

УДК 629.7.036.34: 67.02

А.В. ГАЙДАЧУК¹, А.В. ЧЕСНОКОВ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина²Восточнoукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Украина

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Приводится обзор применения композиционных материалов (КМ) в газотурбинных двигателях (ГТД). Определены перспективы дальнейшего совершенствования энерговооруженности ГТД за счет изготовления термонагруженных деталей из углерод-углеродного КМ (УУКМ). Определены причины сдерживающие применение УУКМ для производства деталей ГТД, в частности сопла форсажной камеры и лопаток. Проанализировано современное состояние производства УУКМ в Украине. Определено, что реализуя созданные авторами научные основы производства деталей из УУКМ снижается длительность технологического цикла и стоимость их производства. Определены направления дальнейших исследований для реализации эффективного применения УУКМ в ГТД.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, углерод-углеродный композиционный материал, критическое сечение, лопатки.

Состояние проблемы

Композиционные материалы (КМ) начали применяться в газотурбинных двигателях летательных аппаратов (ЛА) более 50 лет тому назад и с тех пор их использование достигло значительных масштабов [1]. Тенденция роста применения КМ будет усиливаться и в 21-м веке, поскольку именно эти материалы обеспечивают заданные свойства и качество, стабильность при эксплуатации и эффективность в производстве.

Увеличивается спектр применяемых КМ в узлах ЛА, в основном это вызвано необходимостью снижения массы, экономии топлива, уменьшения производственных и эксплуатационных затрат, а также решения ряда проблем, связанных с авиаупругостью, надежностью и увеличением ресурса [2].

Подъемный двигатель фирмы Роллс-ройс модели RB162, может служить примером эффективного применения КМ, в котором 40% деталей сделаны из стеклопластика: воздухозаборник, корпус, направляющие, рабочие лопатки, компрессоры (кроме первой ступени). Это обеспечило очень высокую тяговооруженность равную 16 при стоимости стеклопластиковых деталей, составляющей лишь 15% общей стоимости двигателя.

КМ применяются для изготовления лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). Основным преимуществом лопаток из стеклопластиков, испытывающих суммарное воздействие центробежных, газовых и инерционных сил, является менее опасный характер их разрушения. Если металлическая лопатка ломается в корневой части, то стеклопластиковая

расслаивается от вершины к корню, и за весь период испытания двигателя RB162 не было ни одного случая отрыва такой лопатки.

По мере развития двигателестроения непрерывно возрастают требования к ресурсу работы ГТД. Если в начале развития ТРД его ресурс был 15 ... 25 часов, то в настоящий момент он значительно вырос. При освоении ГТД в серийном производстве ресурс двигателя изменился от 50 часов до 5 ... 10 тыс. часов и более [3]. Изменение качественных показателей ГТД во времени зависит от конструкторского и (в большей степени) от технологического совершенствования процессов производства деталей и сборочных единиц, что особо актуально для деталей из КМ, так как деталь и материал создаются в едином процессе.

Несмотря на сложные экономические условия и длительность процесса разработки, в ответ на растущие требования к ГТД разработан и в настоящее время осваивается серийное производство двигателя Д-436-148, разработанного конструкторами ГП "Ивченко-Прогресс". Д-436-148 не уступает по своим характеристикам находящемуся в разработке двигателю SaM-146. Этот двигатель в соответствии с соглашением между Российской Федерацией и Украиной создается в рамках кооперации четырех предприятий – ГП "Ивченко-Прогресс", ОАО "Мотор Сич", ФГУП "ММПП "Салют" и ОАО "УМПО". Первый полет Ан-148 с двигателями Д-436-148 состоялся 17 декабря 2004 года [4].

Применяемые материалы работают на грани своих возможностей и для повышения характеристик ГТД необходимо применение новых материалов. Решением проблемы создания нового поко-

ления ГТД определяющую роль будут играть жаропрочные КМ и реализующие их технологии [5].

Целью работы является обоснование возможности эффективного применения углерод-углеродных КМ (УУКМ) в ГТД и определение направлений исследований.

Анализ проблемы

На военных самолетах с большой потребной тяговооруженностью и большими скоростями полета (до $M_{П} = 3...3,3$), а также на сверхзвуковых пассажирских самолетах применяются турбореактивные двигатели с форсажной камерой (ФК). Отсутствие за ФК вращающихся деталей позволяет реализовать в ней высокие температуры, достигающие при $\alpha_{\delta \hat{\epsilon}} = 1,1...1,2$ значений $\dot{O}_{\delta}^* = 2000...2100$ К, и значительно повысить тягу двигателя [6].

Скорости газовоздушного потока и условия термонагружения критического сечения ФК сопоставимы с условиями ЖРД, где обоснована необходимость применения УУКМ [7].

На входе в компрессор температура находится в пределах $-50 ... -60$ °С, в зоне последних ступеней компрессора высокого давления он достигает $600 ... 700$ °С. На лопатки ротора и статора компрессора оказывают влияние силы потока воздуха от скорости полета ЛА и изменение сил сжатия на каждой из рабочих ступеней компрессора. Центробежные силы, возникающие в роторе компрессора, создают значительные нагрузки на рабочие элементы лопаток [3]. Лопатки ротора турбины и сопловых направляющих аппаратов работают при весьма значительных силовых и температурных нагрузках. Поток газовой смеси, которая воспламеняется в камере сгорания, подается на рабочие лопатки турбины и создает высокие температурные и силовые нагрузки. Температура на входе в турбину $T_r = 1300$ К, а максимальная $T_{\text{тих}} = 1550 ... 1600$ К [8]. Такие температуры требуют создания специальной системы охлаждения колес турбины и нанесения на перо лопатки барьерного покрытия или материал лопаток должен выдерживать такие нагрузки.

К материалам, применяемым для изготовления лопаток роторной и статорной части ГТД предъявляются различные требования. Общими являются требования высокой удельной прочности и жесткости, сохраняющиеся при всем диапазоне воспринимаемых температур, высокой усталостной прочности и стойкости к эрозии, коррозии и термическим ударам, низкого коэффициента термического расширения и технологичности изготовления из них деталей сложной формы.

Приведенный выше пример использования преимуществ стеклопластиковых лопаток относится

и к углепластиковым и лопаткам из УУКМ, которые выдерживают более высокие термонагрузки.

Применение УУКМ в ГТД дает возможность повысить скорость и температуру газовоздушного потока, и энерговооруженность ГТД в целом. Широкое применением УУКМ в деталях и узлах ЛА, испытывающих при работе высокие термодинамические нагрузки, обусловлено выгодным сочетанием пространственной схемы армирования, на основе высокомодульных, высокопрочных и жаростойких волокон, и углеродной матрицы, что позволяет приблизить температурную стойкость матрицы к высокому температурному сопротивлению углеродных волокон. Пространственное армирование резко повышает сопротивление материалов действию нестационарных температурных напряжений [9].

Существенным сдерживающим фактором применения УУКМ в ГТД является высокая стоимость материала и длительность его изготовления. Решению проблемы снижения стоимости УУКМ и освоению высокопроизводительной технологии его производства в Украине посвящено ряд работ авторов, позволивших определить перспективы совершенствования технологии изготовления УУКМ [10] и стратегию проведения исследований.

В этих работах разработана новая концепция производства деталей ЛА из УУКМ в Украине, включающая следующие принципы:

- применение имеющейся производственной базы высокопроизводительного метода пироуглеродного уплотнения;
- обеспечение благоприятных условий выполнения каждого ТП изготовления деталей ЛА из УУКМ на основании определения критериев технологичности для каждого ТП;
- применение технологических методов повышения газопроницаемости АК, сохранения прямолинейности и равномерности расположения армирующих волокон;
- комплексная автоматизация процессов производства и контроля ТП;
- применение ресурсосберегающих технологий, позволяющих перейти на уровень безотходного производства.

Для обеспечения технологической готовности производства деталей из УУКМ разработаны научные основы, раскрывающие функции технологической подготовки производства: обеспечение технологичности конструкции; разработку ТП; проектирование и изготовление средств технологического оснащения; контроль и управление ТП.

Выявлены параметры, характеризующие устойчивость ТП изготовления деталей из УУКМ, на основании которых определены требования технологичности и методики контроля параметров [11].

Проведены исследования технологических этапов подготовки жгутов к переработке [12, 13], в результате которых повышена устойчивость ТП. Получены зависимости отражающие взаимосвязь технологических параметров изготовления армирующих каркасов (АК) с устойчивостью и производительностью процессов [14]. Научно обоснованы ТП и параметры изготовления АК, систематизированы требования и определены методики расчета узлов технологического оснащения [15, 16].

Разработаны принципы автоматизации ТП подготовки жгутов, модель функционально-технологической взаимосвязи узлов пултрузионной установки и технологических этапов, определены контролируемые параметры, позволяющие управлять ТП [17]. Разработан принцип автоматической сборки АК, разработаны алгоритмы и программное обеспечение для управления процессом. Созданы основы системы контроля изделий на стадиях производства, позволяющей по данным поточного и выборочного контроля определять пригодность к дальнейшей переработке и сигнализировать о необходимости проведения мониторинга параметров ТП и состояния узлов.

Разработаны принципы проектирования средств технологического оснащения и реализованы в виде универсальной пултрузионной установки, оснащения для установки вертикальных стержней и укладки слоев горизонтальных стержней, плетения с изменяющимся радиусом и прошивки стержнями. Комплекс технологического оснащения позволяет реализовать разработанные ТП.

Технологическая готовность производства апробирована в условиях опытного производства [18]. Общая длительность изготовления насадка критического сечения сопла $\varnothing 530$ мм сокращена в 6,4 раза (на 2140 час) и получено 18,6 кг экономии углеродного жгута. Новизна принятых конструкторско-технологических решений подтверждена патентами Украины. Достигнутое снижение стоимости УУКМ позволяет расширить области эффективного его применения в частности для деталей ГТД.

Выводы

Результаты проведенных исследований, накопленный опыт и имеющееся технологическое обеспечение позволяют начать экспериментальные исследования по изготовлению опытных образцов критического сечения ФК. Лопатки рационально изготавливать с применением технологии плетения с изменяющимся радиусом оплетаемой оправки с повышением межслоевой прочности трансверсальным армированием [19].

Для применения УУКМ в узлах ГТД необходимо проведение ряда экспериментальных исследо-

ваний, направленных на повышение стойкости к окислению УУКМ и оптимизацию структуры армирования деталей.

Литература

1. Гайдачук А.В. Состояние и перспективы применения композиционных материалов в газотурбинных двигателях летательных аппаратов / А.В. Гайдачук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 3 (11). – С. 11-20.
2. Анализ технологических проблем применения композиционных материалов в конструкциях самолетов / В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин, Ю.М. Тарасов, В.Н. Рыбаков // *Композиционные материалы в промышленности: материалы Междунар. конф. (28 мая – 1 июня 2007 г.)*. – С. 433-434.
3. Демин Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: учеб. пособие / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
4. 100 лет "Мотор Сич" [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.aex.ru/photo/motorsich>.
5. Каблов Е.Н. Новые материалы и технологии – определяющий фактор развития авиационной техники / Е.Н. Каблов // *Технологические системы*. – 1999. – № 1 – С. 27-29.
6. Иноземцев А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроение, 2005. – Т. 5. – *Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок*. – 187 с.
7. Исследование окислительной стойкости УУКМ при воздействии высокотемпературного газового потока / А.М. Потапов, Ю.В. Штефан, В.Ф. Назаренко, Е.А. Личман // *Композиционные материалы в промышленности: материалы Междунар. конф. (29 мая – 2 июня 2006 г.)*. – С. 178-180.
8. Мамаев Б.И. Методы газодинамического проектирования и совершенствование элементов проточной части турбин авиационных высокотемпературных двигателей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.05 / Самарский гос. аэрокосмич. ун-т. – 1995. – 298 с.
9. Jarmon D.C. Mechanical property comparison of 3-D and 2-D graphite reinforced epoxy composites fabricated by resin transfer molding / D.C. Jarmon, A.W. Craig, C.L. Kogstrom // *43rd International SAMPE Symposium, May 31 – June 4, 1998*. – Vol. 43. – P. 2043-2056.
10. Перспективы улучшения качества углерод-углеродных композиционных материалов / А.В. Чесноков, А.В. Гайдачук, А.М. Потапов, И.В. Гуринов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 6 (53). – С. 21-24.
11. Чесноков А.В. Показатели производственной технологичности изделий из углерод-углеродного композиционного материала / А.В. Чесноков // *Ресурсосберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів : зб. наук. пр. / Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля*. – 2009. – С. 215-220.

12. Чесноков А.В. Разработка методов и устройств оценки качества шпикования легкоповреждаемых жгутов для плетения / А.В. Чесноков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 6 (42). – С. 8-10.

13. Чесноков А.В. Автоматизация пултрузии углепластиковых стержней / А.В. Чесноков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (16-17 апреля 2009 г.). – Могилев : Бел. – Рос. ун-т, 2009. – Ч. 1. – С. 108.

14. Чесноков А.В. Моделирование взаимосвязи технологических процессов изготовления углерод-углеродных композитов / А.В. Чесноков, А.В. Гайдачук // Композиционные материалы в промышленности : материалы междунар. конф., 1 – 5 июня 2009 г. – С. 223-224.

15. Чесноков А.В. Повышение производительности установки вертикальных стержней армирующих каркасов УУКМ / А.В. Чесноков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2009. – Вып. 4 (60). – С. 19-27.

16. Чесноков А.В. К вопросу автоматизации сборки стержневых армирующих каркасов / А.В. Чесноков // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – № 6 (124), ч. 2. – Луганськ, 2008. – С. 126-130.

17. Чесноков А.В. Автоматизация технологических процессов производства углерод-углеродных композитов / А.В. Чесноков, А.В. Гайдачук // Теория и практика технологии производства композиционных материалов и новых металлических сплавов : материалы 6-й Московской Междунар. конф. (21-24 апреля 2009 г.). – С. 125.

18. Чесноков А.В. Реализация концепции технологической подготовки производства деталей летательных аппаратов из УУКМ в Украине / А.В. Чесноков, А.В. Гайдачук // Композиционные материалы в промышленности: материалы Межд. конф. (7 – 11 июня 2010 г.), Ялта – Киев, 2010. – С. 301-303.

19. Чесноков А.В. Исследование влияния трансверсального армирования на прочность плетеного композиционного материала / А.В. Чесноков, Е.Е. Бакст // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 2 (49). – С. 51-54.

Поступила в редакцию 21.05.2010

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

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ У ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ

О.В. Гайдачук, О.В. Чесноков

Приводиться огляд застосування композиційних матеріалів (КМ) у газотурбінних двигунах (ГТД). Визначені перспективи подальшого вдосконалення енергоозброєності ГТД за рахунок виготовлення термонавантажених деталей з вуглець-вуглецевого КМ (ВВКМ). Визначені причини стримуючі застосування ВВКМ для виробництва деталей ГТД, зокрема сопла форсажної камери і лопаток. Проаналізовано сучасний стан виробництва ВВКМ в Україні. Визначено, що реалізуючи створені авторами наукові основи виробництва деталей з ВВКМ знижується тривалість технологічного циклу і вартість їх виробництва. Визначено напрями подальших досліджень для реалізації ефективного застосування ВВКМ у ГТД.

Ключові слова: газотурбінний двигун, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, критичний перетин, лопатки.

AN ANALYSIS OF EFFECTIVE APPLICATION IS CARBON-CARBON COMPOSITION MATERIALS IN TURBO-ENGINES

A.V. Gaydachuk, A.V. Chesnokov

A review over of application of composition materials (CM) is brought in turbo-engines (TE). The prospects of further perfection of energyarmed of TE are certain due to making of the details loaded with a temperature from carbon-carbon CM (CCCM). Reasons are certain retentive application of CCCM for the production of details of TE, in particular nozzles of forcing chamber and shoulder-blades. The modern consisting of production of CCCM is analysed of Ukraine. It is certain that realizing the scientific bases of production of details created authors duration of technological cycle and value of their production goes down from CCCM. Directions of further researches are certain for realization of effective application of CCCM in TE.

Key words: turbo-engine, carbon-carbon composition material, critical section, shoulder-blades.

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

Чесноков Алексей Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, Восточнукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, Украина, e-mail: chesnokov@snu.edu.ua.