки волокон к переработке;

- применение имеющейся производственной базы высокопроизводительного метода термоградиентного газофазного пироуглеродного уплотнения и совершенствование его применительно к насыщаемым АК и требованиям к изделию;

- применение имеющейся производственной базы по нанесению защитных покрытий;

- применение ресурсосберегающих технологий, позволяющих перейти на уровень безотходного производства;

- развитие методов прогнозирования свойств изделий и экспериментальных методик определения эксплуатационных характеристик;

- развитие методов, позволяющих анализировать жизненный цикл изделия.

Расчет и проектирование изделий

На стадии проектирования конструкции изделия из УУКМ важно точно определить комплекс воздействий и в зависимости от имеющихся параметров неопределенности как производственной, так и эксплуатационной применить рациональный коэффициент запаса по рассматриваемым характеристикам. Методики расчета постоянно совершенствуются, учитывая новые достижения в области производства УУКМ и расширяющиеся вычислительные возможности компьютеров. В работе [3] сформулированы тезисы основных особенностей проектирования и производства конструкций из УУКМ. Расчет и проектирование изделий из УУКМ должны быть неразрывно связаны с технологическими возможностями производства.

Стабилизация характеристик материала возможна при достижении высокого уровня воспроизводимости и устойчивости техпроцессов. Устойчивость всего комплекса техпроцессов производства изделий из УУКМ возможна только при их комплексном рассмотрении. И эти результаты в виде комплексных показателей технологичности должны быть приоритетными при разработке технических условий для производства изделий из УУКМ.

Для оценки технологической рациональности применен вектор качества выходных характеристик объектов производства:

$$K_i = (K_{i,1}, K_{i,2}, \dots, K_{i,j}),$$

где $K_{i,1}, \dots, K_{i,j}$ – частные качественные характеристики после $i^{\text{того}}$ ТП.

В качестве частных характеристик объектов производства применяются прочностные, геометрические и др. характеристики, получаемые измерением. Полный перечень измеряемых характеристик

задается в техническом задании на выполнение ТП. Условием приемлемости ТП является:

- для прочностных характеристик $K_{i,j} \geq K_{i,j}^{T3}$;

- для геометрических характеристик $K_{i,j} = K_{i,j}^{T3}$,

где $K_{i,j}^{T3}$ – параметр, указанный в техническом задании на выполнение ТП.

При проектировании деталей из УУКМ и разработке ТП необходимо применение принципов унификации для разработки эффективных ТП с высоким показателем гибкости производства. К параметрам рациональности конструкции и ТП относятся и показатели технологичности. Выявить показатели, наиболее полно отражающие достижение оптимальных затрат при производстве деталей, возможно на основании анализа технологического цикла их производства.

Оптимизация технологического цикла предусматривает построение модели, охватывающей все этапы изготовления изделия, с классификацией моделей по уровням детализации. Модели ТП являются взаимозависимыми. Для определения количественных закономерностей взаимовлияния и модели изготовления деталей из УУКМ в первую очередь определяются модели, оказывающие наибольшее влияние на взаимодействие ТП и определяющие требования к устойчивости ТП, из которых получают показатели технологичности. Модели, описывающие отдельные более самостоятельные процессы, определяют при рассмотрении ТП, в которые они входят.

Анализ взаимодействия ТП изготовления изделий из УУКМ на основе стержневых армирующих каркасов проведен в работе [4]. Выявлены исходные параметры процессов, факторы, влияющие на ход ТП и выходные параметры.

В дополнение к показателям технологичности, рекомендованных ГОСТ 14.205-83, определены специальные показатели технологичности, оказывающие влияние на устойчивость ТП и пригодность полученного полуфабриката к устойчивому выполнению последующих ТП изготовления изделий из УУКМ [5]. На этапе конструкторской подготовки производства рекомендуется сравнивать заданное наполнение АК волокном и его зернистость с предельно достижимыми значениями по направлениям армирования и в произвольной плоскости. Для расчета параметров наполнения АК волокном и зернистости выделяются повторяющиеся элементы, по которым и определяют сравниваемые параметры и их предельные значения. Получены коэффициенты армирования в произвольной плоскости сечения с учетом технологических возможностей для стержневых АК. Полученные размеры повторяющихся

элементов характеризуют зернистость структуры и применяются в качестве базовых показателей технологичности АК.

Для процессов с силовым взаимодействием, к которым относится сборка АК, параметром технологичности является минимальный коэффициент запаса прочности стержня, который определяется по отношению прочности стержней к прогнозируемым технологическим напряжениям.

Технологичность по параметру газопроницаемости определяется по отношению коэффициентов относительной проницаемости и диаметров минимальной и максимальной поры.

В Национальном научном центре (ННЦ) ХФТИ разработана теоретическая модель, которая позволяет прогнозировать конечную плотность композита в зависимости от плотности и удельного содержания наполнителя. Зная плотность волокна и его удельное содержание (плотность АК), можно определить максимальную конечную плотность композита, получаемого газозависимыми методами.

В зависимости от вида применяемых ТП изготовления изделий из УУКМ показатели технологичности будут отличаться.

Производство и подготовка армирующих материалов

В качестве углеродных армирующих материалов используются углеродные волокна (УВ), подготовленные к переработке в АК. Применяются жгуты, ткани и стержни.

Для производства термонагруженных изделий ракетно-космической техники применяются высококомодульные УВ на основе ПАН (полиакрилонитрил) или пековых прекурсоров, для менее ответственных конструкций применяются УВ на основе вискозы или комбинированные материалы, сочетающие несколько видов УВ. За последние, по крайней мере, 10 лет наибольший прогресс наблюдается в отрасли высокопрочных и высококомодульных углеродных ПАН УВ. Доминирующее положение в разработке и производстве этих материалов, как по качеству, так и по количеству, занимает Япония, особенно если учесть импорт японских технологий в США, Западную Европу и Юго-Восточную Азию. В СНГ основное количество УВ производится на двух предприятиях: ООО "Аргон" (г. Балаково, Россия) - производство на основе ПАН и РУП "Светлогорское ПО "Химволокно" (г. Светлогорск, Беларусь) - производство на основе вискозы. Оба предприятия имеют собственные мощности по производству прекурсора. В России и других странах идет интенсивное освоение передовой технологии производства УВ на пековой основе. В настоящее

время УВ поступают на украинский рынок, из Белоруссии (марки «Урал») и Российской Федерации (марки УКН). При стоимости существенно большей, чем мировые цены, эти УВ не обладают высокими характеристиками. Углеродные материалы производства Японии, США, Китая и тому подобное доступны лишь коммерческими партиями, а их закупка нуждается в заключении международных контрактов, к тому же экспорт высокомодульного УВ запрещен большинством стран.

В бывшем СССР Украина не располагала производством как УВ, так и ПАН-прекурсора. В то же время в Украине было создано мощное производство низкомолекулярных углеродных волокон функционального назначения из гидратцеллюлозных (ГЦ) волокон. Выпуск этих УВ осуществлялся на Броварском (ныне казенном) заводе порошковой металлургии, г. Бровары Киевской обл. и на Запорожском электродном заводе (ныне ОАО «Углекомпозит», г. Запорожье). Оба эти предприятия в настоящее время имеют свободные производственные площади, а по технической специализации являются наиболее близкими к восприятию новой технологии УВ из ПАН или пекового прекурсора.

Необходимо наладить производство в Украине определенных видов УВ, их марки целесообразно выбрать из наиболее освоенных и известных в мире УВ, выпускаемых, например, японской компанией Торей или их аналогов. Так, для средненагруженных изделий можно рекомендовать – УВ типа Т300, а для ракетно-космических изделий – УВ типа Т700, Т800, которые могут использоваться в термонагруженных изделиях [6].

При организации производства УВ в Украине полезно использовать традиционную технологическую схему, хорошо отработанную в компаниях-производителях УВ. Схема включает следующие основные операции: окисление волокон ПАН-прекурсора при 200-300⁰ С, низкотемпературную (800-1200⁰ С) и высокотемпературную (1500-1800⁰ С) карбонизацию с последующей поверхностной обработкой УВ. Следует отметить, что в этой технологии при переработке ПАН-прекурсора в УВ производители используют свои «Know how», которые подтверждаются практикой получения УВ.

Одной из главных особенностей получения качественного УВ является необходимость использования таких ПАН-прекурсоров, которые бы гарантированно обладали достаточно высоким уровнем физико-механических свойств. Поэтому ведущие компании-изготовители УВ стараются обеспечить полный производственный цикл: изготовление ПАН-прекурсора и выпуск УВ.

Изготовление жгутов, ровингов и матов осуществляется на производстве УВ, они имеют стандарт-

ные типоразмеры без привязки к конкретным изделиям. Производство тканей с заданным содержанием УВ и стержней ориентировано на определенные виды АК и их параметры должны согласовываться с требованиями к АК и ТП их изготовления и насыщения.

В Институте проблем материаловедения (ИПМ) НАН Украины разрабатывается технология текстильной переработки высокопрочных УВ в комбинированные ткане-вязаные полотна. В их структуре, наряду с высокомолекулярными УВ, располагаемыми в основе и утке полотна, применяют низкомолекулярные углеродные нити (из ГЦ) либо стеклянные, базальтовые или органические нити для связывания высокомолекулярных волокон трикотажными переплетениями [6]. Такие структуры позволяют наиболее полно реализовать преимущества каждого вида волокна [7].

ТП изготовления стержней для пространственных АК и прошивки слоистых АК разрабатываются в Восточнoукраинском национальном университете имени Владимира Даля (ВНУ им. В.Даля). Структура ТП и требования к технологическим этапам пултрузии стержней на углеводсодержащем связующем обоснована в работе [8]. Поиск оптимальных параметров изготовления стержней осуществляется на основе созданной модели, охватывающей весь ТП изготовления стержней и сборки АК.

Для раскрытия процессов на этапе пропитки-отжима пропитанный жгут представлен капиллярно-пористым телом, внутри которого происходит фильтрация жидкости. Однофакторные экспериментальные исследования этапа определили степень влияния технологических параметров на качество пропитки, которое оценивалось массой нанесенного связующего. В результате исследований определены основные значащие факторы этапа – давление пропитки и концентрация связующего.

Процесс сушки исследован для нахождения рационального режима теплопередачи. Определен механизм движения связующего при сушке полуфабриката в зависимости от направлений градиентов температуры и влагосодержания. Экспериментально определен диапазон подводимой энергии. Распределением связующего по сечению стержня можно управлять напряжением (фактор этапа), подводимым к углеродному жгуту.

На этапе формования во входном конусе фильеры происходит перераспределение связующего относительно волокон внутри полуфабриката. Для расчетов связующее представлено вязкопластичной системой. В результате предварительных однофакторных экспериментов определено рациональное расположение формирующих фильер и основные значащие факторы этапа – диаметр и количество фор-

мующих фильер. Применение «каскадного» формирования фильерами с уменьшающимся диаметром позволяет снизить повреждение волокон и стабилизировать диаметр стержня.

Выявлен эффект влияния стабильности выполнения этапов ТП на усилия сопротивления движению полуфабриката сквозь фильеры. Этот параметр предложено контролировать и при выходе за пределы – выполнять поднастройку ТП.

В результате исследований этапа протяжки определено влияние способа протяжки на эллипсность и искривление оси стержней. Получаемая эллипсность стержня до 0,03 мм и искривленность оси обусловлена случайными факторами – колебанием натяжения жгутов и их расположением по сечению стержня.

Модель ТП изготовления стержней и взаимосвязи отдельных этапов получена на основании планируемого многофакторного эксперимента по определенным ранее пяти ключевым факторам. При проведении экспериментов контролировались следующие параметры отклика: диаметр стержня, рассчитывались эффективные характеристики стержней, масса связующего в стержне, сопротивление движению полуфабриката сквозь отжимную и формирующую фильеру. Модель ТП изготовления стержней входит в модель изготовления изделий из УУКМ как структурный модуль. Оптимизация ТП изготовления стержней выполнена с учетом взаимосвязи ТП изготовления изделий из УУКМ [4]. Геометрические и прочностные характеристики стержней оказывают влияние на силовые параметры автоматической сборки АК и ее устойчивость. Целевой функцией оптимизации являлось повышение минимального коэффициента запаса прочности стержня при сборке АК. Результаты проведенных исследований создают научные основы разработки ТП подготовки жгутов к сборке с гарантированным обеспечением заданных технологических характеристик, разработаны методики контроля качества подготовки жгутов.

Тонкостенные АК для, например, закритической части сопла, получают плетением. Для качественного плетения без повреждения жгутов их поверхностная прочность должна противостоять технологическим нагрузкам, что достигается дополнительным шлихтованием. Процесс шлихтования по основным признакам аналогичен изготовлению углепластиковых стержней. Разработаны методики выбора шлихты, способа ее нанесения и оценки качества шлихтования, которую предложено проводить на установке, имитирующей взаимодействие жгутов [9].

Для реализации ТП изготовления стержней и шлихтования разработана технологическая установ-

ка. Производительность установки при изготовлении основного типоразмера стержней $\varnothing 1,19^{+0,03}_{-0,02}$ мм (на основе трех сложений жгута УКН-5000) составляет 2,0 м/мин, что соответствует выпуску стержней – 860 гр/час [10].

Изготовление армирующих каркасов

АК дает возможность реализовать заданные свойства материала в разных направлениях готового изделия. Основными способами изготовления АК являются: намотка, прошивка слоистого материала, плетение и сборка стержневых АК.

Процессы намотки достаточно хорошо изучены и не представляют технологической сложности, как и подготовка слоистых АК. Процессы прошивки слоистого пакета полый иглой и непосредственно стержнем рассмотрены в [11]. Определено влияние схемы и шага расположения стержней, а также угла их наклона на прочность при поперечном отрыве, выработаны рекомендации по расположению стержней при трансверсальном армировании, спроектировано устройство прошивки полый иглой [12]. Определено сопротивление проникновению стержня вглубь плетеных слоев и механизм взаимодействия конуса стержня с волокнами основной арматуры, основанный на учете деформационных процессов, связанных с изменением амплитуды плетения и проскальзыванием элементов плетеной структуры материала при введении стержня.

Для термонагруженных деталей ракетно-космической техники применяют в основном материалы, производимые под марками «Десна» и КИМФ. «Десна» производится насыщением предварительно собранного стержневого АК (рис. 1, а) углеродом матрицы из жидкой фазы. АК для КИМФ изготавливают плетением (рис. 1, б), насыщают углеродом матрицы газофазным термоградиентным методом.



Рис. 1. Армирующие каркасы

Преимущество стержневого АК в прямолинейности и равномерности расположения армирующих волокон. Данных по насыщению стержневых АК

пироуглеродом матрицы нет, хотя такой материал объединяет преимущества двух материалов и его характеристики должны быть выше.

Сборка стержневых АК производится с помощью приспособлений, обеспечивающих соблюдение схемы армирования, расстояний между стержнями и углов между семействами стержней. Такой метод сборки является весьма гибким, так как позволяет добиться соответствия структурно-геометрических параметров АК конструкции изделия. Стабильность расположения арматуры и ее количества в каждом направлении армирования позволяют оптимально спроектировать термонагруженные изделия. Наиболее перспективными и стабильными по свойствам в настоящее время являются материалы, полученные на основе стержневых АК 4D и 4D-л структур.

Сборка АК выполняется в две операции – установка вертикальных стержней в направляющие плиты и укладка слоев горизонтальных стержней. Исследованиями ТП, оборудования и оптимизацией процессов сборки АК успешно занимаются в ВНУ им. В.Даля [10].

Разработано оборудование для установки вертикальных стержней перемещением их по вибрирующей плите к отверстиям и после попадания – вдоль них.

Для раскрытия закономерностей движения стержней по вибрирующей поверхности и поиска рациональных параметров вибрации описано движение массива стержней в зависимости от направления и интенсивности вибрации. В работе [13] показаны режимы движения стержней в зависимости от параметров вибрации. Экспериментальные исследования позволили определить рациональные параметры вибрации, позволяющие получать почти 100% заполнение отверстий направляющей плиты стержнями под действием вибрации.

В разработанном оборудовании укладки слоев горизонтальных стержней закономерно повторяется подача стержня роликами по направляющей между рядами вертикальных стержней на заданную глубину и его обрезка. После набора слоя стержней выполняется опрессовка и поворот АК, набор слоев выполняют до заданной высоты. В результате комплексных исследований напряжений, возникающих на этапе подачи стержня [14], определен характер взаимодействия стержня с роликом и параметры подающего устройства, определено поведение стержня в направляющей и критическая сила потери устойчивости стержня. Экспериментально исследованы силовые параметры подачи стержня в АК от глубины внедрения. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими зависимостями взаимодействия стержней, полученных ранее [10]. Проведены исследования силовых параметров оп-

рессовки слоя горизонтальных стержней для АК структуры 4D-л от габаритов собираемого АК. Обрезка поданного в АК стержня выполняется у АК. Проведены исследования влияния угла и вида реза на стойкость инструмента и деформацию торца стержня.

Оборудование ориентировано на изготовление стержневых АК изделий с габаритами, не превышающими внешний $\varnothing 530$ мм, с отверстием $\varnothing 245$ мм и высотой до 350 мм.

Применение разработанного оборудования установки вертикальных стержней вибрацией позволяет снизить трудоемкость по сравнению с ручным способом в 64 раза. Установка укладки слоев горизонтальных стержней позволяет уложить 292 слоя стержней с 249 стержнями (параметры приведенного АК структуры 4D-л) за 240 чел/час, что в 6 раз меньше по сравнению с ручной сборкой, улучшены условия работы сборщиков. Для повышения производительности на установке размещено два самостоятельных узла подачи стержня. Высокая точность позиционирования и подачи стержня достигнута применением шаговых приводов [10].

Плетение является одним из высокопроизводительных способов изготовления АК. Термонагруженные тонкостенные изделия ракетно-космической техники, например, закритическая часть сопла, должны иметь определенное и заранее обоснованное количество УВ. Для обеспечения этих требований с учетом изменяющейся формы раструба по длине проведены исследования и получены закономерности для управления процессом плетения АК.

Получена взаимосвязь геометрических параметров расположения волокон в плетеном слое от технологических параметров и текущего радиуса оплетаемого дорна. Получена зависимость скорости движения дорна от параметров плетения для структуры с постоянной и максимальной плотностью АК. Используя реальную форму сечения оплеточных жгутов, определены ограничивающие факторы плетения. Полученные данные изменения степени наполнения волокном слоя от параметров плетения показывают предпочтительность использования 2D структуры плетения [9].

Определено изменение прочности при поперечном отрыве при армировании плетеного слоя стержнями в трансверсальном направлении до 40%.

Насыщение углеродом матрицы

Процесс уплотнения и исходный материал матрицы должны соответствовать типу каркаса и обеспечивать заданные свойства конечного изделия. В зависимости от фазового состояния углеродсодержащих веществ различают следующие способы соз-

дания углеродной матрицы: из газовой фазы – с применением газообразных углеводородов (природный газ, метан, пропан-бутан, бензол и т.д.); из жидкой фазы – с применением жидких углеводородов, характеризующихся высоким содержанием углерода и большим процентом выхода кокса (пеки, смолы); комбинированный.

Основным недостатком жидкофазных технологий является большая длительность технологического процесса - от 2 до 12 месяцев. Кроме того, существует проблема заполнения закрытых пор типа «коробочка», которые образуются при плотной укладке волокон в местах их пересечения.

Длительность производственного процесса получения плотного УУКМ обусловлена, прежде всего, необходимостью многократного повторения (до 6-8 раз) циклов пропитки исходного АК смолами или пеком с дальнейшей карбонизацией и/или графитацией для образования углеродной или графитовой матрицы. Метод применяется в крупносерийном производстве изделий из УУКМ в Российской Федерации и других странах. Воссоздание жидкофазного метода насыщения в Украине возможно, но экономически не оправдано.

Изотермические газофазные методы очень длительны (~600 часов) и требуют, как минимум, 2-3 цикла уплотнения. После каждого цикла необходимо удалять плотную поверхностную корку, чтобы открыть транспортные поры для диффузии газа. Эти операции помимо увеличения длительности процесса изготовления ведут к бесполезному расходу материала, что существенно увеличивает стоимость УУКМ. Тем не менее, эти методы до сих пор востребованы, поскольку позволяют проводить одновременное уплотнение ряда различных деталей сложной формы в одном процессе.

Термоградиентные газофазные методы впервые в мире были разработаны и запатентованы в 1961-1963 годах в Украине в ННЦ ХФТИ [2]. Эти методы лишены перечисленных недостатков - они одностадийные и достаточно быстры, а также пироуглеродная матрица имеет более высокие эксплуатационные свойства. Общеизвестно, что термоградиентные газофазные методы на сегодня являются самыми быстрыми, самыми экономичными и самыми эффективными для получения УУКМ. В ННЦ ХФТИ продолжается успешное усовершенствование методов. За последние годы удалось повысить эффективность процессов уплотнения пироуглеродом, сократить расходы материалов, электроэнергии и углеводородов и, соответственно, уменьшить себестоимость изделий из таких материалов, поддерживая свой потенциал на уровне лучших мировых достижений [15]. Научно-производственный комплекс ННЦ ХФТИ рассчитан на производство 40 тонн вы-

сокоплотного УУКМ в год. В ННЦ ХФТИ находятся в рабочем состоянии и эксплуатируются 12 газофазных печей различных типов. Наибольшая установка (ГФ-3) позволяет проводить уплотнение изделий с габаритными размерами до 2,5-3 м. Установки конструировались в ННЦ ХФТИ в первую очередь для реализации газофазных технологий получения углерод-углеродных материалов [16]. Печи проектировались максимально универсальными и позволяют решать следующие научные и технологические задачи:

- производить термоградиентное газофазное уплотнение пироуглеродом пористых порошковых и волоконных АК;
- осуществлять изотермическое газофазное уплотнение пористых материалов и изделий;
- графитировать и рафинировать графитовые и углеродные материалы при температурах до 2500-3000 °С в условиях радиального градиента температуры или в изотермических условиях;
- проводить нанесение поверхностных защитных покрытий на изделия.

До недавнего времени не удавалось получить высокую плотность УУКМ на основе стержневых АК из-за недостаточной их газопроницаемости. В АК стержни имели высокую поверхностную плотность, что не только не позволяло заполнять поры через стержень, но и недостаточно заполнялись микропоры внутри стержня. Данная проблема решена за счет изменения связующего и запатентованной технологии повышения газопроницаемости АК [17].

Механическая обработка и сборка

Механическая обработка УУКМ выполняется как на стадиях его изготовления для снятия поверхностного слоя закупорившего поры, так и после изготовления для получения деталей требуемого качества. При механической обработке УУКМ наблюдаются совершенно другие физико-химические процессы, не свойственные процессу резания металла. Это разрушение армирующих волокон, водопоглощение, деструкция матрицы. Исследование процесса резания УУКМ сводится в большинстве случаев к определению рациональных режимов их обработки. Механическая обработка осуществляется твердосплавным и алмазным режущим инструментом. Для обработки УУКМ применяются металлорежущие станки со средствами интенсивного пылеудаления.

В научно-производственном комплексе ННЦ ХФТИ предусмотрены две механические мастерские, оборудованные специальной вентиляционной системой для работы с графитовой пылью. Разработано и изготовлено специальное технологическое

оборудование, которое позволяет заменить процессы резания на процессы шлифования алмазными дисками.

В работе [18] приведены результаты исследований обработки УУКМ с помощью мощных технологических лазеров. Лазерная обработка позволяет создать на поверхности изделия слой материала с изменённым по отношению к основной массе структурно-фазовым составом и на промежуточной стадии изготовления изделий изменить пористую структуру материала (увеличить открытую пористость). Лазерная обработка УУКМ ведёт к графитации материала в зоне лазерного воздействия и к увеличению стойкости обработанного материала от 1,5 до 10 раз в кислородсодержащих газовых средах при высоких температурах. Возможно нанесение защитных покрытий на УУКМ методом лазерной наплавки.

УУКМ размещаются внутри корпусных элементов или присоединяются к ним с помощью шпилек, болтов и винтов из углерод-углерода специальной структуры армирования (намотка с нуля).

Предполагается разработка методов сварки неразъёмных соединений УУКМ с титановыми сплавами

Анализ эксплуатационных свойств

Испытания УУКМ при комнатной температуре не представляют сложности. Для проведения испытаний УУКМ при повышенных температурах в СКТБ Института проблем прочности НАН Украины спроектирована испытательная машина УУКМ-2200 [19], предназначенная для испытания образцов из УУКМ на прочность при изгибе и растяжении в вакууме при температуре от 20 до 2200 °С. Известны публикации [20] о разработке методик и оборудования для проведения исследований прочности и долговечности композиционных материалов при программном тепловом и силовом нагружении в условиях температур до 3300 К. В ННЦ ХФТИ возможно проведение аналогичных исследований и в дальнейшем определить теплопроводность и КЛТР УУКМ.

Проведение испытаний на воздействие теплового удара и определение абляции материала представляет определенную сложность, так как испытание материалов в условиях реально работающего ракетного двигателя на стенде стоит слишком дорого. В [21] изложена методика проведения испытаний на разрушение материалов в потоке нагретого газа, поток имитируется с помощью плазматрона. Аналогичные исследования проводились с помощью плазматрона, разработанного в Институте геотехнической механики НАН Украины (г. Днепропет-

ровск). Конструкция плазматрона обеспечивала получение мощности плазменного газового потока до 300 кВт и температуру 2500...3500 К, что позволило использовать его для испытаний образцов. На плазматроне ВГУ-3 были проведены 100-цикловые испытания натурной теплозащитной плитки из УУКМ с боросиликатным покрытием [22]. Аналогичные испытания можно проводить на высокоресурсных плазматронах серии П-24 (разработка ВНУ им. В.Даля) для увеличения времени воздействия потока плазмы на УУКМ.

Значительных результатов в испытании теплозащитных материалов достигнуто в ИПМ им. И.М. Францевича, где спроектированы и используются уникальные установки, создающие потоки энергии с высокой энтальпией [21].

С января 2007 года ГП "КБ "Южное" им. М.К. Янгеля и ГП ПО ЮМЗ проводят огневые конструкторские испытания маршевого двигателя многократного включения РД861К третьей ступени РН "Циклон-4". В 2008 году были проведены испытания трех двигателей, в том числе со штатным сопловым насадком из УУКМ. На одном испытании продолжительностью 102 секунды экспериментально проверена эрозионная стойкость УУКМ в рабочих условиях, а также экспериментально подтверждена работоспособность узла стыка соплового насадка из УУКМ с корпусом камеры в более тяжелых условиях [23].

Выводы

Украина – одна из немногих стран, где накоплен научно-технический потенциал подготовки армирующих материалов, изготовления АК и насыщения пироуглеродом матрицы современными термостойкими методами на уровне мировых достижений. Для создания независимого полного цикла изготовления изделий из УУКМ, а значит, стабильно обеспечивающего высокое качество и конкурентоспособность изделий, необходимо имеющийся комплекс дополнить производством УВ и ПАН и/или пекового прекурсора.

Для эффективной работы всех стадий изготовления изделий из УУКМ рационально создать мощную холдинговую компанию с научно-исследовательским отделом, обеспечивающим координацию и внедрение инновационных технологий в производство, аналогично российскому ХК «Композит» [24].

УУКМ востребованы на отечественном рынке для производства изделий ракетно-космической техники, фрикционных и антифрикционных изделий, тиглей и пресс-форм, в медицине для производства имплантатов и др., а также они востребова-

ны на мировом рынке, и в дальнейшем возможна реализация экспортных поставок.

Литература

1. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології: підручник [Текст] / Ф.П. Санін, Л.Д. Кучма, Є.О. Джур, А.Ф. Санін. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетровського ун-ту, 1999. – 318 с.
2. Гурін, В.А. Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов [Текст] / В.А. Гурін, В.Ф. Зеленский // Вопросы атомной науки и техники. – 1999. – №4 (76). – С. 13–31.
3. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций [Текст] / Ю.В. Соколкин, А.М. Воинов, А.А. Ташкинов и др.; под общ. ред. А.М. Воинова. – М.: Наука, 1996. – 240 с.
4. Чесноков, А.В. Модель взаимодействия технологических процессов изготовления стержневых армирующих каркасов [Текст] / А. В. Чесноков // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2010. – № 1 (68). – С. 16–21.
5. Чесноков, А.В. Показатели производственной технологичности изделий из углерод-углеродного композиционного материала [Текст] / А.В. Чесноков // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ, 2009. – С. 215–220.
6. Вишняков, Л.Р. Тенденции развития и перспективы выпуска в Украине углеродных материалов на основе ПАН-волокон для композиционных материалов [Текст] / Л.Р. Вишняков // Технологические системы. – К.: УкрНИИАТ, 2012. – № 1 (58). – С. 32–38.
7. Комбіновані вуглець-вуглецеві матеріали для ендопротезів [Текст] / В.А. Гурін, І.В. Гурін, В.І. Тарасенко, А.А. Тяжелов, Л.Р. Вишняков // Медицина и ... – 2008. – № 3 (21). – С. 88–91.
8. Чесноков, А.В. Разработка и анализ технологии изготовления углепластиковых стержней на углеводосодержащем связующем [Текст] / А.В. Чесноков // Вестник Двигателестроения. – 2010. – № 1. – С. 17–21.
9. Чесноков, А.В. Исследование влияния технологических параметров плетения на структуру поверхностного слоя [Текст] / А.В. Чесноков // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 3 (50). – С. 37–40.
10. Чесноков, А.В. Основы технологической подготовки производства деталей из углерод-углеродных композиционных материалов с прямолинейными волокнами [Текст]: моногр. / А.В. Чесноков. – Луганск: Изд-во «Ноулідж», 2010. – 249 с.
11. Чесноков, О.В. Дослідження взаємодії стержня з облітальним матеріалом при трансверсальному армуванні композиційного матеріалу [Текст] / О.В. Чесноков, В.Б. Ігнат'єва // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2008. – Вып. 5 (56). – С. 39–48.
12. Чесноков, А.В. Исследование влияния трансверсального армирования на прочность плетеного композиционного материала [Текст] / А.В. Чесноков, Е.Е. Бакст // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 51–54.
13. Чесноков, А.В. Повышение производительности установки вертикальных стержней армирующих каркасов УУКМ [Текст] / А.В. Чесноков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2009. – Вып. 4 (60). – С. 19–27.
14. Чесноков, А.В. Анализ напряженного состояния стержня в подающем узле установки автоматизированной сборки армирующих каркасов [Текст] / А. В. Чесноков // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 4 (51). – С. 9–14.
15. Гурін, І.В. Розробка та дослідження новітніх матеріалів на піровуглецевій зв'язці для сучасної енергетики, машинобудування та медицини [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / І.В. Гурін; Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України. – Харків, 2011. – 21 с.
16. Гурін, В.А. Термоградиентные газофазные печи ННЦ ХФТИ [Текст] / В.А. Гурін, И.В. Гурін, В.В. Гуйда // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении: научно-практический симпозиум, ОТТОМ 28-31 августа 2000 г.: тезисы докл. – Х., 2000. – С. 30–35.
17. Пат. 41256 Украина, МПК⁹ C04B 35/83. Способ изготовления просторовых армирующих структур [Текст] / О.В. Чесноков, О.М. Потапов; Заявитель и патентообладатель Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № u200815079; заявл. 26.12.08; опубл. 12.05.09, Бюл. № 9. – 4 с.
18. Кузнецов, С.И. Применение лазерного излучения для модификации поверхности и раскроя углеродных композиционных материалов и углеродных тканей [Текст] / С.И. Кузнецов, А.Л. Петров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2003. – Т. 5, №1. – С. 46–54.
19. Экспериментальное оборудование для оценки характеристик прочности углерод-углеродных композиционных материалов в диапазоне температур от 20 до 2200 °С [Текст] / А.Н. Неговский, А.В. Дроздов, В.В. Кутняк, Ю.А. Ножницкий, А.Н. Менишков, Шэнжу Чао, Шинхун Бэн // Проблемы прочности. – 1999. – № 3. – С. 130–138.
20. Дзюба, В.С. Установка для исследования прочности и долговечности композиционных материалов при программном тепловом и силовом нагружении в условиях температур до 3300 К [Текст] / В.С. Дзюба, С.В. Оксюк // Проблемы прочности. – 2004. – № 5. – С. 113–116.
21. Полежаев, Ю.В. Тепловое разрушение материалов [Текст] / Ю.В. Полежаев, Г.А. Фролов; под ред. В.В. Сорохова. – К.: Академперіодика, 2006.

– 354 с.

22. Исследование окислительной стойкости УУКМ при воздействии высокотемпературного газового потока [Текст] / А.М. Потапов, Ю.В. Штефан, В.Ф. Назаренко, Е.А. Личман // Композиционные материалы в промышленности: материалы Двадцать шестой междунар. конф., 29 мая – 2 июня 2006 г., г. Ялта – Киев. – С. 178–180.

23. Ход отработки маршевого двигателя третьей ступени РН "Циклон-4" РД861К [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yuzhnoye.com>. – 5.12.2012.

24. ХК Композит [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.compozit.su>. – 5.12.2012.

Поступила в редакцию 05.12.2012, рассмотрена на редколлегии 12.12.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры авиационного материаловедения Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков.

ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ ПОВНОГО ЦИКЛУ ВИРОБНИЦТВА ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В УКРАЇНІ

О.В. Гайдачук, О.В. Чесноков, І.В. Гурін, О.М. Потапов

Обґрунтовано необхідність виробництва вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів в Україні. Визначено основні стадії виробництва матеріалу і обґрунтовано необхідність виконання їх без міжнародної кооперації. Запропоновано концепцію конкурентоспроможного виробництва ВВКМ в Україні, що базується на вітчизняних розробках, які не поступаються світовим аналогам. Обґрунтовано необхідність застосування коефіцієнтів технологічності при проектуванні і виробництві ВВКМ. Виділено гостру необхідність освоєння виробництва вуглецевих волокон і ПАН і/чи пекового прекурсора. Показано, що процеси виготовлення армуючих каркасів і їхнє насичення піровуглецем матриці достатньо вивчені, але необхідно приділити увагу їхній взаємодії. Наведено технології механічної обробки і випробування ВВКМ, що застосовуються в Україні. Запропоновано створити організацію, що координує і впроваджує інноваційні технології виробництва ВВКМ.

Ключові слова: вуглецеве волокно, армуючий каркас, термоградієнтне насичення, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал.

PREREQUISITE FOR COMPLETE CYCLE OF PRODUCTION OF CARBON-CARBON COMPOSITE IN UKRAINE

A.V. Gaydachuk, A.V. Chesnokov, I.V. Gurin, A.M. Potapov

The necessity of carbon-carbon composite (CCC) production in Ukraine is grounded. The basic stages of material production are selected and the necessity their implementation is grounded without international co-operation. The concept of CCC competitive production based on the domestic developments which are not worse than the world analogue is offered in Ukraine. The necessity of coefficients adaptability is grounded while developing and producing CCC. The urgent necessity of production improvement of carbon fibers and PAN is selected and/or pitch precursor. It is shown that the processes of reinforcing frameworks the preforms which are saluted with thermal gradient CVI it are well enough studied, but it is necessary to pay attention to their interconnection. The technologies of CCC mechanical machining and testing applied in Ukraine are given. It is suggested to create the organization, coordinating and introducing the innovative technologies of CCC production.

Key words: carbon fiber, reinforcing framework, thermal gradient CVI, carbon-carbon composite (CCC).

Гайдачук Александр Витальевич – д-р техн. наук, профессор, проректор по НР, зав. кафедры ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков, Украина.

Чесноков Алексей Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга, Восточноукраинский национальный университет им. В.Даля, Луганск, Украина, e-mail: chesnokov@snu.edu.ua.

Гурин Игорь Вячеславович – канд. техн. наук, н.с. отдела графитовых, углеродных и углерод-углеродных материалов, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", Харьков, Украина, e-mail: gurin@kipt.kharkov.ua

Потапов Александр Михайлович – канд. техн. наук, начальник комплекса новых материалов и перспективных технологий, Государственное предприятие «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля, Днепропетровск, Украина.