

УДК 539.319:678.027.94

А.В. ЧЕСНОКОВ<sup>1</sup>, А.В. ГАЙДАЧУК<sup>2</sup>, А.М. ПОТАПОВ<sup>3</sup>, И.В. ГУРИН<sup>4</sup><sup>1</sup> Восточноукраинский национальный университет им. В.Даля, Украина<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина<sup>3</sup> Государственное предприятие КБ «Южное» им. М.К. Янгеля, Украина<sup>4</sup> Национальный научный центр "ХФТИ", Украина

## ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведен анализ состояния потребностей ракетно-космической отрасли в УУКМ с высокими эксплуатационными характеристиками. Подытожен накопленный научно-технический потенциал отечественных организаций в проектировании и производстве аналогичных материалов. Сформулированы перспективы усовершенствования технологии изготовления УУКМ, направленные на повышение эксплуатационных характеристик и снижение себестоимости изготовления материала. Определен перечень работ, выполнение которых позволит решить весь комплекс задач по разработке, изготовлению и испытанию нового УУКМ, изготовленного на основе стержневого армирующего каркаса из углепластиковых стержней на углевод содержащем связующем с матрицей, полученной СВИ методом.

**Ключевые слова:** стержневой армирующий каркас, термоградиентное насыщение, термонагруженные узлы летательных аппаратов, газопроницаемость, углевод содержащее связующее.

### Состояние проблемы

Совершенствование техники требует постоянного улучшения эксплуатационных параметров применяемых материалов и технологий их изготовления. Углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ) получил широкое применение благодаря высоким прочностным характеристикам, стойкости к тепловому удару, КЛТР близкому к нулю и др., более широкое применение этого материала прогнозируется за счет снижения стоимости исходного сырья – углеродного волокна [1]. Совершенствование технологии производства УУКМ во всем мире относится к приоритетным направлениям, определяющим обороноспособность и научно-технический потенциал государства, владеющего ими [2]. В ракетно-космической технике используется примерно 18% от общего объема производства УУКМ, который в настоящее время составляет свыше 1000 т/год и увеличивается ежегодно. Требования к УУКМ, используемым в ракетно-космической технике, наиболее высокие по сравнению с другими сферами их применения и постоянно ставятся задачи повышения эксплуатационных характеристик.

УУКМ состоит из углеродного армирующего каркаса (АК) и углеродной матрицы, каждая из составляющих имеет целый ряд способов осуществления, что существенно влияет на себестоимость получаемого материала и его характеристики. Армирующий каркас дает возможность реализовать за-

данные свойства материала в разных направлениях готового изделия. Термическими, химическими и физическими свойствами композита можно управлять путем соответствующего расчета таких параметров армирующего каркаса, как ориентация волокон, объемное содержание волокон, в требуемых направлениях, шаг волокон, плотность каркаса, тип нити и вид волокон [3]. В настоящий момент произведена классификация пространственно-армированных структур (ПАС) [4] и заложены основы прогнозирования свойств материала [4, 5].

Основными способами изготовления ПАС являются: намотка, прошивка слоистого материала, плетение и сборка АК из полуфабрикатов – стержней. УУКМ со стержневым АК обладает более высокими и стабильными характеристиками благодаря равномерности заполнения объема материала волокном, его целостности и прямолинейности. Сборка АК из предварительно сформированных углепластиковых стержней (УС) 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 элементы летательных аппаратов, прогнозировать возможный ха-

раक्टर их разрушения в процессе эксплуатации. Наиболее перспективными и стабильными по свойствам в настоящее время являются материалы, полученные на основе стержневых АК 3D, 4D и 4D-л структур. Технология изготовления УС изложена в работе [6], в качестве связующего использован водный раствор поливинилового спирта и проведены комплексные исследования автоматизации процесса сборки АК [7].

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 создания 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 – использующий сочетание указанных методов в заданной последовательности. Большинство УУКМ производят по жидкофазным технологиям, и только небольшая часть газовой фазой изотермическим или термоградиентным способом. Основным недостатком жидкофазных и газовой фазой изотермических технологий является большая длительность технологического процесса – от 2 до 12 месяцев. В случае жидкофазных методов большая длительность производственного процесса получения плотного УУКМ обусловлена, прежде всего, необходимостью многократного повторения (до 6-8 раз) циклов пропитки исходной преформы на основе углеродных волокон смолами или пеком с дальнейшей карбонизацией или графитацией для образования углеродной или графитовой матрицы. Изотермические методы очень длительны (~600 часов) и требуют как минимум 2-3 циклов 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. Термоградиентные газовой фазой методы лишены этих недостатков – они одностадийные и достаточно быстры [8], а также пироуглеродная матрица имеет более высокие эксплуатационные свойства.

На эксплуатационные характеристики УУКМ важное влияние оказывает его монолитность и окислительная стойкость [9], которая достигается выбором исходных материалов и технологических приемов, которые позволяют обеспечить максимальное заполнение пористости углеродной матрицы в материале, а также сформировать модифици-

рованную углеродную матрицу в микрообъемах структурных элементов (межфиламентной и межслоевой зонах).

Стержневые АК, структур 3D, и 4D-л из УС на основе углеродного волокна УКН-5000 и водного раствора ПВС были изготовлены в Восточноукраинском национальном университете им. В.Даля, г. Луганск и насыщены углеродом матрицы из жидкой фазы в ГУП НИИГрафит, г. Москва. Полученный материал имел хорошие механические характеристики и плотность  $1,8 \text{ г/см}^3$ . Попытка улучшить характеристики материала и снизить его себестоимость за счет насыщения указанных АК углеродом матрицы, используя термоградиентный газовой фазой метод, не позволила достичь высоких результатов.

Публикаций по совместному применению двух наиболее перспективных технологий: стержневой АК и газовой фазой термоградиентный метод уплотнения, нет, возможно, по причине специального назначения таких материалов.

### Анализ проблемы

Анализ образцов материала, полученных термоградиентным газовой фазой методом уплотнения стержневого АК структуры 3D с низкой плотностью, позволяет сделать вывод, что армирующий каркас имел недостаточную газопроницаемость. Проведенные в работе [10] исследования по распределению пор в каркасах различных структур подтверждают наличие крупных закупоренных пор в структуре 3D, что относит ее к нежелательной для газовой фазой насыщения углеродом матрицы, рекомендуется использовать 4D-л структуру, более трудоемкой в изготовлении, но с хорошим распределением пор является структура 4D. Ухудшает газопроницаемость АК высокая поверхностная плотность УС, что не только не дает возможность заполнять поры через стержень, но и недостаточно заполняются микро поры внутри стержня.

Улучшение качества насыщения каркаса возможно за счет снижения поверхностной плотности УС. Для определения вариантов снижения поверхностной плотности УС рассмотрим подробнее причину ее образования. Изготовление УС выполняется на ПВС связующем рациональность применения которого обоснована в работе [6], но подбор выполнялся для жидкофазного насыщения углеродом матрицы и изготовления стержней пултрузией с обязательным поэтапным формованием [11], что уплотняет поверхность стержня. При термообработке ПВС связующее выгорает, давая коксовый остаток с открытой пористостью, но филаменты жгута остаются скрепленными и не происходит существенного увеличения пор.

Отрабатывался вариант удаления ПВС связующего из каркаса после его сборки. Но так как основная масса связующего была полимеризована в процессе изготовления стержней, удалить его практически невозможно. Снизить температурный режим изготовления стержней для получения не полимеризованного связующего нельзя, так как происходит существенное снижение несущей способности стержня, и он не будет пригоден для сборки АК [12].

Решение данной проблемы возможно за счет изменения связующего. Основными требованиями к связующему должны быть: пригодность для непрерывного метода изготовления стержней, полученные стержни должны соответствовать прочностным требованиям к автоматизированной сборке АК, получение открытой пористости коксового остатка при термообработке, возможность удалять связующее после сборки АК.

Подробный анализ веществ по указанным требованиям позволил рекомендовать водный раствор углеводов, наиболее распространенным из которых является  $C_{12}H_{22}O_{11}$ . Углевод хорошо растворяется в воде, вязкость раствора зависит от концентрации углевода и температуры, раствор имеет хорошую адгезию. При удалении воды или снижении температуры раствор переходит в твердое состояние без полимеризации. Полученный материал прочный имеет хрупкий излом, температура плавления 185-186°C, может быть повторно растворен в воде и удален из волокна.

### Выводы

Проведенный выше краткий анализ состояния потребностей ракетно-космической отрасли в высококачественных УУКМ и накопленный научно-технический потенциал отечественных организаций в проектировании и производстве аналогичных материалов подтверждают перспективность выбранного направления исследований, направленных на повышение эксплуатационных характеристик материала и снижение себестоимости его изготовления.

Для получения материала по предложенной технологии необходимо:

1. Разработать технологический процесс изготовления УС на водном растворе углеводов.
2. Спроектировать и изготовить оборудование непрерывного изготовления УС.
3. Произвести отработку технологического процесса для определения рациональных диапазонов варьирования технологических параметров процесса и степени их влияния на прочность стержней.
4. Проверить собираемость каркасов на полученных стержнях.

5. Разработать технологию удаления связующего без изменения расположения волокон.

6. Произвести насыщение полученного АК термоградиентным газофазным методом.

7. Произвести сравнительный анализ полученного материала с аналогами.

### Литература

1. Вишняков Л.Р. Комплексный подход к автоматизации заготовительного производства УУКМ / Л.Р. Вишняков, В.И. Цариковский // Тенденции развития производства углеродных материалов на основе пан-волокон: материалы Двадцать седьмой международной конференции, 26 - 30 мая 2008 г., Ялта – Киев: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2008. – С. 197-201.

2. Гурин В.А. Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов / В.А. Гурин, В.Ф. Зеленский // Вопросы атомной науки и техники: сб. науч. труд. – X., 1999. – №4. – С. 13-31.

3. Основы механики и технологии композиционных материалов: учеб. пособие / Г.Е. Фрегер, М.Д. Аптекарь, Б.Б. Игнатъев, В.В. Чесноков и др. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В.Даля, 2004. – 637 с.

4. Тарнопольский Ю.М. Пространственно-армированные композиционные материалы: справочник / Ю.М. Тарнопольский, И.Г. Жигун, В.А. Поляков. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

5. Технология и проектирование углерод-углеродных композитов и конструкций / Ю.В. Соколкин, А.М. Вотинков, А.А. Ташиков и др.; Под общ. ред. А.М. Вотинкова. – М.: Наука: Изд. фирма "Физ.-мат. лит.", 1996. – 240 с.

6. Чесноков А.В. Технологический процесс изготовления углепластиковых стержней для углерод-углеродных композитов / А.В. Чесноков // Вісн. Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В.Даля. – Луганськ, 2002. – №7 (53). – С. 143-148.

7. Чесноков А.В. Комплексный подход к автоматизации заготовительного производства УУКМ / А.В. Чесноков // Композиционные материалы в промышленности: материалы Двадцать седьмой международной конференции, 26-30 мая 2008 г., Ялта – Киев: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2008. – С. 334-335.

8. Гурин В.А. Исследование газофазного уплотнения пироуглеродом пористых сред методом радикально движущейся зоны пиролиза / В.А. Гурин, И.В. Гурин, С.Г. Фурсов // Вопросы атомной науки и техники: сб. науч. труд. – X., 1999. – №4. – С. 32-45.

9. Потапов А.М. Влияние состава и технологии изготовления на структуру и окислительную стойкость УУКМ / А.М. Потапов, Ю.В. Штефан, Е.А. Личман // Композиционные материалы в промышленности: материалы Двадцать седьмой международной конференции, 28 мая – 1 июня 2007 г., Ялта – Киев: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2007. – С. 95-97.

10. Чесноков А.В. Определение рациональной схемы армирования углерод-углеродного композиционного материала по основным критериям / А.В. Чесноков, В.В. Чесноков // *Проектування та виробництво конструкцій літальних апаратів: збірн. наук. праць.* – Х., 2007. – Вип.1 (48). – С. 80-85.

11. Чесноков А.В. Анализ процесса формования стержневых изделий круглого поперечного сечения из волокнистых полимерных композитов методом пултрузии / А.В. Чесноков, В.В. Чесноков //

*Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: сб. науч. тр. ВНУ.* – Луганск, 2001. – С. 136-142.

12. Чесноков А.В. Силовой анализ укладки слоев горизонтальных стержней при сборке армирующих каркасов / А.В. Чесноков // *Проектування та виробництво конструкцій літальних апаратів: збірн. наук. праць.* – Х., 2008. – Вип. 2 (53). – С. 80-85.

Поступила в редакцию 29.10.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проректор, зав. кафедры 407 Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

### ПЕРСПЕКТИВИ ПОЛПШЕННЯ ЯКОСТІ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

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

Проведений аналіз стану потреб ракетно-космічної галузі в вуглець- вуглецевих композиційних матеріалах (ВВКМ) з високими експлуатаційними характеристиками. Підсумовано накопичений науково-технічний потенціал вітчизняних організацій в проектуванні і виробництві аналогічних матеріалів. Сформульовані перспективи удосконалення технології виготовлення ВВКМ що направлені на підвищення експлуатаційних характеристик і зниження собівартості виготовлення матеріалу. Визначено перелік робіт, виконання яких дозволить вирішити весь комплекс задач по розробці, виготовленню і випробуванню нового ВВКМ, виготовленого на основі стержньового армуючого каркасу з вуглепластикових стержнів на зв'язуючому, що містить вуглевод, з матрицею одержаною CVI методом.

**Ключові слова:** стрижньовий армуючий каркас, термоградієнтне газофазне насичення, термонагруження вузли літальних апаратів, газопроникність, вуглевод зв'язуюче, що містить.

### PROSPECTS OF IMPROVEMENT OF QUALITY OF CARBON-CARBON COMPOSITION MATERIALS

*A.V. Chesnokov, A.V. Gaydachuk, A.M. Potapov, I.V. Guryn*

The analysis of the state of necessities of rocket-space industry in carbon-carbon composition materials (CCCM) with high operating descriptions is conducted. The accumulated scientific and technical potential of domestic organizations in planning and production of similar materials is summed up. The prospects of improvement of technology of the CCCM making are formulated directed on the increase of operating descriptions and decline of prime price of making of material. The list of works is certain, implementation of which will allow to decide all complex of tasks on development, making and test of new CCCM, made on the basis of bar reinforcing framework from coal of plastic bars on a carbohydrate containing connective with the matrix of got by the CVI method.

**Key words:** bar reinforcing framework, termogradiyentnoye gasofaznoye satiation, termonagruzhennyye knots of aircraft, gas-penetrability, carbohydrate containing connective.

**Чесноков Алексей Викторович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, Восточноукраинский национальный университет им. В.Даля, Луганск, Украина, E-mail: chesnokov@snu.edu.ua.

**Гайдачук Александр Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, проректор, зав. кафедры ракетных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина.

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

**Гурин Игорь Вячеславович** – м.н.с. отдела графитовых, углеродных и углерод-углеродных материалов, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", Харьков, Украина.