

УДК 629.7.036: 621.762

А.В. ГАЙДАЧУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Проанализировано состояние применения композиционных материалов в газотурбинных двигателях летательных аппаратов. Показаны их преимущества в специфической для двигателей сфере применения, типовые конструктивно-технологические решения, проблемы. Рассмотрены перспективы применения композиционных материалов в двигателестроении Украины.

летательные аппараты, газотурбинные двигатели, композиционные материалы

Состояние проблемы

Композиционные материалы (КМ) начали применяться в газотурбинных двигателях летательных аппаратов (ЛА) более 50 лет тому назад [1] и с тех пор их использование достигло значительных масштабов [2]. Тенденция роста применения КМ будет усиливаться и в XXI веке, поскольку именно эти материалы обеспечивают заданные свойства и качество, стабильность при эксплуатации и эффективность в производстве [2].

Исследования, проводящиеся с 1950 г., показали, что при рациональном использовании высоких физико-механических свойств и анизотропии КМ эти материалы отвечают высоким требованиям, предъявляемым к широкому классу изделий машиностроения и авиационно-космической техники в частности.

Еще в 1961 г. в Англии для военного самолета с короткими взлетом и посадкой были изготовлены из стеклопластика лопатки компрессора низкого давления, сопло дефлектора холодного воздуха, малонагруженные секции корпуса двигателя и направляющие лопатки воздухозаборника [1].

Позднее английская фирма «Роллс-Ройс» после ряда модификаций подъемного двигателя RB изготовила модель RB162, в которой 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.

В это же время КМ начинают широко применять для 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. В результате испытания для этого двигателя был установлен ресурс в 50 ч, что соответствует 3000 ч работы маршевого двигателя и многим годам работы самолета с такими двигателями. В проектируемых модификациях этого двигателя предусмотрена тяговооруженность 24.

В турбовентиляторном двигателе RB211 углепластик «Хайфил» использован для изготовления вентилятора диаметром 2400 мм, из КМ полностью выполнен компрессор низкого давления, около половины роторных и статорных лопаток компрессора высокого давления, корпуса переднего несущего узла и обводного канала.

В авиадвигателестроении период освоения, включающий в себя конструкторские работы, изготовление оснастки и прототипного изделия, составляет для стальных реактивных двигателей 24 месяца, а для стеклопластиковых – 5 месяцев.

Анализ проблемы

Расходы на разработку двигателя из КМ составляют 24 % от расходов для двигателя из металлов. В серийном производстве корпус из КМ стоит вдвое дешевле стального, а технологическая оснастка для его изготовления – в четыре раза дешевле оснастки для стального [1].

Для самолетов вертикального взлета и посадки особенное значение приобретает вопрос о снижении массы двигательной установки, так как тяговооруженность ГТД является решающей.

Почти все детали ГТД работают в движущемся нестационарном газовом потоке, температура которого в компрессоре достигает 200 – 300 °С. Во время работы двигателя все его детали, а особенно рабочие лопатки и диски их крепления, должны выдерживать высокие нагрузки. Кроме того, газовый поток содержит твердые частицы, которые вызывают износ деталей.

Таким образом, к материалам ГТД предъявляются следующие требования: высокая удельная прочность и жесткость, сохраняющиеся при высоких температурах; высокая усталостная прочность и стойкость к эрозии, коррозии и термическим ударам; низкий коэффициент термического расширения; высокая чистота поверхности; технологичность изготовления деталей сложной формы.

Замена стальных лопаток осевого компрессора ТРД съемными лопатками из стеклопластика с замком типа ласточкина хвоста уже в 60-е годы дала экономию в массе 26 %.

Развитие авиационных ГТД в бывшем СССР определялось улучшением экономичности, надежно-

сти, удельного веса и ряда других параметров. Однако уже к концу 70-х годов, когда создаваемые двигатели имели довольно высокие показатели, улучшение каждого из указанных параметров требовало расчетных и экспериментальных работ, но главным образом новых схем, конструкторских решений и новых материалов [3].

Сравнение удельного веса отечественных и зарубежных ГТД по годам свидетельствовало, что за последние 10 – 15 лет удельный вес вновь разрабатываемых двигателей практически не снизился. Дальнейшее снижение массы могло быть достигнуто за счет применения новых высокопрочных и легких материалов, к которым следует отнести КМ.

В статье [3] были рассмотрены некоторые перспективы и проблемы применения КМ в авиационных ГТД и пути их решения на примере наиболее полно изученного класса материалов на полимерной матрице.

Применение КМ в ГТД наряду со снижением массы позволяет, как показали опытные проработки, существенно уменьшить трудоемкость, энергоемкость и в целом снизить стоимость их изготовления в 3 – 6 раз.

Возможности применения КМ на примере двухконтурного двигателя были рассмотрены, по-видимому, в одной из первых отечественных работ [4]. Исходя из условий работы элементов конструкции по нагрузкам и температуре и с учетом физико-механических свойств КМ в [4] показана целесообразность изготовления из них деталей, работающих до температуры 250 °С: рабочих лопаток, направляющих аппаратов статора компрессора, оболочек воздушного тракта наружного контура, различных крышек, кожухов, фланцев, патрубков, экранов электропроводки.

Применение кремнийорганических и полиамидных матриц, разработка карбонизированного углепластика и других высокотемпературных материалов позволила распространить применение КМ на

область более горячих узлов двигателя. Первым шагом в этом направлении явилось использование горячих узлов двигателя, а также КМ для лопаток решетки реверса.

Кратковременные режимы работы, малая продолжительность контакта лопаток с горячими газами способствовали успешному применению КМ, что в результате позволило уменьшить массу узла реверса на 30 кг [4].

В конце 70-х годов с целью повышения безопасности авиационных перевозок к корпусам двигателей стали предъявлять требования непробиваемости при обрыве рабочих лопаток компрессора и турбины. Поэтому на новых двигателях иностранных и отечественных фирм над рабочими лопатками предусматривалось специальное усиление статора. По проведенным оценкам [3, 4] применение обмотки КМ в качестве защиты корпусов от пробиваемости дало уменьшение массы на ступень вентилятора одного из двигателей на 26,5 кг.

Однако реализация преимуществ КМ перед традиционными материалами в значительной степени затруднена рядом специфических свойств и недостатков. К ним следует отнести анизотропию механических свойств; ограниченную термочувствительность; высокую зависимость свойств от температуры; низкую межслойную жесткость и прочность; низкую ударную прочность; малую контактную прочность; низкую эрозионную стойкость; малую теплопроводность [4].

Очевидно, только комплекс работ в области конструирования, материаловедения и технологии, направленный на преодоление указанных недостатков, позволит решить проблему в целом и создать работоспособные конструкции из КМ.

Температурный диапазон элементов конструкции из КМ может быть расширен как увеличением теплостойкости самого материала, так и защитой конструкции от перегрева. В первом случае результат достигается за счет повышения термочувствительности

матрицы. Переход от эпоксидных матриц к кремнийорганическим и полиамидным расширяет температурный диапазон с 200...250 до 300 °С, а использование металлических матриц дает возможность получить работоспособные конструкции при температурах 400...700 °С [5, 6].

Примером защиты конструкции от перегрева может служить экранирование оболочек из полимерных КМ металлической фольгой в зоне местного воздействия повышенных температур. На рис. 1 приведены кривые, показывающие снижение уровня локальных температур, достигнутых экранированием [3].

Повышению межслойных сдвиговых характеристик способствуют прошивка слоев, использование наполнителей с объемным переплетением, упрочнение вискеризацией, улучшение адгезии между отдельными слоями за счет введения клеевого подслоя [7].

Увеличение сдвиговой прочности в лопатках компрессора, что особенно важно для предотвращения расслоений на кромках, достигается также замыканием части или всех слоев, образующих перо лопатки (рис. 2,а) взамен получения пакета из отдельных слоев (рис. 2,б). Частоты различных форм навитых лопаток на 15...20 % выше, чем обычных, т.е. перо является более жестким, предел выносливости навитых лопаток на базе 10^7 циклов повышается на 18 % [3].

Введение частотной отстройки деталей, подверженных вибрационным нагрузкам, и применение материалов с повышенными демпфирующими свойствами снижают уровень переменных напряжений, благодаря чему снижается отрицательное влияние низкой межслойной прочности. Анизотропия упругих свойств КМ позволяет производить частотную отстройку лопаток и других тонкостенных конструкций без изменения геометрии. Управление спектром частот достигается изменением угловой ориентации арматуры, выбором соотношения продольных

и поперечных слоев и их взаимной ориентацией в поперечных сечениях, применением многокомпонентных материалов, например, стеклоуглепластиков, алюмоуглепластиков и др. Представляется воз-

можным, проектировать тонкостенные элементы конструкции со спектром частот, удовлетворяющим наложенным на него ограничениям [4].

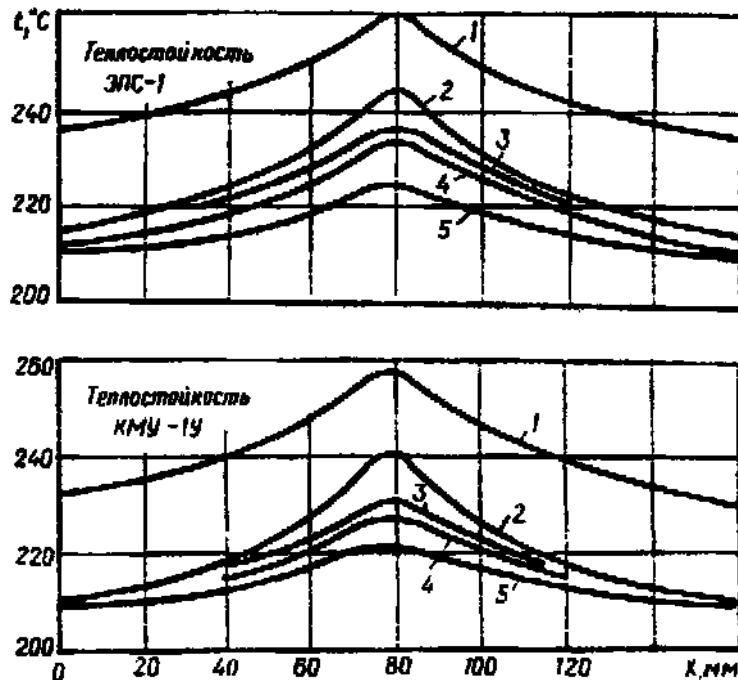


Рис. 1. Снижение локальных температур оболочек металлическими экранами для оболочек из стеклопластика ЭПС-1 (вверху) и из углепластика КМУ 1У (внизу): 1 – без экрана; 2, 4 – стальные экраны толщиной 0,1 и 0,5 мм; 3, 5 – алюминиевые экраны толщиной 0,1 и 0,5 мм

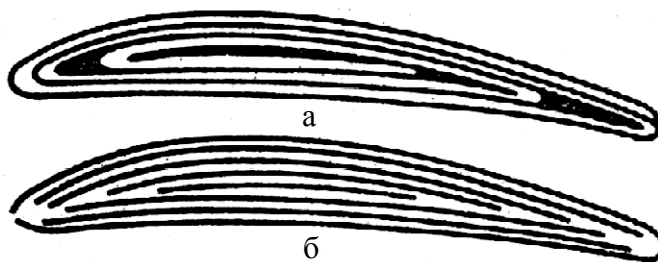


Рис. 2. Варианты пакетирования слоистых лопаток: а – навивка из цельнокроеной заготовки; б – набор из отдельных слоев

Сопоставление вибропрочности лопаток компрессоров, изготовленных из традиционных (сталь ЭИ961, титановый сплав ВТ9, алюминиевый сплав Д16) и КМ (стеклопластики 27-63В «С» и ЭДЦ-В, стеклоуглепластик на основе связующего ЭТФ и наполнителей в виде углеродной ленты ЛУ-2 и стеклоткани КЖТ-ВМ), показывает, что при работе в условиях умеренных температур 100...150 °С

композиционные лопатки не уступают по прочности металлическим, даже титановым [3].

Низкая ударная прочность существующих КМ существенно ограничивает их применение в условиях ударных нагрузок. Первые ступени компрессора и вентилятора в эксплуатации могут подвергаться ударным воздействиям посторонних предметов, а тонкостенные корпуса, как отмечалось, должны

воспринимать ударные нагрузки в случае обрыва вращающихся лопаток. Для указанных деталей ударная прочность является одной из определяющих характеристик. Для повышения ударной вязкости лопаток сейчас применяют многокомпонентные системы, например, стеклоуглепластики и металлоуглепластики. Однако для обеспечения непробиваемости корпусов существующие материалы пока не обеспечивают эффективной защиты.

В целях повышения ударной прочности и адгезии КМ, по-видимому, целесообразно введение в пластик вязких слоев. Перспективно в данном случае также применение многослойных конструкций, в которых слои металла и высокопрочного пластика чередуются с вязким пластиком.

Повышение контактной прочности деталей из КМ может быть достигнуто конструктивными мерами. Например, контактная прочность замкового соединения лопаток обеспечивается введением специальных металлических накладок, которые контактируют на большой поверхности с КМ [3].

Одна из причин, затрудняющих применение КМ для деталей ГТД, подверженных воздействию запыленного воздуха, – их низкая эрозионная стойкость. Эффективным средством уменьшения эрозии оказались мягкие эластомерные покрытия. Сравнительные испытания различных покрытий показали [8, 9], что наименьшим объемным уносом материала в запыленном потоке обладают покрытия из композиционного материала ВПФК (фторкаучук плюс супертонкие нитевидные кристаллы двуокиси цинка), пленки из фторкаучукового клея ВК-3 и капроновой сетки.

При анализе надежности конструкций, подверженных вибрациям, а также при разработке способов резонансных испытаний конструкций и материалов важно знать особенности поведения материала при вибрационном нагружении. Эксперименты показали большую опасность разогрева материала на частотах в диапазоне возбуждения тонкостен-

ных конструкций ГТД [3]. Виброразогрев материала обусловлен повышенной демпфирующей способностью и низкой теплопроводностью.

В результате проведенных конструкторско-технологических разработок и исследований был получен ряд работоспособных деталей и узлов из КМ способами прямого прессования, намотки и пропитки под вакуумом и давлением [3].

Из стеклопластика ЭПС-1 изготовлена одна из оболочек наружного контура ТРДД. По сравнению с алюминиевым аналогом снижены масса на 30 % и трудоемкость в 3,5 раза. Оболочка прошла весь цикл испытаний на двигателе. Эксплуатационная наработка составляла свыше 1000 ч. Из той же марки стеклопластика был получен комплект капотов опоры турбины (снижение массы по сравнению с титаном 50 %, трудоемкости – примерно в 6 раз). Испытания на двигателе по эквивалентной программе за 4000 ч не выявили в капотах никаких дефектов [3].

Из стеклоуглепластика был изготовлен ряд кольцевых оболочек сложной формы для статора вентилятора, которые обеспечивают снижение массы от 25 до 50 %.

Дальнейшему успеху применения КМ в ГТД способствовало решение следующих проблем:

- разработка новых высокопрочных и теплоустойчивых материалов [6];
- оптимизация процессов формования [7];
- разработка рациональных конструкций деталей ГТД с учетом специфики свойств КМ [10 – 17];
- оптимальное армирование конструкций, заключающееся в согласовании структуры и свойств КМ с полем действующих нагрузок и характером их длительности и динамичности [10 – 17];
- разработка методов контроля готовой продукции, в том числе неразрушающих методов [7];
- разработка методов испытания образцов, моделей и натурных конструкций в условиях, максимально приближенных к реальным, и, что особенно важно, в условиях повышенных температур

[10 – 14];

– изучение критических состояний конструкции и установление критериев этих состояний [18];

– создание методов расчета инженерных конструкций на прочность, устойчивость и колебания, наиболее полно учитывавшее особенности КМ [18].

Многолетний опыт создания и эксплуатации авиадвигателей ЗМКБ «Прогресс» и ОАО «Мотор Сич» Д-36-18Т, ДВ-2 и других показал эффективность применения ПКМ, за счет которых снижены масса, металлоёмкость конструкций, трудоёмкость их изготовления, обеспечены надёжность и долговечность [10 – 14]. В ходе работ исследованы свойства материалов типа «металл + композит», что позволило применить с высоким эффектом углепластики для отстройки от резонанса тонкостенных крупногабаритных оболочек вентилятора двигателя Д-36 (наружное армирование корпуса вентилятора диаметром 1400 мм). Органопластик в защитном кольце («бронезилет») обеспечил непробиваемость корпуса вентилятора (диаметр 2500 мм) при попа-

дании посторонних предметов в тракт Д-18Т. Органопластик при внешнем армировании корпуса вентилятора двигателя ДВ-2 обеспечил непробиваемость и повысил жесткость [10].

Гибридные полимерные композиты (сочетание угле-, стекло- и органопластика) применены в лопатке статора вентилятора Д-18Т (рис. 3). При этом решены проблемы защиты входной кромки от удара, пера от эрозионного износа [10, 13, 14].

На рис. 4 показана схема второго контура двигателя Д-436Т1, в узлах которого применены полимерные композиты. Конструкции второго контура Д-18Т, ДВ-2, АИ-22, АИ-222 аналогичны.

На двигателях применяются две конструкции корпусов с внешним армированием металлических тонкостенных оболочек (Д-36, Д-436, Д-436Т, ДВ-2) полимерными композитами (стекло-, угле- и органопластиками) и со вставным внутренним защитным кольцом («бронезилетом») из органопластика (рис. 5).

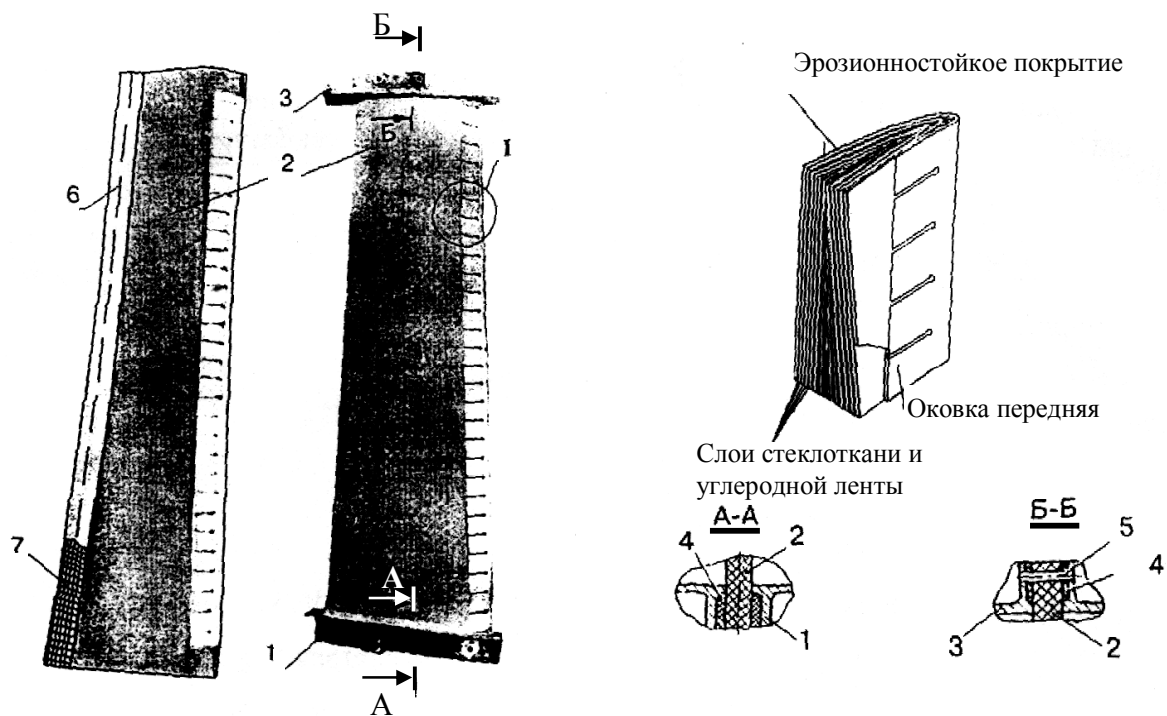


Рис. 3. Лопатка спрямляющего аппарата вентилятора двигателя Д-18Т: 1, 3 – верхняя и нижняя полки; 2 – перо из углестеклопластика; 4 – полимерный наполнитель; 5 – штифт; 6 – прошивка нитью СВМ; 7 – сетка никелевая

Внешнее армирование обеспечивает повышенную жесткость оболочки «металл + композит», отстройку оболочки от резонанса, возможность бесприпусковой намотки с высоким коэффициентом использования материала, технологичность, минимальную массу. Однако вследствие значительных различий (примерно на порядок) коэффициентов термического расширения металла и композита на границе раздела «металл + композит» возникают напряжения, которые могут быть причиной расслоения. Для снижения напряжений на границе раздела «металл + композит» на металлическую оболочку наносятся компенсирующие слои.

В конструкции корпуса со вставным кольцом («бронезилетом») реализован результат комплексных исследований, согласно которому для пробивания конструкции «металл – композит» требуется больше энергии в том случае, когда слой ПКМ расположен первым к метаемому телу.

Такая конструкция исключает возможность выброса за пределы двигателя тел, которые могут образовываться при попадании посторонних предметов в тракт двигателя. Это подтверждено испытаниями на пробиваемость корпуса вентилятора Д-18Т в разгонном стенде [10, 13]. Уровень допустимого шума двигателей обеспечивается шумоглушащими панелями трёхслойной клееной конструкции: перфорированный кожух из титанового сплава, полимерный сотовый наполнитель с шестигранной ячейкой и обшивка из стеклопластика соединены плёночным термоусаживаемым клеем. Панели шумоглушения установлены на всех двигателях четвёртого поколения. Площадь панелей шумоглушения на двигателе Д-18Т составляет более 8 м² [13].

Положительный опыт применения ПКМ в корпусных узлах статора, длительные исследовательские работы обеспечили создание надёжной конструкции лопатки спрямляющего аппарата вентилятора двигателя Д-18Т, перо которой выполнено из гибридного композита – угле-стеклоорганопластика,

которое крепится в полках из титанового сплава. Конструкция и технология изготовления лопатки подробно описаны в [11].

Детали и узлы с применением ПКМ обеспечили длительную надёжную работу двигателей Д-36 и Д-18Т. Продолжаются работы по разработке новых узлов с применением ПКМ. Для двигателя Д-436Т1 изготовлены решётка и подвижный корпус реверсивного устройства. Подвижный корпус многослойной конструкции выполнен в виде оболочки с автономными (съёмными) панелями шумоглушения.

В настоящее время разработана целая гамма полимерных КМ на основе высокомодульных и высокопрочных углеродных волокон и полимерных матриц на основе эпоксидных, полиимидных и других смол. Созданные материалы отличаются друг от друга уровнем упруго-прочностных свойств, верхним пределом эксплуатации и технологичностью. По температурным областям эксплуатации углепластики можно разделить на четыре группы: до 80°С – эпоксидные углепластики; 150...180°С – терлостойкие эпоксидные углепластики; 250...300°С – полиимидные углепластики; до 400°С – углепластики на основе лестничных полимеров.

В зависимости от марки применяемых армирующих волокон углепластики можно разделить на высокопрочные и высокомодульные: высокопрочные – на основе углеродных жгутов УКН и лент ЛЖУ, УОЛ. Предел прочности при растяжении 1600 МПа, при сдвиге 100 МПа, модуль упругости при растяжении 160 ГПа и высокомодульные – на основе лент ЛЖУ ВМ, «Кулон», предел прочности при растяжении составляет 1000...1400 МПа, при сдвиге до 60 МПа, модуль упругости 200...300 ГПа.

Как отмечается в [15], применение конструкционных углепластиков, благодаря высокой удельной прочности и жесткости, обеспечит следующие преимущества по сравнению с металлами: снижение массы вентиляторной ступени ТРДД на 40 %; снижение трудоемкости изготовления широкохордной

лопатки в 3 раза по сравнению с титановой. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных наполнителей могут найти применение в деталях и агрегатах газотурбинных двигателей: лопатки вентиляторной ступени ГТД, корпуса вентилятора, кольца спрямляющего аппарата, обтекателя вентиляторной ступени, звукоглушащих панелях и др.

Выводы

Приведенный выше краткий анализ состояния применения КМ в двигателях ЛА показывает, что в настоящее время роль и объем этих материалов значительно, а в перспективе permanently будет возрастать. Из [16] следует, что в решении проблемы создания нового поколения ГТД определяющую роль будут играть жаропрочные КМ и реализующие их технологии, а также естественные КМ, получаемые по технологии направленной кристаллизации эвтектических сплавов, в которых упрочняющим элементом является непрерывный взаимопроникающий каркас из нитевидных кристаллов монокарбидов тугоплавких металлов.

По-прежнему с нарастанием объема будут применяться ПКМ с улучшенными тепловыми и прочностными характеристиками. Расширение применения КМ будет происходить на базе дальнейшего внедрения в практику новых методов и средств неразрушающего контроля качества материалов, получит дальнейшее развитие система управления качеством, включающая сертификацию КМ и их полуфабрикатов [19, 20], информационные компьютерные технологии [21], что в комплексе должно повысить ресурс ГТД в 2 – 3 раза и обеспечить отношение тяга/вес = 20 [16], а в комплексе — создание и эксплуатацию отечественных двигателей ЛА, соответствующих мировому уровню XXI столетия.

Решение этой проблемы неразрывно связано с подготовкой высококвалифицированных кадров для двигателестроения ЛА Украины, которую обеспечи-

вает Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» [22].

Литература

1. Применение конструкционных пластмасс в производстве летательных аппаратов / Под ред. проф. А.Л. Абибова. – М.: Машиностроение, 1971. – 192 с.
2. Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов — XXI век // Тр. междунар. конф. 30 января – 2 февраля 2001. – М.: МГУ, 2001. – 778 с.
3. Кузнецов Н.Д. Перспективы и проблемы применения композиционных материалов в ГТД // Механика конструкций из композиционных материалов: Материалы всесоюз. симпози., посвящ. 70-летию со дня рождения акад. С.П. Королева. — К.: Наук. думка, 1977. – С. 10 – 19.
4. Кузнецов Н.Д., Веселов С.И., Степаненко Н.Д. Применение композиционных материалов в конструкции ГТД // Проблемы прочности. – 1974. – № 2.
5. Каррол-Порчински Ц. Материалы будущего: Термостойкие и жаропрочные волокна и волокнистые материалы: Пер. с англ. / Под ред. Н.В. Михайлова. – М.: Химия, 1966. – 238 с.
6. Новые жаропрочные металлокомпозиты для сопловых блоков реактивных двигателей / А.Д. Коваль, В.Е. Ольшанский, А.С. Лавренко, В.С. Виниченко // Технологические системы. – 2001. – Вып. 3. – С. 68 – 70.
7. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів: Підручник / Бичков С.А., Гайдачук О.В., Гайдачук В.Є., Гречка В.Д., Кобрін В.М. – К.: ІСДО, 1995. — 376 с.
8. Пильник А.Ф. Исследование прикладной задачи перманентного разрушения деформируемого твердого тела под воздействием частиц в воздушном

потоке: Автореф. дисс... канд. техн. наук: 01.02.04 / Харьк. авиац. ин-т. – Х., 1976. – 22 с.

9. Кравец В.Н. Исследование и разработка технологических способов защиты элементов авиаконструкций из композиционных материалов от эрозивного разрушения в среде эксплуатации: Автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.07.04 / Харьк. авиац. ин-т. – Х., 1980. – 23 с.

10. Пейчев Г.И., Николаевский С.В., Вигант Ю.В. Композиты в авиадвигателях семейства Д-36 // Технологические системы. – 2000. – № 2(4). – С. 15 – 21.

11. Пейчев Г.И., Вигант Ю.В., Николаевский С.В. Полимерные композиты в лопатке вентилятора Д-18Т: доводка, эксплуатация, ремонт // Технологические системы. – 2000. – № 2(4). – С. 21 – 27.

12. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Ахромеев Н.В. Новые материалы и прогрессивные технологии в авиадвигателестроении // Технологические системы. – 2000. – № 2(4). – С. 5 – 15.

13. Пейчев Г.И., Николаевский С.В. Полимерные композиционные материалы в авиадвигателях разработки ЗМКБ «Прогресс»: опыт внедрения и эксплуатации // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов – XXI век // Тр. междунар. конф. 30 января – 2 февраля 2001. – М.: МГУ, 2001. – С. 701 – 719.

14. Пейчев Г.И., Николаевский С.В., Мурашкин Е.И. Лопатка компрессора ГТД из гибридного полимерного композита с заменяемым элементом входной кромки // Технологические системы. – 2003. – № 1(17). – С. 45 – 49.

15. Раскутин А.Е., Гуняев Г.М., Румянцева А.Ф. Термостойкие углепластики для применения в газотурбинных двигателях // Композиционные материалы в промышленности: Материалы XXIII ежегод. междунар. конф. и выст. 2 – 6 июня 2003 г. – Ялта, 2003. – С. 94.

16. Каблов Е.Н. Новые материалы и технологии — определяющий фактор развития авиационной техники // Технологические системы. – 1999. – № 1. – С. 27 – 29.

17. Вишняков Л.Р. Слоисто-волоконистые композиционные материалы с алюминиевой матрицей // Технологические системы. – 2000. – № 1(3). – С. 29 – 32.

18. Гайдачук В.Е., Карпов Я.С. Научная школа ХАИ по проблемам создания эффективных конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов // Технологические системы. – 1999. – № 2. – С. 81 – 83.

19. Богуслаев В.А. Открытое акционерное общество «Мотор Сич» // Технологические системы. – 1999. – № 1. – С. 15 – 16.

20. Богуслаев В.А., Басов Ю.Ф., Курченко Ю.Д. 85 лет надежности // Технологические системы. – 2001. – № 3(9). – С. 9 – 17.

21. Богуслаев В.А., Агарков В.Н. Тенденции развития компьютерных информационных технологий на двигателестроительном предприятии // Информационные технологии в наукоемком машиностроении. Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса. – К.: Техніка, 2001. – С. 240 – 264.

22. Кривцов В.С. ХАИ – международный учебно-научный центр информационных и компьютерных технологий аэрокосмической техники // Технологические системы. – 2000. – № 3(5). – С. 48 – 57.

Поступила в редакцию 20.03.04

Рецензент: д-р техн. наук В.И. Сливинский, ОАО «УкрНИИТМ», г. Днепропетровск