
Государственный научный центр РФ
«Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

**Межотраслевой семинар
памяти профессора Т.Д. Каримбаева
«Применение композиционных материалов
в двигателестроении»**

Москва, Россия, 12–14 сентября 2023 г.

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Москва
ЦИАМ
2023

УДК 621.43:678
ББК 31.365
М43

Межотраслевой семинар памяти профессора Т.Д. Каримбаева «Применение композиционных материалов в двигателестроении»: сборник тезисов / Государственный научный центр РФ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». – М. : ЦИАМ, 2023. – 82 с. : ил.
ISBN 978-5-94049-058-6

В сборнике собраны результаты исследований ведущих предприятий авиационно-космической и смежных отраслей промышленности, профильных университетов и компаний. Представленные исследования посвящены вопросам разработки, технологии изготовления и внедрения новых полимерных, металлических и керамических композиционных материалов, проектированию и расчету изделий, методам испытаний и неразрушающего контроля.

УДК 621.43:678
ББК 31.365

ISBN 978-5-94049-058-6

© Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова, 2023

Т.Д. Каримбаев – основоположник работ по композиционным материалам в советском и российском авиадвигателестроении

Более пятидесяти лет Тельман Джамалдинович Каримбаев руководил работами по композиционным материалам в ЦИАМ, фактически всеми работами по данному направлению в отечественном авиадвигателестроении.

В то время, когда молодой математик с университетским образованием, успешно защитивший кандидатскую диссертацию по расчету на прочность оболочек, возглавил созданный в ЦИАМ отдел (так называлось тогда самое маленькое структурное подразделение института) композиционных материалов, это направление было совершенно новым, но всех вдохновляли успехи фирмы «Роллс-Ройс» в создании лопаток вентилятора из углепластика хайфил. То, что при создании элементов конструкций из композиционных материалов с самого начала необходимо интегрировать усилия материаловедов, технологов, конструкторов и прочнистов, было понятно. Но где взять необходимых специалистов и кто сможет осуществить разработку новых конструктивно-технологических решений? Отдел (а впоследствии сектор, затем снова отдел, в состав которого входило уже несколько секторов) занимался всем комплексом вопросов создания и исследования прочностной надежности деталей из различных композиционных и монокристаллических керамических конструкционных материалов, т.е. по существу это было отделение динамики и прочности в миниатюре. С учетом многообразия композиционных материалов и возможных областей их применения в авиадвигателестроении это фантастический объем работ.

Понимая, что без экспериментальных исследований двигаться вперед нельзя, а рассчитывать на получение необходимой материальной части от других предприятий не приходилось, Т.Д. Каримбаев сумел организовать в составе отдела композиционных материалов технологический участок, успешно работающий и в настоящее время. Думаю, что это первая в нашей стране реализация комплексного подхода к решению задачи создания высоконагруженных конструкций из композиционных материалов.

Работы по композиционным материалам во всем мире начались с исследований полимерных композиционных материалов. И конечно, самой сложной и престижной была задача создания из композиционного материала рабочей лопатки вентилятора. К сожалению, после фиаско, которое потерпела фирма «Роллс-Ройс» с хайфиловыми

лопатками, во всем мире, в том числе в СССР, резко приостановили данные работы. В частности, были почти свернуты работы по созданию из композиционных материалов лопатки вентилятора двигателя Д18Т. Только фирма «Дженерал Электрик», выполнив за 35 лет огромный объем работ, в 1994 году внедрила углепластиковые лопатки вентилятора на двигателях семейства GE90. В 1997 году нам с Т.Д. Каримбаевым довелось принять участие в валидации в СНГ сертификатов этих двигателей. Тельман Джамалдинович ласково обнимал углепластиковую лопатку вентилятора и не мог налюбоваться на нее. После возвращения из США он сделал очень много для дальнейшего развития работ по созданию углепластиковых лопаток вентилятора. Не вина Тельмана Джамалдиновича, что до сих пор внедрения такой лопатки у нас не произошло. Опыт «Дженерал Электрик» наглядно показал, что для решения этой задачи необходимы скоординированные действия больших коллективов при огромных затратах времени и средств. Уверен, что в ближайшее время, во многом благодаря усилиям Т.Д. Каримбаева, такие лопатки будут в России внедрены. А относительно малонагруженные детали из полимерных композиционных материалов успешно эксплуатируются в составе авиационных двигателей. Аккредитована созданная под руководством Т.Д. Каримбаева испытательная лаборатория для проведения сертификационных испытаний изготовленных из композиционных материалов деталей двигателей.

В области разработки и внедрения в авиационные двигатели высокожаропрочных неметаллических материалов наша страна в 80...90-е годы прошлого века была в числе мировых лидеров. Успешно работала так называемая углеродная комиссия, созданная (по инициативе И.А. Биргера при самом активном участии Т.Д. Каримбаева) из руководителей и специалистов ряда предприятий. Большой объем выполненных работ по монокристаллическим и углерод-углеродным материалам привел к выводу о необходимости ориентироваться на армированные волокнами композиционные материалы на керамической матрице. Из-за отсутствия необходимых волокон отечественного производства работы существенно затормозились, но в настоящее время получили активное продолжение.

Также продолжают начатые Т.Д. Каримбаевым работы по композиционным материалам на металлических матрицах. Активно развиваются

обширные научные связи коллектива отдела со многими производственными и исследовательскими предприятиями.

Обладая фундаментальным образованием и хорошим чувством нового, Тельман Джамалдинович внес существенный вклад в решение вопросов обеспечения прочностной надежности многих ракетных двигателей, разработку нормативных технических документов. Он был соавтором одной из первых в СССР монографий по прочностным расчетам с помощью метода конечных элементов.

За пятьдесят с лишним лет Т.Д. Каримбаевым и руководимым им коллективом было разработано

множество оригинальных конструктивно-технологических решений, методов расчета, проведено большое количество испытаний конструкций из композиционных материалов. У Т.Д. Каримбаева много учеников и последователей, и нет сомнения, что они успешно продолжают эти работы.

Юрий Александрович Ножницкий, заместитель генерального директора – директор исследовательского центра «Прочность, надежность, ресурс» ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

Вклад д.т.н., проф. Т.Д. Каримбаева в разработку керамических композиционных материалов C-SiC на основе керамообразующих полимеров

С.С. Солнцев, В.А. Розененкова, С.В. Гаврилов, В.С. Денисова
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва

Разработана и испытана жаровая труба малоразмерного газотурбинного двигателя из углерод-керамического композиционного материала на основе керамообразующих полимеров. Углерод-керамический композиционный материал на основе керамообразующих полимеров сочетает малую плотность с высокой механической прочностью, что позволяет снизить массу жаровой трубы и повысить рабочую температуру эксплуатации.

Contribution of Dr. Sc., prof. T.D. Karimbaev to the development of ceramic composite materials C-SiC based on ceramic-forming polymers

S.S. Solntsev, V.A. Rozenenkova, S.V. Gavrilov, V.S. Denisova
NRC “Kurchatov Institute” – All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russia

Work has been carried out on the development and testing of a small-sized gas turbine engine heat pipe made of carbon-ceramic composite material based on ceramic-forming polymers. Carbon ceramic composite material based on ceramic-forming polymers combines low density with high mechanical strength, which reduces the mass of the heat pipe and increases the operating temperature of operation.

1. Введение

Тельману Джамалдиновичу Каримбаеву принадлежит выдающаяся роль в области применения композиционных материалов в авиастроении. Результаты его научных трудов определили вектор перехода от металлов к современным композиционным материалам в конструкции авиационных двигателей. Тельман Джамалдинович был убежден, что разработка и внедрение композиционных материалов является областью наибольшего прогресса в авиации, и вклад в данной области способен принести максимальную отдачу.

Одним из успешных проектов Т.Д. Каримбаева по созданию деталей авиационных двигателей из композиционных материалов является совместная с НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработка жаровой трубы из углерод-керамического композиционного материала.

2. Разработка и испытания углерод-керамического композиционного материала на основе керамообразующих полимеров

Создание поликерамической технологии сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ под руководством доктора технических наук, профессора Станислава Сергеевича Солнцева позволило

разработать трещиностойкий углерод-керамический композиционный материал (УККМ) с применением прекурсоров на основе керамообразующих полимеров типа поликарбосилана и полисилилана [1]. В работу по созданию УККМ значительный вклад внесли к.т.н. В.А. Розененкова, Н.А. Миронова, С.В. Гаврилов, к.т.н. Н.И. Швец, к.т.н. А.М. Шестаков, Т.И. Янсон.

Вследствие низкой окислительной стойкости углеродных волокон, армирующих керамическую матрицу, требовалось повышение температуростойкости УККМ. Также керамическая матрица не обеспечивает надежную защиту композиционного материала вследствие несовершенного смачивания углеродных волокон и заполнения пор между углеродными волокнами. Для решения задачи повышения температуростойкости научным коллективом НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ также было разработано гибридное реакционно-отверждаемое покрытие для композиционного материала, состоящее из двух слоев. Первый слой – реакционно-отверждаемое покрытие, которое состоит из стекломатрицы, модифицированной тугоплавкими бескислородными соединениями. Отличительной особенностью данного покрытия является протекание химических реакций окисления и стеклообразования в процессе формирования и эксплуатации УККМ. Преимуществом гибридного покрытия является его температура обжига – на 250...350°C меньше рабочей температуры композиционного материала. Второй

слой покрытия формируется при комнатной температуре из золя и модифицирующих тугоплавких добавок. Данное наноструктурированное покрытие является безобжиговым и изготавливается по золь-гель-технологии.

Разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ углерод-керамический композиционный материал на основе керамообразующих полимеров сочетает малую плотность с высокой механической прочностью, обладает термостойкостью, возможностью получения изделий крупных габаритов сложной формы [2]. Он может работать в среде горения топлива и изготавливается из отечественного сырья. Рабочая температура материала составляет до 1250...1350°C без охлаждения, удельный вес не превышает 3 г/см³, что позволяет снизить массу жаровой трубы и других элементов малоразмерного газотурбинного двигателя. Накопленный совместный (ЦИАМ им. П.И. Баранова и НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) опыт изготовления лабораторных образцов и экспериментальных изделий из УККМ и полученные результаты позволили спроектировать и изготовить жаровую трубу из материала, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

В ходе создания неметаллической жаровой трубы коллективом сотрудников ЦИАМ под руководством Т.Д. Каримбаева выполнено проектирование деталей из УККМ, разработка опытной технологии изготовления заготовки жаровой трубы и последующие высокотемпературные испытания детали. Результаты испытаний изложены в работе [3]. Над данным исследованием под руководством Т.Д. Каримбаева работали сотрудники ЦИАМ М.А. Мезенцев, А.Ю. Ежов, К.А. Даньшин.

Созданная технология инфильтрации и пиролиза керамообразующих полимеров позволила сохранить все имевшиеся на металлическом прототипе отверстия на внутренней и наружной обечайке для подвода воздуха в зону горения и аэродинамический профиль конструкции жаровой трубы из УККМ. Материал жаровой трубы не требует охлаждения при рабочей температуре до 1300°C, поэтому в конструкции отсутствуют листовые козырьки и пояса отверстий для подвода охлаждающего воздуха. Таким образом, конструкция значительно упрощается в связи с отсутствием отверстий и других элементов.

Совместно с ЦИАМ изготовлены экспериментальные образцы деталей из керамического композиционного материала с реакционно-отверждаемым покрытием (рисунок).

Высокотемпературные испытания жаровой трубы из углерод-керамического композиционного материала



Рисунок. Экспериментальные образцы деталей из керамического композиционного материала с реакционно-отверждаемым покрытием

с жаростойким гибридным покрытием были проведены на базе ЦИАМ. После первого этапа циклических испытаний с максимальной температурой 1300°C отсутствовали повреждения, сколы и видимые трещины; на втором этапе материал прогрелся до 1550°C, повреждения также отсутствовали, за исключением хаотичных отслоений покрытия.

Установлено, что основной вклад в обеспечение защиты углеродных волокон от окисления вносит жаростойкое гибридное реакционно-отверждаемое покрытие, сочетающее слой, формируемый при температуре ниже рабочей, и слой холодного отверждения [4].

3. Заключение

Разработки ученых ЦИАМ им. П.И. Баранова и НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при научном руководстве д.т.н., проф. Т.Д. Каримбаева и д.т.н., проф. С.С. Солнцева впервые в отечественном авиадвигателестроении позволили создать перспективный углерод-керамический композиционный материал для деталей и узлов горячей части газотурбинных двигателей. Высокий уровень свойств разработанного УККМ и эффективность защитного действия жаростойкого гибридного реакционно-отверждаемого покрытия подтверждены результатами высокотемпературных стендовых испытаний в условиях ЦИАМ.

Список использованных источников

- [1] Исследование квазипластичных высокотемпературных углерод-керамических нанокомпозитов

для «горячих» деталей авиационных двигателей / Т.Д. Каримбаев, Д.В. Афанасьев, К.А. Даньшин, М.П. Николаева, С.С. Солнцев, В.А. Розененкова, Н.А. Миронова. // Сб. трудов Международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». М., 2010. С. 371–390.

- [2] Керамообразующие композиции на основе поликарбосилана и модифицированных полиорганосилазанов / А.М. Шестаков, Н.И. Швец, В.А. Розененкова, М.А. Хасков // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90, № 8. С. 1066–1073.
- [3] Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Ежов А.Ю.

Разработка и экспериментальные исследования неметаллических деталей и узлов горячей части перспективного газотурбинного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14, № 3, ч. 1. С. 128–138.

- [4] Солнцев С.С., Денисова В.С., Розененкова В.А. Реакционное отверждение – новое направление в технологии высокотемпературных композиционных покрытий и материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 329–343.

Новые композиты с металлической матрицей

С.Т. Милейко

Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка

В докладе дан обзор современного состояния области разработок структур и технологий получения композитов с металлической (алюминиевой, титановой, тугоплавкой) матрицей. Аргументируется необходимость замены металлических сплавов в тех конструкциях, в которых неприменимы композиты с полимерной матрицей, композитами с металлической матрицей. Наиболее важное значение эти замены имеют для авиационной и ракетно-космической техники. Особое внимание в докладе уделяется угле-титановым композитам с непрерывными волокнами.

Novel metal matrix composites

S.T. Mileiko

ISSP RAS, Chernogolovka, Russia

A review of the state of the art in developing microstructures and fabrication technologies of metal matrix composites (MMCs) is presented. A necessity of replacing metal alloys in structural elements, in which fibre reinforced polymers cannot be used, by MMCs is explained. Such replacement is most important for aerospace techniques. Among aluminium- titanium- and refractory-matrix composites discussed a special attention is given to carbon-fibre/titanium-matrix composites.

1. Введение

Композиты с полимерной матрицей, прежде всего углепластики, начиная с 1970-х годов заменяют и будут заменять металлические сплавы в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники, что приводит к повышению тактико-технических характеристик летательных аппаратов. Однако подобно тому, как примерно полвека назад металлические сплавы приближались к пределу своих физических возможностей, и углепластики появились на технической сцене, сегодня углепластики приближаются к пределу своих физических возможностей, и это требует разработки принципиально новых конструкционных

материалов, коими являются композиты с металлической матрицей (КММ).

Эти материалы имеют свою историю разработки и применения. Что касается разработки композитов с металлической матрицей, то основное внимание исследователей привлекали углеалюминиевые структуры, соответствующие работы начались полвека назад (см., например, [1]). Обзор результатов, полученных в этом направлении в прошлом веке и в первом десятилетии века нынешнего, содержится в статье [2], обзор последних результатов – в [3; 4]. По-видимому, основная проблема, не решенная должным образом, чтобы углеалюминий стал реальным конструкционным материалом, – исключение из

композита карбида алюминия, разрушающего его структуру. Решить эту проблему пытались следующими способами:

– нанесением неметаллических и металлических покрытий на волокно;

– уменьшением времени контакта волокна с расплавом матрицы путем, например, протягивания волокна через расплав матрицы с формированием проволоки;

– легированием матрицы элементом с большим сродством к углероду.

В статье [3] сделан вывод о том, что разработка реальных углеалюминиевых структур требует реализации принципиально новых идей.

Единственным КММ, впервые успешно примененным в конструкции фермы, на которой располагались три спутника системы ГЛОНАСС, был бороалюминиевый композит. Этот композит имеет каноническую структуру на основе весьма дорогих волокон, поэтому его применение ограничено. Тем не менее, исследование взаимосвязей структуры и механических характеристик бороалюминия позволило обнаружить и понять некоторые принципиальные особенности механического поведения композитов с хрупкими высокомодульными волокнами и металлической матрицей. В частности, было показано принципиальное отличие такого типа композитов и металлических сплавов [5]: трещиностойкость должным образом спроектированных композитов растет вместе с повышением прочности, отсутствует так называемый конфликт между прочностью и трещиностойкостью, характерный для металлических сплавов.

Что требуется для того, чтобы КММ вошли в технологический обиход? Полувековой опыт исследований в этой области показывает, что нужны новые технологические идеи построения неканонических структур композитов. Такого рода идеи демонстрируются в докладе на примере двух типов композитов, применение которых может существенно повысить характеристики газотурбинных двигателей.

2. Углетитановые композиты – материалы для нормальных и повышенных температур

Малый диаметр филаментов в углеволокне и высокая реакционная активность углерода не позволяют использовать ни твердофазные, ни прямые жидкофазные технологии для получения углетитановых композитов с непрерывным волокном. Первые опыты по получению композитов с короткими волокнами были описаны в кратком сообщении [6]. Было показано, и это подтвердилось в последующих

экспериментах французских авторов [7], что существующие технологии не позволяют увеличить объемное содержание волокна в композитах до величин, характерных для традиционных композитов. Это определяет относительно небольшой рост их механических характеристик по сравнению с исходной матрицей. Кроме того, такого типа материалы, будучи по структуре близкими к изотропным, лишены принципиально важной особенности композитов: возможности проектирования структуры материала с учетом будущего напряженного состояния конструкционного элемента. Поэтому было решено искать пути использования жидкофазных процедур для получения композитов с непрерывными волокнами, которые позволяли бы проектировать структуру композита с учетом внешних нагрузок, действующих на конструкционный элемент.

Решение было найдено [8; 9]: предложена иерархическая структура композита, состоящая из основной матрицы – деформируемого титанового сплава и армирующего слоя, представляющего собой слой волокон, пропитанный промежуточной матрицей с пониженной температурой плавления, которой может быть содержащая титан эвтектика (рис. 1 и рис. 2).

Важно подчеркнуть, во-первых, анизотропия прочности и модуля упругости этого КММ существенно меньше анизотропии характеристик армированных полимеров; во-вторых, структура армирующего слоя не изменится катастрофически при выдержках при температуре 800°C в течение 10 ч [10]; в-третьих, трещиностойкость композита достаточно высокая.

Примеры, характеризующие механические характеристики композитов на сегодняшнем этапе развития технологии, приводятся на рис. 3. Удельные характеристики композита существенно превышают соответствующие величины титановых сплавов (плотность образцов, представленных на рис. 3, находится в диапазоне 3,5...3,9 г/см³). Это относится, прежде всего, к упругим характеристикам.

Дальнейшее совершенствование технологии получения углетитанового композита, основанной на применении промежуточной матрицы, позволит производить компрессорные и вентиляторные лопатки авиационного газотурбинного двигателя с соответствующим снижением веса двигателя и увеличением удельной тяги.

3. Оксид-молибденовые композиты – материалы для высоких и ультравысоких температур

Замена никелевых сплавов, обеспечивающих температуру рабочей лопатки турбины до ~1100°C, более

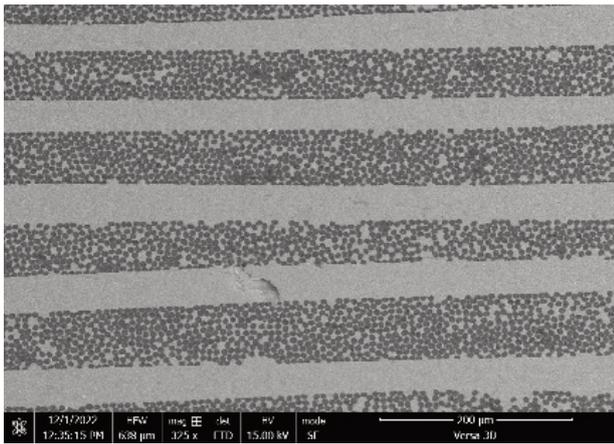


Рис. 1. Макроструктура углетитанового композита

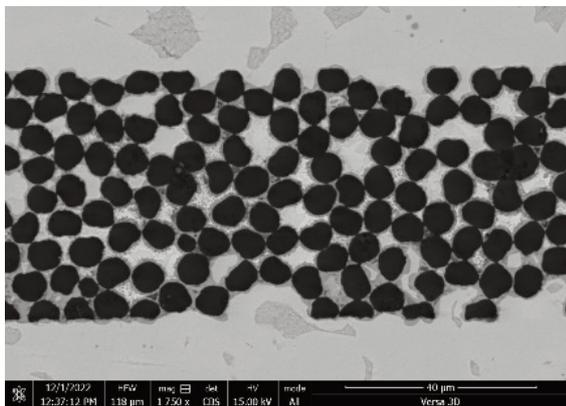
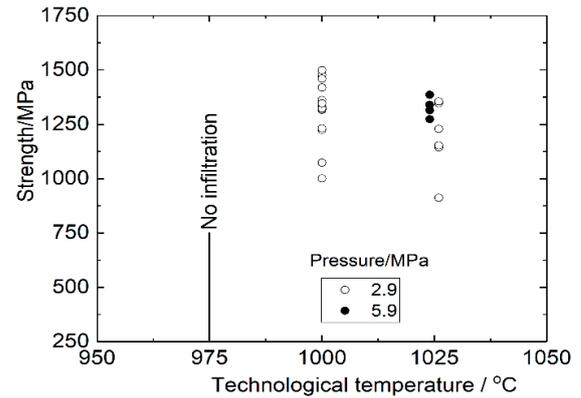


Рис. 2. Микроструктура армирующего слоя

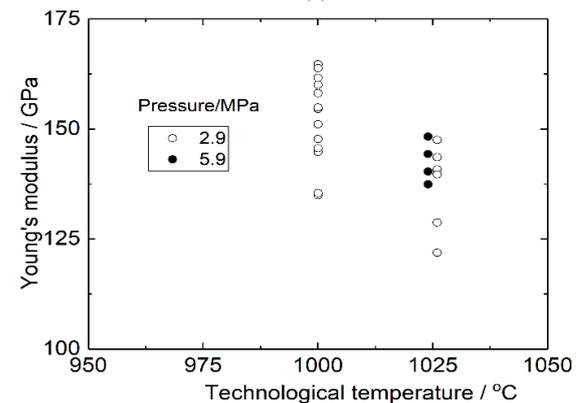
высокотемпературными материалами представляет одну из важнейших и в то же время труднорешаемую в рамках классического металловедения задачу. Повышение температуры лопатки до 1300°C приведет к уменьшению удельного расхода топлива на ~20% с соответствующим сокращением вредных выбросов.

Основное направление исследований в этой области, начавшихся четверть века назад [11], – разработка молибденовых сплавов, содержащих упрочняющие частицы Mo_3Si и Mo_5SiB_3 , при этом последние определяют и достаточно высокую для молибденовых сплавов жаростойкость. Однако достаточно крипоустойкие при температурах до 1200°C сплавы этого семейства характеризуются тем же конфликтом прочность – трещиностойкость, что и другие сплавы, прочность которых определяется торможением дислокационных движений [12; 13]. Корреляция, построенная на рис. 4 по экспериментальным данным [13], указывает на факт: увеличение содержания частиц в сплаве ведет к росту прочности и катастрофическому падению трещиностойкости.

Предварительные опыты исследовательской группы автора по армированию различными оксид-



(a)



(б)

Рис. 3. Зависимости прочности (а) и модуля Юнга (б) углетитанового композита с основной матрицей отожженного сплава ВТ16 и волокнами ЮМАТЕКС-40-3к от технологических параметров (температура и давление)

ными волокнами молибденового сплава, близкого по составу к разрабатываемым сплавам [10; 14; 15], с использованием изобретенного много лет назад способа армирования молибдена разнообразными монокристаллическими и композитными оксидными волокнами [16], показали вполне обнадеживающие результаты: сопротивление ползучести (1% деформации ползучести за 100 ч) достигает 90 МПа при 1300°C, при этом критический коэффициент интенсивности напряжений лучших образцов превышает 40 МПа·м^{1/2} (рис. 5).

Это означает, что подключение к работе прикладных институтов и промышленности позволит разработать технологию производства рабочей лопатки турбины с температурой 1300°C.

4. Заключение

Исследовательская группа автора, работающая в институте Российской академии наук, заложила фундамент для двух типов материалов перспективных авиационных двигателей. Для построения здания на этом фундаменте необходимо объединение наших усилий с усилиями

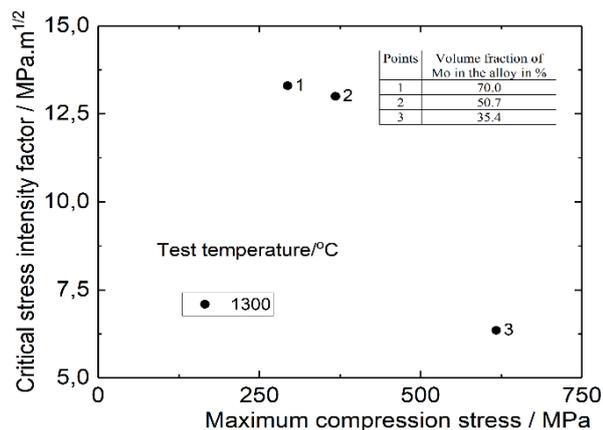


Рис. 4. Корреляция между предельным напряжением сжатия при температуре 1300°C и трещиностойкостью сплавов Mo-Mo₅SiB₂-Mo₃Si [13]

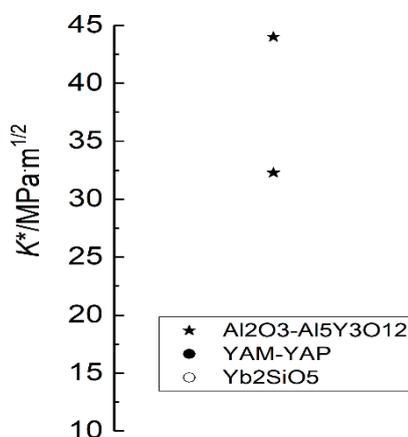


Рис. 5. Трещиностойкость композитов с матрицей из молибденового сплава и тремя типами волокон (ось абсцисс использована для разнесения композитов с различными волокнами)

конструкторов и технологов промышленности.

Результаты в настоящем обзоре, относящиеся к углетитановому композиту, получены в рамках работы по проекту РНФ № 23-19-00419.

Список использованных источников

- [1] Jackson P.W., Braddick D.M., Walker P.J. Tensile and flexural properties of carbon fibre-aluminium matrix composites // *Fibre Science and Technology*. 1972. Vol. 5, iss. 3. P. 219–236.
- [2] Carbon materials reinforced aluminum composites: A review / Y. Huang, Q. Ouyang, D. Zhang, J. Zhu, R. Li, H. Yu // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2014. Vol. 27. P. 775–786.
- [3] Милейко С.Т. Антони Келли и композиты сегодня. Часть 2: Композиты с металлической матрицей // *Композиты и Наноструктуры*. 2021. Т. 13, № 3-4 (51-52). С. 59–107.
- [4] Mileiko S. Carbon-fibre/metal-matrix composites: a

review // *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6, iss. 10. P. 297.

- [5] Mileiko S.T. *Metal and Ceramic Based Composites*. Amsterdam.: Elsevier, 1997. 691 p.
- [6] Mileiko S.T., Rudnev A.M., Gelachov M.V. Low cost PM route for titanium matrix carbon fibre composites // *Powder Metallurgy*. 1996. Vol. 39. P. 97–99.
- [7] Even C., Arvieu C., Quenisset J.M. Powder route processing of carbon fibres reinforced titanium matrix composites // *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68, iss. 6. P. 1273–1281.
- [8] Способ получения композиционных материалов на основе углеволокна и металла: пат. RU 2 731 699 C1 / С.Т. Милейко, А.А. Колчин, С.Н. Галышев и др.; патентообладатель ИФТТ РАН. № 2020105321; заявл. 04.02.2020; опублик. 08.09.2020, Бюл. № 25. 12 с.
- [9] Carbon-fibre/titanium-matrix composites of a hierarchical microstructure / S.T. Mileiko, A.A. Kolchin, D.I. Krivtsov, S.N. Galyshev, N.A. Prokopenko, O.F. Shakhlevich, O.V. Petrova // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. Vol. 155. Art. 106817.
- [10] Новые композиты с металлической матрицей в Институте физики твердого тела РАН / С.Т. Милейко, А.А. Колчин, С.Н. Галышев, В.М. Прокопенко, М.Ю. Никонович, Б. Мыктыбеков // *Композиты и наноструктуры*. 2020. Т. 12, № 3. С. 88–100.
- [11] Berczik D. Oxidation resistant molybdenum alloy: US Patent 5693156. December 2, 1997.
- [12] Processing and mechanical properties of a molybdenum silicide with the composition Mo-12Si-8.5B (at.%) / J.H. Schneibel, M.J. Kramer, Ö. Ünal, R.N. Wright // *Intermetallics*. 2001. Vol. 9. P. 25–31.
- [13] Correlation between microstructure and properties of fine grained Mo-Mo₃Si-Mo₅SiB₂ alloys / M. Krüger, P. Jain, K.S. Kumar, M. Heilmaier // *Intermetallics*. 2014. Vol. 48. P. 10–18.
- [14] Высокотемпературные композиты с молибденовой матрицей и способ их получения: пат. RU 2 712333 C9 / Милейко С.Т., Колчин А.А. и др.; патентообладатель ИФТТ РАН. № 2019109319; заявл. 29.03.2019; опублик. 28.01.2020, Бюл. 4. 11 с.
- [15] Oxide-fibre/molybdenum-alloy-matrix composites: A new way of making and some mechanical properties / S.T. Mileiko, A.A. Kolchin, S.N. Galyshev, O.F. Shakhlevich, V.M. Prokopenko // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020. Vol. 132. Art. 105830.
- [16] Милейко С.Т., Казьмин В.И. Получение композитов методом внутренней кристаллизации // *Механика композитных материалов*. 1991. № 5. С. 898–908.

Слоистые композиты на основе титана

А.А. Колчин, И.Д. Петухов, В.Ю. Малышев, С.Т. Милейко
Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка

Получены и исследованы механические свойства новых слоистых композитов, состоящих из слоев титана и эвтектик $\text{Ti-Ti}_5\text{Si}_3$ и $\text{Ti-Ti}_2\text{Ni}$. Показано, что эвтектические слои упрочняют титановую матрицу подобно тому, как хрупкие (в случае $\text{Ti-Ti}_5\text{Si}_3$) или металлические (в случае $\text{Ti-Ti}_2\text{Ni}$) волокна упрочняют матрицу деформируемого металлического сплава.

Titanium based laminated composites

A.A. Kolchin, I.D. Petukhov, V.Yu. Malyshev, S.T. Mileiko
ISSP RAS, Chernogolovka, Russia

Novell laminated composites composed of titanium layers and those of $\text{Ti-Ti}_5\text{Si}_3$ and $\text{Ti-Ti}_2\text{Ni}$ eutectics are obtained and their mechanical properties are studied. It is shown that the eutectic layers play a reinforcing role like brittle (in the case of $\text{Ti-Ti}_5\text{Si}_3$) and metal fibres (in the case of $\text{Ti-Ti}_2\text{Ni}$) do it with respect to metal matrix.

1. Введение

Идея настоящей работы возникла в ходе исследования углетитановых композитов, получаемых жидкофазной технологией с использованием промежуточной матрицы, состоящей из содержащей титан эвтектики

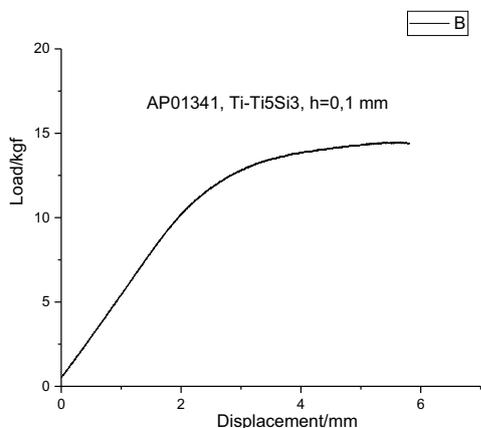
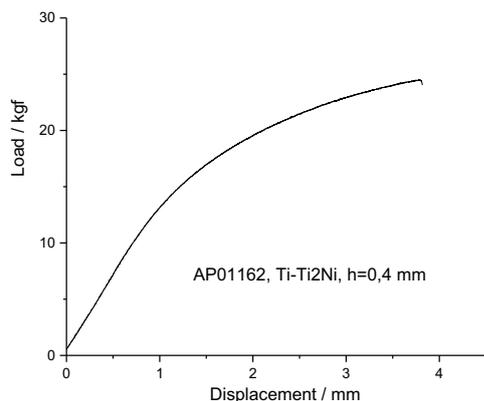


Рис. 1. Типичные кривые деформирования композитных образцов с двумя типами эвтектик

[1; 2]. Решение задачи исследования структуры промежуточной матрицы дало важный побочный результат, который будет изложен ниже.

2. Основная часть

Композитные образцы были получены прессованием в вакууме пакетов, состоящих из слоев фольги технического чистого титана и шликера, состоящего из смеси порошков в пропорции, соответствующей эвтектической.

Типичные кривые деформирования композитных образцов представлены на рис. 1, зависимость прочности композита с эвтектикой $\text{Ti-Ti}_2\text{Ni}$ от объемного содержания слоев – на рис. 2, зависимость прочности композита с эвтектикой $\text{Ti-Ti}_5\text{Si}_3$ от толщины слоев – на рис. 3.

Можно видеть, что эффективная прочность эвтектики $\text{Ti-Ti}_2\text{Ni}$ ниже, чем эвтектики $\text{Ti-Ti}_5\text{Si}_3$. Это приводит к указанным зависимостям, качественно

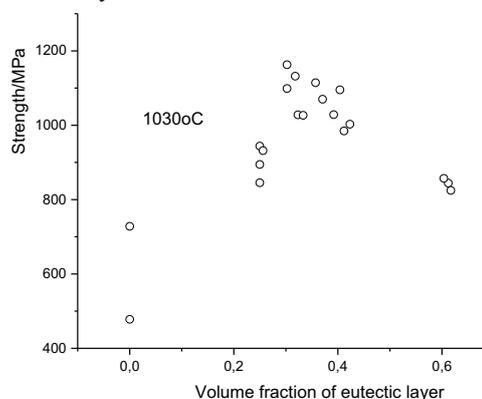


Рис. 2. Зависимость прочности композита с эвтектикой $\text{Ti-Ti}_2\text{Ni}$ от объемного содержания слоев

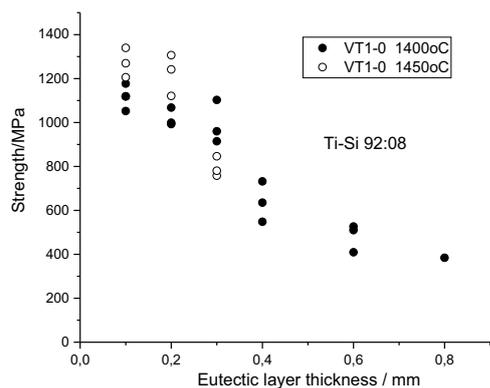


Рис. 3. Зависимость прочности композита с эвтектикой Ti-Ti₅Si₃ от толщины слоев

соответствующим модели разрушения композитов с хрупким волокном и металлической матрицей [3]. Оценка эффективной прочности слоя эвтектики Ti-Ti₅Si₃ дает величину около 4000 МПа.

Следовательно, оптимизация структуры может дать конструкционный высокопрочный композит.

3. Заключение

Представленные в докладе результаты предварительных экспериментов указывают на то, что

совершенствование структуры такого типа слоистых композитов может привести к разработке полезных для некоторых приложений конструкционных материалов.

Приведенные результаты получены в рамках работы по проекту РНФ № 23-19-00419. Авторы выражают благодарность Алиханову Р.Б. за неоценимую помощь в эксперименте.

Список использованных источников

- [1] Способ получения композиционных материалов на основе углеродного волокна и металла: пат. RU 2 731 699 С1 / С.Т. Милейко, А.А. Колчин, С.Н. Галышев и др.; патентообладатель ИФТТ РАН. № 2020105321; заявл. 04.02.2020; опублик. 08.09.2020, Бюл. № 25. 12 с.
- [2] Углетитановый композит с Ti-Al-V-Mo матрицей: структура, прочность и модуль Юнга / О.В. Петрова, И.Д. Петухов, А.А. Колчин, О.Ф. Шахлевич, Н.А. Прокопенко, С.Т. Милейко // Композиты и Наноструктуры. 2022. Т. 14, № 3. С. 155–164.
- [3] Mileiko S.T. Metal and Ceramic Based Composites. Amsterdam.: Elsevier, 1997. 691 p.

Влияние сдвиговой прочности между матрицей и волокном на прочность углеалюминиевой проволоки

С.Н. Галышев

Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна РАН, Черноголовка

В докладе представлена оценка зависимости прочности композита от сдвиговой прочности границы на основе экспериментальных данных, уточненного правила смеси, в соответствии с распределением Вейбулла, и оценки критического напряжения распространения трещины в соответствии с концепцией Гриффитса – Орована – Ирвина.

Effect of shear strength between matrix and fiber on the strength of carbon fiber-aluminum matrix wire

S.N. Galyshev

ISSP RAS, Chernogolovka, Russia

This report presents an assessment of the composite strength dependence on the shear strength of the boundary based on experimental data, the refined mixture rule, in accordance with the Weibull distribution, and the assessment of the critical stress of crack propagation, in accordance with the concept of Griffith – Orowan – Irwin.

Прочность волокнистых композитов во многом зависит от механических характеристик волокна и

матрицы, однако не менее важным параметром является сдвиговая прочность границы между ними.

Особое значение этот параметр имеет в композитах с металлической матрицей, что убедительно продемонстрировано в обзорах [1–3].

Так, в обзоре [1] автор выводит уточненное правило смеси для расчета прочности волокнистых композитов со слабыми границами в направлении армирования. Главный вывод, который делает автор, в том, что с уменьшением сдвиговой прочности границы снижается прочность композита. Это происходит по двум причинам: уменьшение сдвиговой прочности границы увеличивает критическую длину волокна; в соответствии с распределением Вейбулла с ростом длины волокна уменьшается его прочность.

В обзоре [2] на примере восьми типов композитов с металлической и керамической матрицами, а также в обзоре [3] на примере композита с алюминиевой матрицей, армированной оксидным волокном, показано, что слабая граница между матрицей и волокном приводит к торможению распространения магистральной трещины в плоскости перпендикулярной армированию, в результате чего прочность композита оказывается существенно выше, чем при сильной границе.

Таким образом, с одной стороны [1], уменьшение сдвиговой прочности снижает прочность композита, а с другой [2; 3] – наоборот. Качественная модель, которая учитывает оба эти фактора, описана в работе [4]. Согласно этой модели наибольшая прочность композита достигается при критической величине

сдвиговой прочности между матрицей и волокном. При этом, в случае если сдвиговая прочность границы меньше критического значения, прочность композита определяют в соответствии с уточненным правилом смеси [1]. В противном случае прочность определяется критическим напряжением распространения трещины.

В докладе представлена оценка зависимости прочности композита от сдвиговой прочности границы на основе экспериментальных данных, уточненного правила смеси, в соответствии с распределением Вейбулла, и оценки критического напряжения распространения трещины согласно концепции Гриффитса – Орована – Ирвина.

Список использованных источников

- [1] Curtin W.A. Ultimate strengths of fibre-reinforced ceramics and metals // *Composites*. 1993. Vol. 24, iss. 2. P. 98–102.
- [2] Evans A.G. The mechanical properties of reinforced ceramic, metal and intermetallic matrix composites // *Materials Science & Engineering A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*. 1991. Vol. 143, iss. 1/2. P. 63–76.
- [3] Deve H.E., McCullough C. // *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1995. Vol. 47, iss. 7. P. 33–37.

Технология обеспечения качества поверхности алюмоматричных композиционных материалов

Ю.С. Иванова, Д.В. Виноградов, И.И. Кравченко
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

В работе исследовано влияние размера армирующих частиц на шероховатость после точения, а также структура поверхностного слоя заготовки алюмоматричного композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава АК12 и наполнителем из карбида кремния. Предложена технология повышения качества поверхности для обеспечения требуемых в эксплуатации параметров. Предложено за счет одновременного воздействия потока концентрированной энергии и поверхностной пластической деформации понизить пористость и шероховатость поверхности, при этом обеспечивая точность получаемого размера.

Technology of surface quality provided of aluminum matrix composite materials

Y.S. Ivanova, D.V. Vinogradov, I.I. Kravchenko
BMSTU, Moscow, Russia

The influence of the size of reinforcing particles on the roughness after turning, as well as the structure of the surface layer of the workpiece of a composite material, with an AlSi12 aluminum alloy matrix and a silicon carbide particle, has been studied. A technology for improving the quality of the surface has been proposed to ensure the parameters required in operation. It is proposed to reduce the porosity and roughness of the surface due to the simultaneous action of the concentrated energy flow and surface plastic deformation, while ensuring the accuracy of the resulting size.

1. Введение

Современное авиастроение претерпевает изменения, требующие внедрения новых материалов, в том числе композиционных материалов на металлической основе [1]. Конкурентные преимущества изделий из таких материалов обеспечиваются прежде всего повышением прочностных и понижением весовых характеристик по сравнению с традиционно используемыми материалами [2]. Целенаправленное регулирование состава и совершенствование методов изготовления позволяет выйти на принципиально новый уровень эксплуатационных свойств при низкой себестоимости изготовления.

В настоящее время актуально заменять материалы деталей трущихся пар с бронзы на композиционные материалы с матрицей из алюминия (Al) и наполнителем из карбида кремния (SiC), преимущества которых перед традиционными материалами деталей трущихся пар были доказаны в работах ученых Т.А. Чернышовой, Ю.А. Кургановой, Есинори Нисиды (Япония) и др. на примерах применения в деталях машин, изготавливаемых такими машиностроительными предприятиями, как Lockheed Martin, Honda, Suzuki Motor и др.

Одной из основных причин выхода из строя

машин при нормальных условиях эксплуатации является износ функциональных поверхностей деталей машин вследствие концентраций напряжений в микронеровностях, а также действия паров жидкости окружающей среды, создающих в микронеровностях высокое давление, что приводит к изменению размеров в процессе эксплуатации. Влияние вышеуказанных факторов на срок службы машины снижают путем улучшения шероховатости функциональных поверхностей. Таким образом, шероховатость поверхности является одним из важнейших показателей качества деталей машин.

Шероховатость трущихся поверхностей деталей машин (кольца подшипников, опорные шейки валов, поршневые втулки блока цилиндров, тормозные диски и т.п.) составляет $Ra = 0,63 \dots 1,6$. Одним из методов достижения данных параметров является чистовое точение.

В работах [2; 3] приводят рекомендации компании Duralcan для режимов механической обработки, примеры удачного применения алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ) в деталях машин типа тормозных дисков, роликов конвейера и направляющих втулок поршней блока цилиндров. Ю.А. Курганова [2] обосновывает необходимость внедрения алюмоматричных композиционных

материалов с целью повышения эксплуатационных характеристик деталей машин для удовлетворения новых повышенных требований к прочности, жесткости и износостойкости.

АМКМ с наполнителем из карбида кремния обладает высокими временным сопротивлением и пределом выносливости (на 50...100% по сравнению с обычными сплавами), модулем упругости и коэффициентом жесткости, пониженной склонностью к трещинообразованию, высокой жаропрочностью и гидрофобностью.

В работах [4; 5] показано некоторое уменьшение силы резания и шероховатости обработанной поверхности при сверлении заготовок из АМКМ по сравнению с алюминиевым сплавом без добавок карбида кремния.

Ученые в [4] привели значения сил резания по результатам проводимого эксперимента при точении алмазным резцом АМКМ дисперсно-упрочненным карбидом кремния.

Твердость карбида кремния составляет около 75 HRC, что вызывает проблемы при обработке резанием из-за его твердости, близкой к твердости инструментального материала (алмаз, PCD ~ 80 HRC). При точении АМКМ, дисперсно-упрочненных карбидом кремния, карбид кремния выкрашивается с проточенной поверхности, оставляя на ней следы в виде лунок, что влияет на полученную шероховатость поверхности.

Однако методы лезвийной обработки таких материалов не позволяют повысить плотность, улучшить адгезию между матрицей и армирующими частицами, снизить пористость поверхностных слоев деталей и достаточно затратны при снижении шероховатости и обеспечении точности размеров. Предлагается технология финишной электромеханической обработки (ФЭМО), которая позволяет за один рабочий ход инструмента воздействовать на поверхностный слой концентрированным потоком энергии и одновременно пластически деформировать рабочую поверхность детали, формируя характерный для пластической деформации микрорельеф поверхности и требуемую точность размера.

2. Основная часть

В работе рассматривали втулки из алюмоматричного композиционного материала, армированного частицами SiC, полученные методом центробежного литья (рис. 1).

Центробежному литью предшествовало механическое перемешивание для равномерного распределения SiCp в матрице алюминиевого сплава,

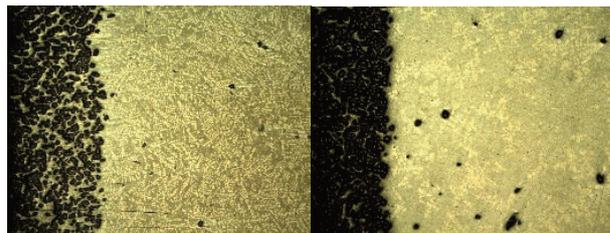


Рис. 1. Микроструктура образца состава АК12 + 5% SiC, × 50. Наружная поверхность втулки

благодаря разнице в плотности для вытеснения SiCp во внешнюю поверхность под действием центробежной силы. Размер частиц составляет 20 мкм, а содержание – 5%.

SiCp сначала подвергают предварительной обработке путем нагревания до 300°C, а затем смачивают в течение двух часов для удаления влаги и органических веществ. Затем его нагревают до 850°C и выдерживают в течение восьми часов при непрерывном перемешивании для образования на поверхности SiCp пленки оксида SiO₂, который вступает в реакцию с основой и улучшает смачиваемость. Затем его медленно добавляют в жидкость основного металла при температуре 700...750°C, контролируя скорость и время перемешивания, чтобы уменьшить окисление основного металла. Наконец, его помещают в машину центробежного литья.

Уравнение центробежной силы:

$$F = m\omega^2 R = \frac{\pi^2 m n^2 R}{900} \approx 0,011 m R n^2,$$

где F – центробежная сила; m – масса металлической жидкости; ω – угловая скорость вращения отливки; R – радиус вращения; n – скорость вращения.

$$\rho_{SiC} = 3,2 > \rho_{Al} = 2,7 \text{ г/см}^{-3}.$$

Плотность SiCp больше, чем плотность алюминиевой жидкости, и центробежная сила больше, поэтому легче смещать агрегацию к внешней поверхности втулки, тем самым увеличивая твердость

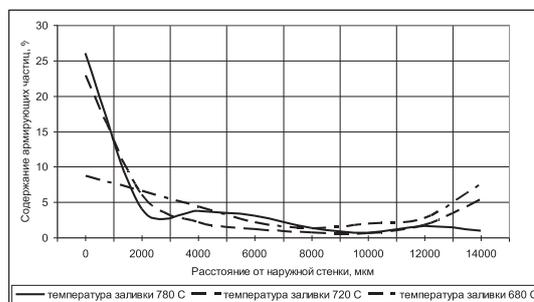


Рис. 2. Распределение армирующих частиц в образце состава АК12 + 5% SiC в зависимости от температуры заливки расплава, частота вращения в печи 1500 об/мин

внешней поверхности (рис. 2).

Производили последующую механическую обработку – точение по наружной, внутренней и торцовым поверхностям.

В процессе точения основным фактором, влияющим на шероховатость, являются частицы упрочняющей фазы в композиционном материале, их разные размеры могут вызвать значительные изменения шероховатости.

Исходя из геометрических характеристик этого сечения, найдем геометрическую жесткость сечения:

$$W_y = \frac{I_y}{X_{\max}} = \frac{I_{y1} - 2I_{y2}}{X_{\max}} = \frac{d^3}{6} - \left(\frac{\pi d^3}{32} + \frac{\pi d(d-\delta)^2}{4} \right),$$

где I_{y1} – момент инерции квадрата со стороной d относительно оси изгиба заусенца; I_{y2} – момент инерции полукруга диаметром $d - \delta$ относительно оси изгиба заусенца; X_{\max} – максимальное расстояние до оси изгиба заусенца.

$$W_y = \frac{P_z x}{\sigma},$$

где P_z – осевая сила резания; σ – предел прочности материала матрицы.

Формула для ширины заусенца (δ) может быть рассчитана как:

$$\delta = d - \sqrt{\frac{2d^2}{3\pi} - \frac{4P_z x}{\sigma d \pi} = \frac{d^2}{8}},$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d-\delta}{2}\right)^2}.$$

Окончательный результат таков:

$$\delta = d - \sqrt{\frac{2d^2}{3\pi} - \frac{4P_z \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d-\delta}{2}\right)^2}}{\sigma d \pi} - \frac{d^2}{8}},$$

$$R_z(d) = \frac{d}{2} - x.$$

Результаты расчета строятся в виде корреляционного графика (рис. 3).

С увеличением диаметра частиц повышается шероховатость поверхности. Основной причиной являются ямки, усадочные отверстия и другие дефекты, которые возникают, когда частицы отваливаются в процессе точения. Когда диаметр частиц слишком велик, это приведет к резкому увеличению шероховатости поверхности и ухудшит

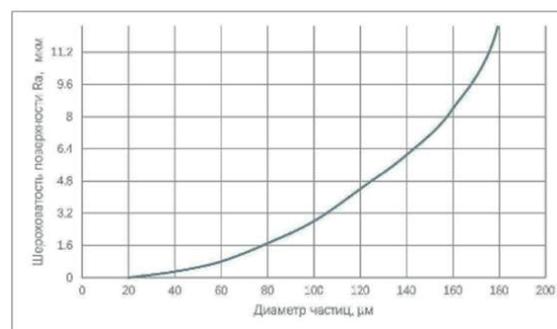


Рис. 3. Шероховатость поверхности материалов Al/SiCr в зависимости от размера частиц наполнителя

эксплуатационные характеристики деталей.

Производилась последующая механическая обработка – точение по наружной, внутренней и торцовым поверхностям.

Окончательную обработку втулок по геометрическим параметрам и свойствам производили с применением технологии электромеханической обработки.

В зависимости от назначения и типа обрабатываемых деталей для финишной электромеханической обработки могут быть использованы токарные, фрезерные и другие металлорежущие станки. В качестве источника переменного тока используют понижающие трансформаторы с питанием от сети напряжением 220/380 В. Мощность трансформатора выбирали в зависимости от технологического назначения: характера обрабатываемых деталей, их размеров, конструкции инструмента, серийности производства.

При ФЭМО изменяется микрогеометрия ранее обработанной поверхности, но сама форма детали остается без изменений. Поэтому втулки, обрабатываемые этим способом, не должны иметь отклонений геометрической формы, выходящих за пределы технических требований чертежа детали, полученной методом центробежного литья. В тех случаях, когда затруднительно точно установить детали, ФЭМО рекомендуется выполнять на том станке, на котором производили механическую обработку.

Резкое снижение шероховатости в зависимости от усилия ФЭМО в 6...12 раз по параметру Ra, в сравнении с исходной, объясняется воздействием больших пластических деформаций, точечного контакта и сдвиговых деформаций, возникающих в местах при скольжении ролика по обрабатываемой поверхности. Одновременно под действием повышенной температуры происходит сглаживание неровностей, остающихся на поверхности после прохода инструмента, что дает возможность получить

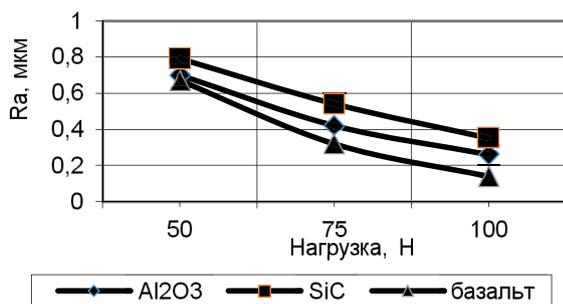


Рис. 4. Шероховатость в зависимости от типа армирующих частиц при ФЭМО втулки

более высокую чистоту обрабатываемой поверхности.

На рис. 4 представлен график изменения шероховатости по Ra в зависимости от усилия прижатия ролика к обрабатываемой поверхности. Можно отметить, что при равных условиях шероховатость уменьшается с увеличением усилия ФЭМО. Объясняется это, в первую очередь, физико-механическими свойствами исследуемых составов градиентных композиционных материалов (ГКМ) на базе алюминиевого сплава АК12.

При рассмотрении фотографий микроструктуры продольного разреза втулки после ФЭМО с силой тока 250 А сплошной слой с измененной структурой не образуется, но отчетливо видно формирование скоплений, глобул, что свидетельствует о наличии при ФЭМО процесса сглаживания. Микрорельеф поверхностного слоя втулки имеет сглаженную форму, что объясняется одновременным воздействием температуры и давления. Поверхностный слой имеет меньшую шероховатость для всех армирующих фаз ГКМ. Это подтверждает тот факт, что одновременно с высокотемпературным нагревом имеет место пластическая деформация.

На основании вышеизложенного ФЭМО является окончательным этапом обработки поверхности. В связи со своей конструктивной простотой ФЭМО может в полной мере заменять трудоемкие финишные операции, такие как шлифование, тонкое точение, полирование.

3. Заключение

Исследовано влияние размера частиц наполнителя при точении градиентного композиционного материала АК12 + 5%SiC на шероховатость поверхности деталей. Предложена и апробирована технология финишной электромеханической обработки втулок из градиентных композиционных материалов с целью получения высокой твердости, оптимальной шероховатости, плотности и износостойкости наружного поверхностного слоя. Микротвердость втулок после финишной электромеханической обработки увеличилась на 25...30% по сравнению с дисперсно-наполненными ГКМ и на 90...120% по сравнению с твердостью АК12.

Список использованных источников

- [1] Study of Cutting force and Surface Roughness in machining of Al alloy Hybrid Composite and Optimized using Response Surface Methodology / K. Venkatesan, R. Ramanujam, J. Joel, et al. // 12th Global Congress on Manufacturing And Management, GCMM 2014.
- [2] Курганова Ю.А. Перспективы развития металломатричных композиционных материалов промышленного назначения // Сервис в России и за рубежом. 2012. № 3 (30). С. 235–240.
- [3] Yoshinori Nishida. Introduction to Metal Matrix Composites: Fabrication and Recycling. Springer, 2013. 218 p.
- [4] Chen Y., Vinogradov D.V., Kurganov S.V. Cutting properties of aluminum matrix composites / Y // Journal of Physics: Conference Series. 2021. P. 012007. DOI 10.1088/1742-6596/1990/1/012007.
- [5] Обрабатываемость резанием композиционных материалов на основе алюминия / П.В. Аношко, З.Ю. Коссова, И. Чэнь и др. // Будущее машиностроения России: сборник докладов: в 2 т. Т. 1. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 3–5.

Программная реализация анализа прогрессирующего разрушения хрупкого композиционного материала

И.М. Курышев, А.Д. Худякова, Д.В. Сапронов
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Описана математическая модель прогрессирующего разрушения композиционного материала, в которой упругие свойства деградируют постепенно вследствие применения понижающих коэффициентов. Разработан программный код для ЭВМ на языке программирования фортран, реализующий данную модель. Код был интегрирован в расчетную среду Ansys APDL. Проведены расчеты испытаний образцов из композиционных материалов, которые сравнивались с данными испытаний. Сделаны выводы о возможностях применения данной программы.

Software implementation of the analysis of the progressive damage of a fragile composite material

I.M. Kuryshv, A.D. Hudyakova, D.V. Saprnov
BMSTU, Moscow, Russia

Mathematical model of the progressive damage of a composite material is described in which elastic properties degrade progressively due to using of loss coefficients. A program code that implements this model in the Fortran has been developed. The code was integrated into the Ansys APDL calculation environment. Calculations of tests of samples from composite materials were carried out and then they were compared with test data. Conclusions about the possibilities of using this program are made.

1. Введение

Композиционные материалы, применяемые в авиационной отрасли, ввиду особенностей структуры и состава для анализа их текущего напряженно-деформируемого состояния и прочностных свойств требуют специальных подходов, нетипичных для металлов и сплавов. В дополнение к этому методика расчета на прочность каких-либо изделий или конструкций из композитов должна включать в себя численное моделирование прогрессирующего разрушения.

2. Анализ прогрессирующего разрушения

В данной работе рассматривали прогрессирующее разрушение хрупкого ортотропного композиционного материала на примере керамоматричного композита C-SiC, а также углепластика. Для этого была выбрана математическая модель накопления повреждений на основе метода понижающих коэффициентов, разработанная для композиционных материалов. Понижающие коэффициенты для упругих характеристик материала определяют с использованием эквивалентных деформаций, вычисляемых на основе известных значений относительных деформаций в точке [1]. В качестве примера приводится формула для вычисления эквивалентной деформации растяжения волокна:

$$\delta_n^{eq} = L^c \sqrt{\langle \varepsilon_{11} \rangle^2 + \alpha \varepsilon_{12}^2 + \alpha \varepsilon_{13}^2}, \quad (1)$$

где δ_n^{eq} – эквивалентное перемещение, ε_{11} , ε_{12} , ε_{13} – относительные деформации, $\langle x \rangle = 0,5(|x| + x)$ – оператор Маколея, α – параметр учета влияния сдвиговых деформаций на продольные деформации волокна, L^c – характеристическая длина.

При этом учитывается направление деформаций для возможности описания растяжения или сжатия. Коэффициент разрушения принимает значения от 0 до 1, определяя тем самым степени разрушения материала и снижения характеристик. При накоплении повреждений упругие свойства деградируют не мгновенно, а постепенно, плавно разрушая композит. Коэффициент разрушения определяли с помощью зависимости

$$D = \frac{\delta_c(\delta - \delta_0)}{\delta(\delta_c - \delta_0)}, \quad (2)$$

где δ – текущее эквивалентное перемещение, δ_0 и δ_c – эквивалентные перемещения, задающие границы разрушения.

Хотя подход к описанию свойств композиционного материала феноменологический, тем не менее формулы позволяют выделить снижение характеристик для различных компонентов, как матрицы, так и волокна. Для этого принимается

допущение, что вследствие ортотропии свойств, при действии сил в различных направлениях, основную роль в принятии нагрузки играют разные компоненты, поскольку напряжения будут распределяться неравномерно. Этот подход привел к применению авторами соотношений для описания коэффициентов разрушения волокна и матрицы [2].

Границы разрушения определяются критериями разрушения, выбираемыми в соответствии с условиями расчета и конкретного материала.

В случае полного разрушения в какой-то точке сразу обоих компонентов композита, когда коэффициент деградации становится равным единице для волокна и матрицы одновременно, математически следует, что данная точка имеет нулевую жесткость по всем направлениям, что дает возможность считать это место трещиной в материале. Учитывая невозможность уменьшения D , трещина способна либо оставаться неизменной, либо прогрессировать, например образовываясь в соседних точках.

Данная математическая модель прогрессирующего разрушения была реализована на языке программирования фортран для возможности проведения расчетов конструкций методом конечных элементов. Программный код можно интегрировать в различные расчетные комплексы, например Ansys или Abaqus, поддерживающие возможность создания пользовательского материала [3]. Для обеспечения корректной работы программы предполагается итерационный расчет с малым приращением нагрузки, и чем более плавно идет ее прирост или уменьшение, тем точнее проходят вычисления.

При каждой итерации на основе значений относительных деформаций в данном конечном элементе вычисляются сначала эквивалентные деформации, а затем и сами понижающие коэффициенты. Далее переопределяется матрица жесткости материала и пересчитываются напряжения, после чего наступает новая итерация. Особенностью работы данной программы является то, что расчет в течение итерации происходит линейный, на основе закона Гука, а нелинейность зависимости напряжений от деформаций обеспечена деградацией свойств материала. Это дает возможность увеличить скорость расчета в пределах итерации, несмотря на рост общего их числа, поскольку вычисления производятся в упругой зоне по относительно простым формулам решателя программы.

В логику и возможности программы были внесены некоторые дополнительные нововведения, которые отсутствовали в математической модели, а также улучшения для комфортной работы пользователя. В частности, были введены обширные возможности по

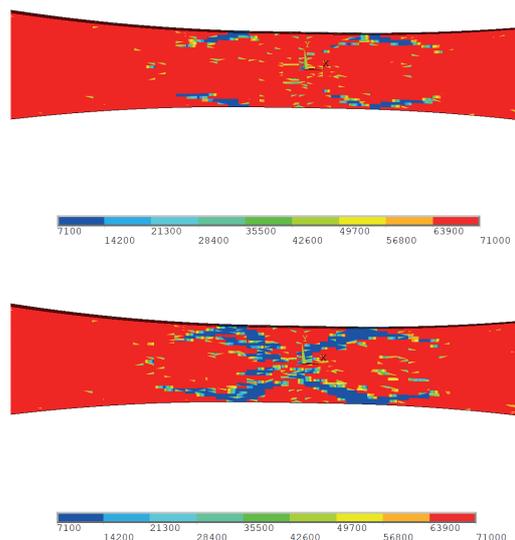


Рисунок. Деградация упругих характеристик на примере модуля Юнга E_{11}

отображению различных параметров в Post Processor, таких как эквивалентные перемещения, коэффициенты разрушения, деградировавшие упругие характеристики, элементы, соответствующие трещине, и т.д. Также возможно поитерационно визуально отслеживать изменение свойств и рост трещины в материале, причем в зависимости от знака нагрузки. Пример визуализации постепенного снижения упругих свойств показан на рисунке.

Доступно несколько критериев разрушения для обеспечения гибкого применения данной методики. Удобной стороной для пользователя является и то, что редактировать код данной программы можно без применения специальных технических средств.

С помощью разработанной программы была проведена серия расчетов, имитирующих реальные испытания некоторых композиционных материалов (керамический C-SiC и углепластик) на различные виды нагрузок. Для этого в Ansys APDL была интегрирована разработанная программа, и были построены образцы для испытаний. Сравнение результатов расчета с реальными результатами испытаний позволяет сделать вывод о допустимости применения данного метода анализа прочностных свойств композиционного материала и о границах его применения.

3. Заключение

Составлена математическая модель описания прогрессирующего разрушения композиционного материала для анализа его прочностных свойств. Разработан программный код для реализации данной модели и интеграции в расчетную среду для

вычислений методом конечных элементов в соответствии с описанной математической моделью. Проведены расчеты, имитирующие результаты испытаний на различные виды нагрузок с образцами из композиционных материалов. Сравнение результатов расчета с данными имитируемых испытаний показывает возможность получения результатов с допустимой погрешностью

Список использованных источников

[1] Guo Q., Yao W., Li W. Constitutive models for the

structural analysis of composite materials for the finite element analysis: A particular review of recent practices // *Composite Structures*. 2021. Vol. 260. P. 113–135.

[2] Zhang C. Progressive damage simulation of triaxially braided composite using a 3D meso-scale finite element model // *Composite Structures*. 2015. Vol. 125. P. 104–116.

[3] Arruda M.R., Trombini M., Pagani A. Implicit to explicit algorithm for AABAQUS standart USER-SUBROUTINE UMAT for a 3D Hashin-based orthotropic damage model // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 1155.

Система крепления теплозащитной футеровки из высокопористого керамического волокнистого композита к металлической подложке

А.А. Петухов, Н.Ю. Филатов
Филиал АО «ОДК» «НИИД», Москва

Приведена краткая характеристика волокнистого керамического композиционного материала, разработанного авторами для теплозащитной футеровки поверхностей статорных деталей горячего тракта газотурбинного двигателя. Сделан обзор конструкторских и технологических подходов к системам крепления футеровки к подложке, выработанных в практической работе, позволяющих обеспечить простоту и доступность производственных процессов, а также функциональную достаточность и надежность в эксплуатации. Рассмотрены испытания систем крепления футеровки, обоснован выбор видов испытаний. Сделан вывод о работоспособности предложенных конструкций и технологий и о возможности применения разработок к другим керамическим материалам.

The system of fastening a heat-protective lining made of highly porous ceramic fiber composite to a metal substrate

A.A. Petukhov, N.Y. Filatov
“SRIE”, branch of the JSC “UEC”, Moscow, Russia

A brief description of the fibrous ceramic composite material developed by the authors for the heat-protective lining of the surfaces of the stator parts of the hot gas path of the gas turbine engine is given. An overview of design and technological approaches to lining fastening systems to the substrate, developed in practical work, allowing for simplicity and accessibility of production processes, as well as functional sufficiency and reliability in operation is made. Tests of lining fastening systems are considered, the choice of types of tests is justified. The conclusion is made about the operability of the proposed structures and technologies, and about the possibility of applying the developments to other ceramic materials.

Материал теплозащитной футеровки – высокопористый волокнистый оксид-оксидный композит (ВОК-А). Армирующий компонент – хаотически ориентированные дискретные алюмосиликатные (муллитовые) волокна. Матрица корундовая, создается в виде отдельных перемычек или мостиков, соединяющих волокна между собой в местах их соприкосновения. Условная пористость материала

50...70%, плотность 0,8...1,5 г/см³. Макроструктура под увеличением имеет сходство с войлоком.

Вследствие такой структуры материал имеет очень низкую теплопроводность и очень высокую термостойкость. Эти свойства, а также низкая плотность и высокая химическая инертность делают ВОК-А привлекательным для применения в горячем тракте газотурбинного двигателя (ГТД), в частности,

для создания неохлаждаемой жаровой трубы (ЖТ) камеры сгорания (КС).

Однако из-за такой макроструктуры ВОК-А обладает невысокой общей и контактной прочностью. Эта особенность требует специального подхода к способам крепления футеровки на поверхности металлических стенок, особенно с учетом существенно более низкого коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) по сравнению с материалом подложки.

Работы по футерованию на начальном этапе были ориентированы на трубчатую КС.

На трактовую поверхность трубы приваривали сетку, в которую втирали сырой пастообразный материал (тесто) ВОК-А, и затем формировали слой футеровки заданной толщины. Таким образом, получали распределенное неразъемное соединение футеровки с подложкой. После сушки спекали горелкой поверхностный слой футеровки. Этот вариант был испытан, работоспособность такой системы обеспечивалась сравнительно высокой податливостью неспеченного слоя футеровки в зоне соединения с металлом и главным образом геометрией объекта, обеспечивающей невозможность какого-либо смещения футеровки.

Попытки применить такой подход к изделиям плоской формы или с маленькой кривизной были неудачны, футеровка не выдерживала напряжений среза, возникающих в плоскости соединения с подложкой при нагревании. Геометрия ЖТ кольцевых КС относится к таким изделиям, также как и зона уплотнения радиального зазора турбины, где можно использовать надроторные вставки из ВОК-А.

Исходя из этого были сформированы требования к системе крепления, выполнение которых обеспечивало надежную и длительную эксплуатацию футеровки:

- футеровка должна изготавливаться из отдельных элементов небольшого размера для снижения термомеханических напряжений;

- каждый футеровочный элемент после закрепления должен иметь возможность перемещаться в плоскости подложки во всех направлениях в пределах не меньших, чем относительное тепловое перемещение границ элемента и соответствующего ему участка подложки при максимально возможной в эксплуатации разнице температуры;

- должно быть исключено свободное перемещение футеровочного элемента в нормальном по отношению к подложке направлении;

- необходимо предотвратить прямой контакт металлической подложки с композитом, ввиду его невысокой контактной прочности, во избежание

истирания при тепловых перемещениях;

- для снижения локальных контактных напряжений при установке футеровочных элементов, а также для компенсации снижения натяга крепежных элементов при нагреве нужно устанавливать упругодеформирующиеся прокладки.

Были разработаны два способа реализации системы крепления, которые соответствуют указанным выше требованиям.

Первый способ основан на закреплении с помощью проволоки, которая проходит через каналы в теле футеровочной плитки, концы ее пропущены через отверстия в подложке и закреплены на внешней стороне подложки (стенки ЖТ). Каналы могут быть сформированы либо сверлением заготовки, с последующим упрочнением их поверхности, либо с использованием закладных элементов – отрезков алундовой трубки, уложенных в пресс-форму перед формованием заготовки футеровочной плитки.

Этот способ пригоден для тонких подложек, поскольку необходимо выполнить в них большое количество отверстий. При этом он позволяет закрепить футеровку на поверхности практически любой формы, с кривизной любого знака и порядка.

Проработаны два варианта этого способа. В первом варианте используют толстую проволоку, натяжение и закрепление которой выполняют загибом свободных концов через опоры, установленные над отверстиями с обратной стороны подложки. Во втором варианте используют U-образные петли из более тонкой проволоки, которые через небольшие проемы заводят в канал и фиксируют с помощью введенного в канал металлического стержня. При монтаже футеровки свободные концы петель выводят через отверстия на внешнюю сторону подложки и скручивают, обеспечивая натяг и фиксацию.

Второй способ закрепления основан на применении г-образных профилированных крепежных элементов из тонколистового металла (фольги), приваренных к подложке, и пазов, выполненных в боковых противоположных гранях футеровочных плиток, параллельно их опорной поверхности. При монтаже футеровки плитки прижимают к подложке и заводят между крепежными элементами так, чтобы края крепежных элементов заходили в пазы, фиксируя плитку.

Данный способ может быть реализован при одностороннем доступе к подложке, а также на толстых подложках, поскольку не требуется их перфорация.

Но требования к геометрии подложки здесь более жесткие, чем в первом способе: могут использоваться плоские, цилиндрические и конические поверхности.

Впрочем, этот набор достаточен, чтобы получить нужную геометрию ЖТ КС любого типа. В связи со спецификой технологии футерования по этому способу есть ограничения на технологию сборки ЖТ: невозможно футеровать полностью собранную ЖТ, она должна собираться из уже футерованных секторов и сегментов стенок. Соответственно, конструкцию ЖТ целесообразно сделать разборной, чтобы при необходимости можно было заменить футеровочные блоки.

Испытания систем крепления футеровки проводили по следующим параметрам:

- на устойчивость к длительным вибронагрузкам: 1500 ч;
- на устойчивость к перемещениям при высокой температуре: 50 тыс. циклов;
- на устойчивость к высокоамплитудным вибронагрузкам: перегрузка более 300 g.

Вибронагрузки являются основным видом механического воздействия на систему крепления футеровки.

Динамическое воздействие газового потока не является значимым, поскольку в камере сгорания скорости потоков невелики, а в турбине направление потока тангенциально поверхности футеровки. Температурным и коррозионным воздействием газового потока тоже можно пренебречь, поскольку крепежные элементы защищены слоем футеровки.

Для проверки работоспособности систем крепления в условиях турбины на специально разработанном для этого стенде были проведены испытания длительностью 1512 ч на режиме, соответствующем максимально допустимым значениям параметров вибрации (частоты и виброскорости) задней опоры ГТД (300 Гц, 40 мм/с). Испытания прошли успешно, для обоих способов крепления ослабления и разрушения элементов крепежа не обнаружилось.

Также были проведены испытания, имитирующие тепловые перемещения системы образец – подложка, которые появляются в результате большой разницы в КЛТР между ВОК-А и материалом подложки. Вместо тепловых перемещений образца создавали механические перемещения, используя внешний привод. В этом качестве использовали стенд для усталостных испытаний, на статорной части которого был закреплен испытуемый образец (футеровочная плитка и система ее крепления на подложке). В плитку

был вклеен стержень, к которому прилагалось усилие для перемещения плитки относительно подложки. Усилие создавалось стойкой, установленной на динамической части стенда, которая посредством паза подвижно, но без зазора, соединялась со стержнем.

Амплитуда колебаний стенда была $\pm 0,2$ мм, что заведомо превышало амплитуду тепловых перемещений, частота колебаний была 10 Гц. Для того, чтобы снять вопросы о влиянии температуры, испытательный образец был помещен в печь, нагретую при испытаниях до 700°C.

Такой подход позволил быстро, за 1,5 ч, набрать планируемые 50 тысяч циклов перемещений, тогда как традиционные термоциклические испытания с нагревом образцов горелкой длились бы не менее 2000 ч.

Для выяснения предельных возможностей футеровки из ВОК-А и системы ее крепления противостоять вибрационным нагрузкам образец был закреплен на металлической пластине, консольно зафиксированной на вибростенде. Испытания проводились на резонансной частоте (175 Гц), на полной мощности стенда, перегрузка на образце составляла 327 g. Испытания длились 1 ч, были остановлены из-за перегрева стенда. Никаких повреждений образца и системы закрепления не выявлено.

Заключение

Авторы попытались сформулировать и обобщить некоторые конструкторские и технологические приемы монтажа, или закрепления, элементов теплозащитной футеровки на металлических подложках, выработанные в процессе практической деятельности. Многие из сказанного здесь применимо не только к высокопористому волокнистому оксид-оксидному композиту, с которым авторы работают, но для любых керамических материалов, работающих в условиях высоких температур, футеровка из которых должна быть расположена на металлической подложке.

Обоснованность этих приемов подтверждается, по мнению авторов, проведенными испытаниями и полученными в них положительными результатами, по крайней мере, по тем параметрам, которые представлялись авторам важными с учетом условий эксплуатации объектов.

Оценка влияния технологических параметров намотки на устойчивость лайнера металлокомпозитного баллона при его изготовлении

А.А. Склезнев, Т.М. Рыжова, А.А. Кузьмин
АО «ЦНИИСМ», Хотьково

В работе рассматривается лайнер металлокомпозитного баллона, который одновременно с герметизацией баллона выполняет функцию неизвлекаемой технологической оснастки или оправки и должен оставаться неповрежденным как в процессе изготовления металлокомпозитного баллона, так и на этапе его эксплуатации. Одним из параметров процесса автоматизированной намотки, влияющих на характеристики материала и скорость изготовления баллонов, является сила натяжения ленты наматываемого материала, приводящая к возникновению внешнего давления и возможной потере устойчивости лайнера. Приведен алгоритм определения технологических параметров намотки, исключающих потерю устойчивости лайнера, и даны рекомендации по выбору оптимальных параметров изготовления намоткой металлокомпозитных баков.

Evaluation of the influence of technological parameters of winding on the stability of the metal-composite cylinder liner during its manufacture

A.A. Skleznev, T.V. Ryzhova, A.A. Kuzmin
JSC "CRISM", Khotkovo, Russia

The paper considers the liner of a metal-composite vessel, which, simultaneously with the sealing of the cylinder, performs the function of a non-removable tooling or mandrel, and must remain intact both during the manufacture of a metal-composite vessel and at the stage of its operation. One of the parameters of the automated winding process that affects the characteristics of the material and the speed of production of vessels is the tension force of the tape of the wound material, which leads to the appearance of external pressure and possible loss of stability of the liner. An algorithm for determining the technological parameters of winding, excluding the loss of liner stability, is given, and recommendations for choosing the optimal winding parameters for manufacturing of metal-composite vessels are given.

1. Введение

Вопросы создания перспективных летательных аппаратов неразрывно связаны с повышением их весовой эффективности. Композитные баллоны высокого давления в отличие от баллонов, изготовленных из конструкционных материалов на основе металлических сплавов, обладают значительно (до 2–3 раз) более низким весом. В баллоне высокого давления, выполненном с применением армированных полимерных композиционных материалов (КМ), кроме КМ используется изотропный тонкостенный герметизирующий лайнер, представляющий собой тонкостенную оболочку вращения. Композиционный материал используется для обеспечения заданной прочности баллона и воспринимает внутреннее давление содержимого баллона. При намотке с предварительным натяжением на оболочку передается наружное давление, которое может привести к потере устойчивости и герметичности лайнера. На рис. 1 показана форма потери устойчивости оболочки из

термопласта.

В настоящее время при серийном изготовлении металлокомпозитных баллонов высокого давления намоткой (рис. 2) технологические параметры намотки напрямую не увязываются с конструкцией изготавливаемого баллона и требованиями, предъявляемыми к нему. Так, сила натяжения ленты композитного препрега обыкновенно определяется при проведении технологической обработки изделия путем перебора разных значений в ручном режиме, что повышает стоимость разработки новых изделий в силу увеличения трудоемкости и возможного разрушения опытных образцов. Сила натяжения при намотке баллона является важным параметром [1; 2], который, с одной стороны, определяется технологическими возможностями оборудования, а с другой – временем, затраченным на изготовление изделия, и напрямую влияет на себестоимость, трудоемкость и механические характеристики изготавливаемого материала силовой оболочки.



Рис. 1. Форма потери устойчивости изотропного лайнера при намотке системы нитей



Рис. 2. Процесс намотки металлокомпозитного баллона

2. Решение поставленной задачи

Моделируя технологический процесс намотки баллона давления, можно сделать вывод, что наибольшие усилия возникают в металлокомпозитном баллоне (и его металлическом лайнере) в кольцевом направлении. Исходя из этого, для моделирования процесса технологической намотки баллона достаточно рассмотреть бесконечную тонкостенную цилиндрическую оболочку, нагруженную внешними силами, вызванными силой натяжения жгута при намотке в кольцевом (окружном) направлении, так как превышение некоторого критического значения напряжений, возникающих в материале лайнера, может вызвать потерю устойчивости конструкции лайнера в кольцевом направлении и, как следствие,

разрушение конструкции баллона давления.

Математическая модель решаемой задачи заключается в следующем. На первом этапе определяется напряжение, возникающее в металлическом герметизирующем лайнере баллона давления в процессе намотки силового композитного слоя (σ_y), зависящее от толщины оболочки, углов намотки спиральных слоев, толщины спиральных и кольцевых слоев, модулей упругости материалов и собственно силы натяжения ленты композиционного материала. На втором этапе вычислений определяется критическая величина натяжения жгута (σ_{cr}), которая может привести к потере устойчивости металлического лайнера [3; 4]. Таким образом, вычисляя σ_y для различных расчетных случаев:

– минимальное натяжение, которое обеспечивает работоспособность нитепропиточного тракта намоточного оборудования, $\sigma_{min} = 0,12$ МПа;

– натяжение с величиной 10...15% от разрушающего натяжения сухой нити, $[\sigma]_{10...15\%}$ – для обеспечения наилучших характеристик отвержденного материала [1];

– натяжение потери устойчивости металлического лайнера σ_{cr} , по формуле [3]:

$$\sigma_{cr} = \lambda_{cr}^2 D / R^2 h,$$

а затем, производя их сравнение, можно определить наиболее подходящую с конструктивно-технологической стороны задачи силу натяжения ленты композитного материала, которая будет отвечать следующему соотношению:

$$\sigma_{min} < \sigma_y \leq [\sigma]_{10...15\%} < \sigma_{cr}.$$

Описанный алгоритм решения задачи следующий:

- 1) ввод геометрических параметров изделия;
- 2) ввод характеристик используемых материалов;
- 3) вычисление расчетных напряжений в лайнере;
- 4) проверка соотношений и вывод результатов.

Для оценки уровня возникающих напряжений при намотке металлокомпозитных баллонов давления могут быть использованы измерительные системы неразрушающего контроля в режиме реального времени [5]. Для этого в процессе изготовления на поверхность изотропного герметизирующего лайнера и внутрь силовых композитных слоев имплементируются деформационные и температурные датчики на основе оптоволокон с нанесенными решетками Брэгга. Отчет об опыте применения таких систем и технологии обеспечения сохранности выводов датчиков и их работоспособности в процессе изготовления опубликован в работе [5]. При помощи указанных измерительных систем в режиме реального времени можно получать информацию по

деформациям изотропного лайнера в процессе намотки композитных силовых слоев, а также в процессе температурного отверждения баллона и далее, на протяжении всех этапов жизненного цикла изделия, включая испытания баллонов и их эксплуатацию.

3. Заключение

Предложенный в работе алгоритм расчета технологических параметров намотки позволяет значительно сократить трудоемкость и стоимость создания новых конструкций баллонов давления и снизить расходы на отработку процесса их изготовления, избежав вероятных повреждений тонкостенного герметизирующего лайнера баллонов в процессе автоматизированной мокрой намотки. Кроме этого, с помощью алгоритма может быть определена сила натяжения, приводящая к росту механической прочности готового материала и увеличивающая скорость изготовления металлокомпозитных баллонов давления при помощи автоматизированной намотки.

Список использованных источников

- [1] Склезнев А.А., Разин А.Ф., Бабичев А.А. Исследование взаимного влияния заготовки изделия из полимерного композиционного материала и технологической оправки друг на друга в процессе изготовления при температурной обработке // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 1 (47). С. 56–60.
- [2] Мироненко Е.Д., Склезнев А.А., Бабичев А.А. К вопросу обеспечения оптимального натяжения вант композитного бака высокого давления космического аппарата // Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина». 2019. № 1/43. С. 66–70.
- [3] Васильев В.В., Салов В.А., Склезнев А.А. Устойчивость бесконечно длинной цилиндрической оболочки под действием наружного давления, создаваемого намоткой гибких нитей // Известия РАН. Механика твердого тела. 2022. № 6. С. 63–71.
- [4] Vasiliev V.V., Salov V.A., Skleznev A.A. Stability of an infinitely long cylindrical shell under the external pressure generated by winding flexible threads // Mechanics of Solids. 2022. Vol. 57, iss. 6. P. 1330–1337.
- [5] Интегрирование волоконно-оптических датчиков в композитный цилиндрический корпус из углепластика, изготовленный способом непрерывной намотки / В.А. Анискович, О.Н. Будадин, С.О. Козельская, Ю.Г. Кутюрин, А.Н. Рыков, А.А. Склезнев, П.И. Гнусин, О.А. Юранев // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 2. С. 16 – 23.

Анализ проблем применения деталей из композиционных материалов в конструкции вспомогательного двигателя

А.Л. Николаев¹, М.А. Пронина¹, А.Б. Вербицкий²

¹ АО «НПП «Аэросила», Ступино

² АО «ИНУМиТ», Москва

Рассмотрена возможность изготовления из полимерных композиционных материалов деталей двигателя ТА18-200.

Analysis of the problems of using parts made of composite materials in the design of an auxiliary engine

A.L. Nikolaev¹, M.A. Pronina¹, A.B. Verbitckii²

¹ JSC SPE "AEROSILA", Stupino, Russia

² JSC "INCMaT", Moscow, Russia

The possibility of manufacturing parts of the TA18-200 engine from polymer composite materials was considered.

Разработанный АО «НПП «Аэросила» современный вспомогательный газотурбинный двигатель (ВГТД) ТА18-200 и его модификации применяются на самолетах Ту-204/214, Ан-124-100, Ан-70, также его предполагается применять на самолете – МС-21. Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволит уменьшить массу двигателя и, следовательно, повысить его удельную мощность. С этой целью проведен анализ проблем применения композиционных материалов в деталях двигателя. Рассмотрены детали из композитов как уже включенные в конструкцию двигателя, так и предполагаемые для реализации в составе ВГТД.

В составе базового двигателя ТА18-200 выполнен корпус клеммной колодки генератора из прессовочного материала АГ-4В (ГОСТ 20437-89).

В составе модификации ТА18-200МСМ серии 2 верхний и нижний кожухи воздухозаборника будут изготовлены из углепластика на основе препрега бисмалеимидного М250 (ТУ 23.99.14.074-59846689-2022) разработки АО «ИНУМиТ».

Определены детали, которые также могут быть изготовлены из ПКМ и применены в конструкции ВГТД ТА18-200:

- фланец привода генератора;
- переходник насоса-дозатора;
- корпус маслоагрегата;
- маслобак;
- крышка;
- лопатки входного направляющего аппарата;
- лабиринт колеса служебного компрессора;
- патрубок выхлопной.

Детали, которые будучи изготовленными из ПКМ не могут применяться в составе двигателя ТА18-200, вместо существующих металлических деталей:

- картер редуктора;
- корпус опоры;
- диафрагма;
- корпус улитки;
- корпус входа;
- корпус входа служебный;
- вставка входная служебного компрессора;
- корпус входного направляющего аппарата;
- колесо служебного компрессора;
- вал служебного компрессора.

Ограничения, препятствующие применению деталей из ПКМ в составе двигателя:

- высокая температура эксплуатации детали;
- ресурс детали;
- точность изготовления (посадки);
- большая разница термических расширений соединенных деталей из ПКМ и металлических материалов;
- необходимость использования дополнительных крепежных элементов для соединения деталей из ПКМ с другими деталями, что приводит к усложнению геометрии и увеличению массы.

Таким образом, использование ПКМ для изготовления деталей двигателя ТА18-200 является эффективным методом снижения массы. Изготовление из ПКМ таких деталей, как колесо компрессора и вал компрессора, потребует конструирования нового двигателя.

Применение эпоксидных конструкционных клеев А-77Н и АТ-44К

С.А. Гусев
АО «ИНУМиТ», Москва

В работе приведены свойства, современные и перспективные области применения семейства новых эпоксидных клеев А-77Н и АТ-44К.

Application of epoxy structural adhesives A-77N and AT-44K

S.A. Gusev
JSC «INCMaT», Moscow, Russia

The paper presents the properties, areas of application and promising areas of application of the family of new epoxy adhesives A-77N and AT-44K.

1. Введение

Применение в авиастроении полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродного волокна началось в 1960-х годах. До 2000-х годов их доля не превышала 20%, однако снижение массы воздушного судна ведет к повышению его экономической эффективности. Как следствие, спрос на внедрение изделий из ПКМ в конструкциях неуклонно растет. Одним из наиболее удачных примеров использования ПКМ в гражданской авиации являются самолеты Boeing 787 (США) и Airbus A350 (Европа), где объем ПКМ в конструкции по весу составляет порядка 50% [1].

С увеличением доли композиционных материалов возникает потребность в новых технологиях и материалах для ремонта изделий, так как традиционные способы ремонта или замены деталей экономически могут быть не выгодными. Одним из наиболее распространенных видов дефектов в деталях, образующихся в ПКМ, является расслоение. Оптимальный современный способ ремонта – жидкофазное нанесение клея в дефектную зону. Данный метод эффективнее болтового ремонта и позволяет вернуть механические свойства детали практически к ее исходному состоянию [2].

Таким образом, широкое применение в авиастроении нашли эпоксидные клеи холодного отверждения благодаря высокой адгезии к ПКМ, высоким физико-механическим свойствам, химической стойкости и технологичности. Применение жидких эпоксидных клеев позволяет производить ремонт деталей даже в полевых условиях, без привлечения специализированного оборудования.

Разработка тиксотропных клеев холодного отверждения для заполнения зазоров при сборке конструкций различного рода деталей из ПКМ и

металлов также является одним из перспективных направлений в авиа- и вертолетостроении.

ИНУМиТ разработал семейство конструкционных эпоксидных клеев холодного отверждения для различного применения.

2. Семейство эпоксидных клеев АО «ИНУМиТ»

Клей эпоксидный А-77Н разработан как аналог клеев EA9396 и ВК-27, которые широко применяются для ремонта ПКМ и металлов. С их помощью появляется возможность доработки поверхности деталей методом ручной выкладки в связи с низкой вязкостью. Клеявые соединения на основе А-77Н способны длительно эксплуатироваться при температуре 180° и кратковременно – вплоть до 250°.

Тиксотропные клеи АТ-44К, АТ-44М и АТ-44Д разработаны для применения при сборках конструкций из ПКМ или металлических сплавов для заполнения зазоров до 3 мм. АТ-44Д применяется в узлах, где необходимы диэлектрические свойства. АТ-44М разработан для обеспечения высоких механических свойств при температуре не более 85°С,



Рисунок. Семейство эпоксидных клеев АО «ИНУМиТ»

как правило, для внутреннего применения. АТ-44К был разработан как аналог зарубежного клея EA9394. Клей АТ-44К применяется в качестве жидкой прокладки при стапельной сборке с обеспечением высоких сдвиговых-изгибных нагрузок в широком диапазоне температур от –60 до +250°C.

3. Заключение

В работе проведено сравнение эпоксидных клеев холодного отверждения А-77Н и АТ-44К, разработанных в АО «ИНУМиТ», с их зарубежными и отечественными аналогами. А-77Н и АТ-44 обладают высокими механическими свойствами во всем диапазоне температур, что позволяет применять их в различных конструкциях в авиа- и вертолетостроении.

Список использованных источников

- [1] An investigation of repair methods for delaminated composite laminate under flexural load / Byeong-Su Kwak, Gwang-Eun Lee, Gyu-Seok Kang, Jin-Hwe Kweon // Composite Structures. 2019. № 215. P. 249–257.
- [2] Шарова И.А. Отечественный и зарубежный опыт в области разработки эпоксидных клеев холодного отверждения // Труды ВИАМ. 2014.
- [3] LOCTITE EA9396.6MD AERO : technical data sheet / LOCTITE. 2021. 3 p.
- [4] LOCTITE EA 9394 AERO Epoxy Paste Adhesive : technical data sheet / LOCTITE.
- [5] Справочник «Авиационные материалы» Т. 10 «Клеи, герметики, резины, гидрожидкости». Ч. 1. Клеи, клеевые препреги. 7-е изд. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021.

Высокотемпературные дисперсно-наполненные композиционные материалы с фталонитрильной матрицей

А.В. Иванченко, О.С. Морозов, А.В. Кепман
АО «ИНУМиТ», Москва

Наиболее термостойкими из известных полимерных материалов являются фталонитрильные смолы. Они позволяют создавать конструкции из композитов для эксплуатации при температуре 300°C и выше. В рамках данной работы были рассмотрены подходы к получению полимерных композиционных материалов с фталонитрильной матрицей с различными дисперсными наполнителями.

High-temperature dispersed-filled composite materials with phthalonitrile matrix

A.V. Ivanchenko, O.S. Morozov, A.V. Kepman
JSC “INCMaT”, Moscow, Russia

Phthalonitrile resins are known as the most heat-resistant polymer material that allow to manufacture composite structures operating at temperatures of 300°C and above. In this work approaches to obtaining dispersion-filled polymer composite materials with a phthalonitrile matrix.

1. Введение

В современном мире для получения высокотехнологичных изделий выдвигаются все более и более высокие требования к конструкционным материалам. Особенно требовательными к качеству конструкционных материалов традиционно являются аэрокосмическая и военная промышленности, где в последние десятилетия наблюдается систематическая замена металлических деталей на изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

К основным преимуществам ПКМ относятся высокие удельные механические свойства, что позволяет значительно снизить вес конечного изделия. Этот фактор особенно важен в двигателестроении, где доля металлических деталей наиболее высока. В частности, замена металлических лопаток на композиционные позволит снизить вес не только компрессора, но и защитного экрана, что приведет к существенному уменьшению веса всего двигателя. Однако применение ПКМ в горячих частях двигателей ограничено химической природой полимерной матрицы.

Большинство существующих смол, таких как бензоксазиновые, фенолформальдегидные, цианатэфирные и бисмалеимидные, можно использовать только при температурах до 270°C. Относительно новым классом высокотемпературных связующих являются фталонитрильные смолы, обладающие температурой стеклования выше 450°C. Материалы на их основе могут длительно эксплуатироваться при температуре 300°C и даже выше в условиях безокислительной среды. К настоящему моменту разработаны составы связующих для автоклавного формования ПКМ из препрегов [1; 2], а также низковязкие составы для вакуумной инфузии [3; 4]. Изготовление изделий сложной геометрии инъекционными методами или выкладкой из препрегов может быть затруднительно, поэтому большой интерес представляют дисперсно-наполненные пресс-материалы. Материалы на основе микросфер, а также армированные полимерные пены можно применять в качестве наполнителя сотовых конструкций. ПКМ, армированные рублеными или молотыми волокнами, можно использовать в качестве самостоятельного конструкционного материала. Хотя дисперсно-наполненные ПКМ изучены для широкого спектра полимерных матриц, сведения в литературе о таких материалах с температурой эксплуатации 300°C и выше отсутствуют. В настоящей работе исследованы подходы к изготовлению ПКМ с фталонитрильной матрицей с различными дисперсными наполнителями.

2. Выбор фталонитрильного связующего

Фталонитрильное связующее представляет собой многокомпонентную систему, включающую основной мономер, отвердитель и активные разбавители. Основные требования, предъявляемые к связующему, продиктованы необходимостью внесения дисперсного наполнителя: оно должно иметь достаточно низкую вязкость расплава и иметь широкое технологическое окно. Используемое в данной работе связующее представляет собой стеклообразную массу, которая

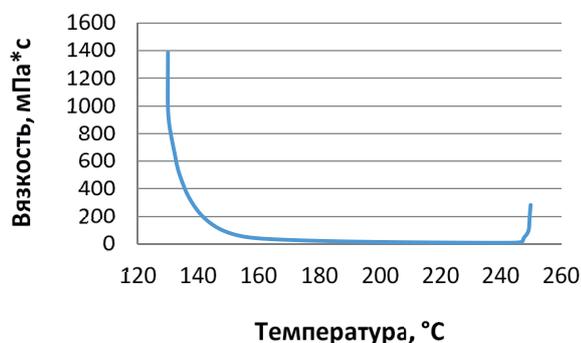


Рис. 1. Образцы с МС разной геометрии

при нагревании переходит в расплав, демонстрирующий вязкость менее 300 мПа·с при температуре выше 135°C (рис. 1).

В данной работе используется 1,3-бис(3,4-дицианофенокси)бензол (ДФБ) в качестве основного мономера, 4-аминофеноксифталонитрил (АФФН) в качестве отвердителя и несколько реактивных разбавителей.

3. Внесение наполнителей в связующее

В качестве дисперсных наполнителей были использованы стеклянные и корундовые микросферы (МС), одностенные углеродные нанотрубки (УНТ), молотое углеродное волокно (МУВ) и его смесь с УНТ. Все микросферы добавляли из расчета 65 об. %. УНТ вносили из расчета 0,25 масс. %, МУВ – 60 масс. % сверху от связующего.

Внесение всех дисперсных наполнителей, кроме УНТ, проводилось на диссольвере. Наполнители вносили в расплав связующего мелкими порциями при постоянном перемешивании, давая промешаться каждой порции. Это позволило получить равномерное распределение наполнителя внутри связующего.

При внесении УНТ возникла проблема их диспергирования. Изначально была предпринята попытка диспергировать трубки с помощью зубчатого диска на механической мешалке при максимальных оборотах, но такой подход не дал результатов: трубки не расходились из исходных агломератов и оседали на фрезу мешалки. Использование диссольвера улучшает конечный результат за счет большей мощности, но также не позволяет получить равномерного распределения трубок в расплаве связующего. Перетирание расплава связующего с добавлением УНТ на трехвалковой мельнице позволило раздиспергировать последние и получить их равномерное распределение, но отсутствие предварительного внесения УНТ приводило к увеличению итераций прогона связующего через мельницу. Таким образом, было решено проводить первичное внесение УНТ на диссольвере с последующим прогоном полученной смеси через трехвалковую мельницу.

4. Формование образцов ПКМ

Изготовление образцов материалов проводили в две стадии. Первым шагом было формование образца методом горячего прессования в открытой форме в течение 6 ч. Температуру формования подбирали по профилю вязкости связующего: давление прикладывали в точке начала гелеобразования. Это позволяло



Рис. 2. Образцы с МС разной геометрии

одновременно создать высокое гидростатическое давление внутри образца и избежать вытекания связующего из негерметичной формы. На второй стадии полученные образцы постотверждали под нагрузкой при температуре 350°C в течение 8 ч.

Для образцов с МС из-за высокой вязкости наполненного связующего была добавлена стадия предформования – связующее разогревали в форме до 130°C и подавали давление. Это позволяло

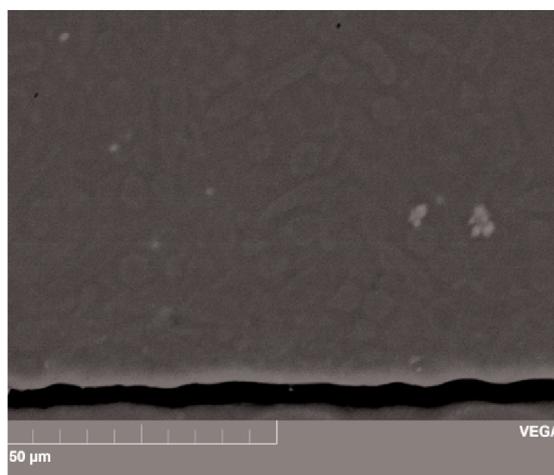


Рис. 3. Микрофотография материала с МУВ/УНТ

Таблица. Свойства пластиков на основе фталонитрилов

Характеристика	Дисперсно-наполненный ПКМ (МУВ/УНТ)	Без наполнения ($T_{\text{постотв}} = 350^\circ\text{C}$)
КЛТР, 10^{-6} K^{-1}	14	43
$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	67	64
$E_{\text{изг}}$, ГПа	8,3	4,1

проконтролировать отсутствие дефектов образца, связанных с выкладкой в форму. Образцы с МС были изготовлены разной геометрии (рис. 2) и отправлены на испытания по абляционной стойкости.

Формование образцов с молотым волокном проводили сразу в форме, минуя стадию получения преформ. Снимки, полученные для таких образцов на сканирующем электронном микроскопе, показали отсутствие пористости и других дефектов (рис. 3).

Для образца с МУВ/УНТ получены результаты испытаний на изгиб и определен коэффициент линейного термического расширения (КЛТР). Результаты приведены в таблице, в которой также даны значения этих характеристик для ненаполненного фталонитрильного связующего. Внесение дисперсного наполнителя увеличивает модуль упругости и значительно снижает КЛТР.

В дальнейшем предстоит получить и проанализировать результаты испытаний для остальных образцов, а также провести испытания устойчивости полученных материалов к повышенным температурам (300°C).

5. Заключение

Были впервые получены дисперсно-наполненные композиты с фталонитрильной матрицей. Разработанные подходы открывают возможность изготовления широкого спектра термоизоляционных, абляционных и конструкционных материалов с низкой горючестью и температурой эксплуатации 300°C.

Список использованных источников

- [1] Fast-Processable Non-Flammable Phthalonitrile-Modified Novolac/Carbon and Glass Fiber Composites / D. Poliakova, O. Morozov et al. // *Polymers*. 2022. Vol. 14(22). Art. 4975.
- [2] Fast curing phthalonitrile modified novolac resin: Synthesis, curing study and preparation of carbon and glass fibric composites / D. Poliakova, O. Morozov et al. // *Reactive and Functional Polymers*. 2022. Vol. 181. Art. 105450.
- [3] Easy processable tris-phthalonitrile based resins and carbon fabric reinforced composites fabricated by

vacuum infusion / M. Yakovlev, M. Kuchevskaja et al.
// Materials Today Communications. 2022. Vol. 33.
Art. 104738.

vacuum infusion process / B. Bulgakov, A. Sulimov,
A. Babkin et al. // Journal of Composite Materials.
2017. Vol. 51, iss. 30. P. 4157–4164.

[4] Phthalonitrile-carbon fiber composites produced by

Углепластики на основе композиции полидиметилсилоксанового каучука и фенолформальдегидной смолы

К.С. Панина^{1,2}, Е.А. Данилов², Ю.А. Курганова^{1,2}

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

² АО «НИИГрафит», Москва

В работе исследуются многослойные композиционные материалы на основе смеси полидиметилсилоксана и фенолформальдегидной смолы. Получены характеристики механических свойств при растяжении и измерении твердости по Шору. Исследованы теплофизические характеристики при стационарном нагреве и методом лазерной вспышки.

Carbon plastics based on a composition of polydimethylsiloxane rubber and phenol formaldehyde resin

K.S. Panina^{1,2}, E.A. Danilov², Yu.A. Kurganova^{1,2}

¹ BMSTU, Moscow, Russia

² JSC “Research Institute of Structural Materials based on Graphite” NIIGrafit”, Moscow, Russia

The paper investigates multilayer composite materials based on a mixture of polydimethylsiloxane and phenol-formaldehyde resin. Characteristics of mechanical properties in tension and measurement of hardness according to Shore were obtained. Thermophysical characteristics were studied during stationary heating and by the laser flash method.

1. Введение

Силоксановые каучуки (СК) являются синтетическими полимерами со звеньями Si-O в основной цепи. СК обладают высокой озоностойкостью, атмосферостойкостью, химической стойкостью, термо- и теплостойкостью, эластичностью, низким водопоглощением, химической и биологической инертностью, что позволяет их использовать практически во всех отраслях промышленности [1–3].

За счет двойственной природы полимера при горении образуется неорганический остаток SiO₂, снижающий доступ окислителя и способствующий самозатуханию материала. Это свойство реализуется при изготовлении изоляции токопроводов, а также в составе огнезащитных материалов [4–6].

Однако в чистом виде СК образуют слабосвязанный керамический слой, в связи с этим применяют модификацию полимера [5; 7; 8] путем введения армирующих волокон и коксообразующих дисперсных наполнителей.

Самым эффективным коксообразующим полимером являются фенолформальдегидные смолы, коксовый остаток составляет около 60%.

Армирование волокнами применяется для того, чтобы повысить прочность исходного материала и

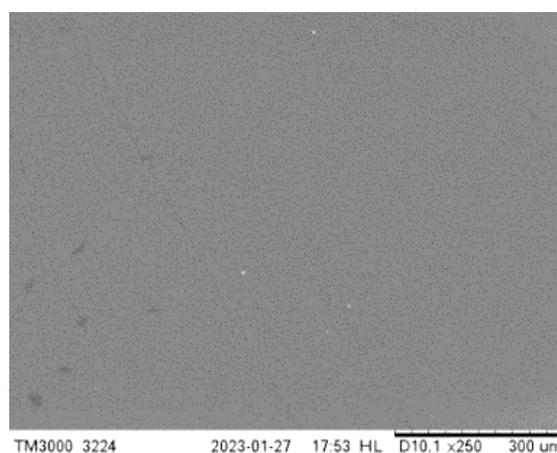


Рис. 1. Структура ПДМС

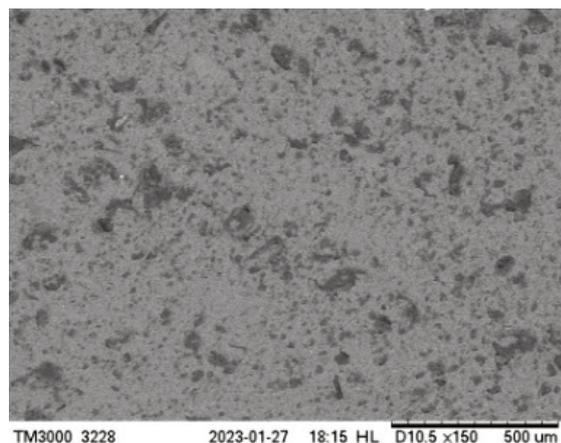


Рис. 2. Структура ПДМС+ФФС

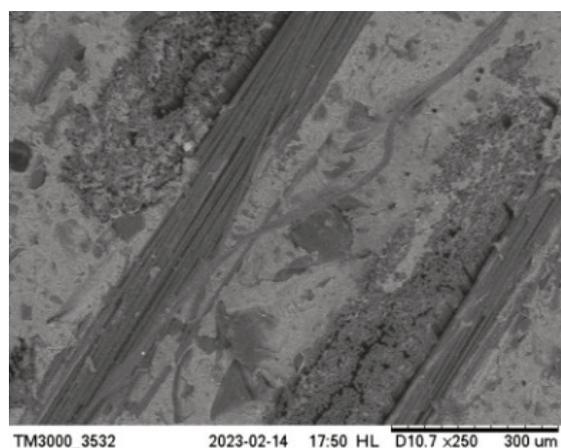


Рис. 3. Структура ПДМС+ФФС+УВ

углеродного или керамического остатка, формирующегося при пиролизе. Углеродные волокна (УВ) наиболее перспективны для армирования ввиду низкой плотности, высокой прочности и жесткости, низкого коэффициента теплового расширения.

В данной работе исследуются материалы на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) марки «Юнисил 9728» и фенолформальдегидной смолы (ФФС) марки СФ-015 в виде порошка. Армирование проводили углеродными волокнами (УВ) текстильной формы в виде ткани марки UWB-3K-TWILL2/2-100 (три слоя).

Материалы получены методами механического замешивания и ручного формования. Микроструктура исходного ПДМС с добавлением ФФС и волокон показана на рис. 1 – рис. 3.

В зависимости от угла армирования в таких материалах может быть достигнут различный уровень прочностных характеристик. Так, при армировании $0^\circ/90^\circ$ прочность возросла в 20 раз, а относительное удлинение снизилось в 20 раз в сравнении с

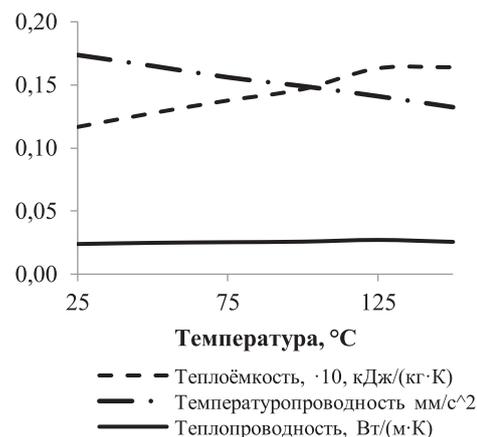


Рис. 4. Теплофизические характеристики с ростом температуры углепластиков

углепластиками, армированными в направлениях $\pm 45^\circ$.

С введением ФФС твердость по Шору возрастает в 1,5 раза, а при армировании УВ – в 2 раза, что свидетельствует о повышении сопротивляемости вдавливаю индентора и, соответственно, о повышении сопротивлению истиранию.

Температуропроводность является мерой теплоинерционных свойств и зависит от многих факторов: природы и физических свойств, строения, кристалличности, межфазных границ и т.д. Для полученных углепластиков при 25°C температуропроводность составила $\sim 0,17 \text{ мм/с}^2$ (рис. 4).

Теплоемкость и теплопроводность углепластиков составили $1,2 \text{ кДж/(кг·К)}$, $0,24\dots 0,25 \text{ Вт/(м·К)}$ соответственно (рис. 4).

Проведен термогравиметрический анализ в среде воздуха и аргона. Термостойкость в среде кислорода примерно 360°C , коксовый остаток – 21%. Термостойкость в инертной среде составляет 455°C , коксовый остаток – 45%.

2. Заключение

Таким образом, исследованы механические и теплофизические характеристики композиционных материалов на основе полидиметилсилоксанового каучука и фенолформальдегидной смолы, исследована микроструктура и поведение материалов при стационарном нагреве.

Список использованных источников

- [1] Improving ablation properties of liquid silicone rubber composites by in situ construction of rich-porous char layer / L. Yan et al. // Journal of applied polymer science. 2021. Vol. 138, no. 11. Art. 50030.

-
- [2] Study on the thermal stability and ablation properties of metallic oxide-filled silicone rubber composites using uniform design method / R. Li et al. // *Journal of polymer engineering*. 2016. Vol. 36, no. 8. P. 805–811.
- [3] Шетц М. Силиконовый каучук. Л.: Химия, 1975. 192 с.
- [4] Flame retardancy of silicone-based materials / S. Hamdani et al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2009. Vol. 94, no. 4. P. 465–495.
- [5] Studies on the thermal properties of silicone polymer based thermal protection systems for space applications / S. Nair et al. // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2017. Vol. 128. P. 1731–1741.
- [6] Combined kinetic analysis of multistep processes of thermal decomposition of polydimethylsiloxane silicone / C. García-Garrido et al. // *Polymer*. 2018. Vol. 153. P. 558–564.
- [7] In situ construction of fiber-supported micro-porous char structure to enhance anti-ablative performance of silicone rubber composites / Y. Huang et al. // *Polymers for advanced technologies*. 2021. Vol. 32, no. 8. P. 2899–2907.
- [8] Highly branched phenolic resin-grafted silicone rubber copolymer for high efficiency ablation thermal protection coating / B. Li et al. // *Journal of applied polymer science*. 2020. Vol. 137, no. 6. Art. 48353. 9 p.
-

Развитие современных полимерных композиционных материалов и технологий применительно к деталям авиационных двигателей

Д.В. Афанасьев
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

В докладе приведены требования, предъявляемые к исходным компонентам и полимерным композиционным материалам на их основе, которые предназначены для изготовления деталей авиационных двигателей. Описан многолетний опыт применения традиционных и перспективных композиционных материалов специалистами ЦИАМ.

Development of advanced polymer composite materials and technologies for structures of aviation engines

D.V. Afanasyev
CIAM, Moscow, Russia

The report presents the requirements for the initial components and CFRP based on them, intended for the manufacture of aircraft engine structures. The long-term experience of application of traditional and perspective composite materials by specialists of the CIAM is described.

1. Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) с каждым годом все более активно внедряются не только в конструкцию планера самолета, но и в узлы авиационных двигателей (АД). Так из ПКМ производства компании Hexcel изготавливают корпус входного устройства, элементы мотогондолы, центральный кок, лопатки и корпус вентилятора, спрямляющего аппарата и т.д.

По сравнению с традиционными ПКМ, материалы, предназначенные именно для АД, должны обладать повышенными характеристиками вязкости разрушения, теплостойкости, влажностойкости, долго-

вечности. Рабочие поверхности деталей АД из углепластика должны иметь защиту от пылевой и капельной эрозии, от ударных воздействий, противостоять истиранию или фреттинг-износу в местах контакта с металлическими деталями.

Обеспечение вышеперечисленных требований вынуждает материаловедов создавать принципиально новые многофазные полимерные связующие и препреги сложного состава, содержащие реактопластичные смолы, модифицированные фазой термопласта. В свою очередь, технологам приходится разрабатывать новые способы их переработки в изделия, с тем чтобы гарантировать высокую стабильность объемного содержания матрицы и

волокна, высокую точность геометрических размеров и низкий уровень остаточных напряжений в готовых деталях. Комплекс этих задач специалисты ЦИАМ решают в тесном сотрудничестве с разработчиками и производителями новых ПКМ, такими как АО «ИНУМиТ», ООО «ИТЕКМА», ООО «НИАГАРА», НОЦ «Композиты России», НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

2. Научно технический задел ЦИАМ

Отдел конструкционной прочности композиционных материалов под руководством Каримбаева Т.Д. за 50 лет своего существования накопил большой опыт конструирования и изготовления прототипов деталей АД из КМ. За последние 30 лет были отработаны опытные технологии изготовления, а затем испытаны практически все основные элементы АД: изготовлены корпусные изделия сложного профиля, лопатки осевого компрессора, лопатки направляющего аппарата, полноразмерные лопатки вентилятора и модельные колеса вентилятора в сборе, колеса КНД, центробежные колеса разных конструкций, различные варианты лопаток турбин и турбинных колес в сборе, сопловых аппаратов малоразмерного ГТД из керамики, несколько комплектов жаровых труб для камеры сгорания из углерод-керамических композитов (УККМ), створки сопла, силовые кольца и тяги из углепластика, сепараторы подшипников из ПКМ, межлопаточные трактовые полки вентилятора, углепластиковые пилоны для входного устройства с интегрированной электрической ПОС, корпус и улитка пылезащитного устройства для вертолетного двигателя из стеклоорганопластика и др.

До 1995 года подавляющее большинство вышеперечисленных деталей были изготовлены методом прямого горячего прессования препрегов в закрытых металлических пресс-формах. Для углепластиковых изделий использовались препреги марок ВКУ-4, ВКУ-7, разработанные в ВИАМ. Для формования заготовок углерод-углеродных (УУКМ) и углерод-карбидокремниевых композиционных материалов (УККМ) использовали радиационно-химический препрег, производимый в НИИ «Графит».

Были разработаны пресс-формы с различной кинематикой движения подвижных частей, которые могли содержать в своем составе несколько пуансонов, последовательно формирующих все грани и рабочие поверхности изделий сложного профиля.

В конце 1990-х и начале 2000-х годов в стране сложилась трудная экономическая ситуация, в результате которой использовать в своих работах промышленно выпускаемые препреги для ЦИАМ

стало нерентабельно. Основное внимание уделялось отработке технологий мокрой намотки, ручного ламинирования, а также прессования тканей, пропитанных вручную жидкими смолами. В этот период в ЦИАМ использовали однонаправленные углеродные ленты ЭЛУР, ЛУ-2, ткани «Урал» и УТ-900. Для намотки применяли углеродные волокна марок ВМН-4, УКН-5К, «Кулон». Данные наполнители, как правило, пропитывались эпоксиэпидиановой смолой ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ.

При изготовлении изделий из углерод-керамических композиционных материалов и, в частности, жаровых труб для камер сгорания применяли метод ручной пропитки углеродной ткани связующим на основе поликарбосилана. Изделия формовали всесторонним обжатием пропитанных заготовок в жестких металлических пресс-формах с нагревом в печи. Работы провели в сотрудничестве со специалистами ВИАМ.

Убедившись, что ламинирование тканями, пропитанными вручную, не является эффективным решением, в ЦИАМ были освоены технологии трансферного безавтоклавного формования: пропитка сухих заготовок, так называемых преформ, смолой под давлением (RTM) и инфузионная пропитка в вакууме (VIP). Для вакуумной инфузии были использованы зарубежные и отечественные низковязкие связующие комнатного отверждения. Пропитка по методу RTM осуществлялась смолами отечественного производства: УП-610, УП-637, ЭХД и др. с использованием отвердителей ДДС, «Диамет-Х», изоМТГФА. Для полимеризации использовали либо печи, либо нагревательные прессы. Для разбавления вязких связующих применяли низковязкие эпоксиэпидиановые смолы УП-624, ДЭГ-1, ЭА, Э-181 производства завода «Химэкс». Пропитку углепластиковых заготовок, предназначенных для высокотемпературных УУКМ, осуществляли спиртовым раствором бакелитового лака ЛБС-1.

Впоследствии для технологии RTM в ЦИАМ стали использовать герметичные металлические пресс-формы, имеющие встроенную систему электрического обогрева. Применение технологии RTM позволило значительно поднять качество изготовления углепластика: уменьшить объемную долю пористости до 1...2%, увеличить прочность при межслоевом сдвиге до 45 МПа, увеличить температуру стеклования до 170°C, обеспечить требуемую точность формования. Прочность при растяжении удалось заметно поднять путем замены отечественных углеродных волокон УКН-3К («Аргон») на зарубежные Т-800 (Toray) и IMS-65 (Toho Tenax).

Однако к 2010 году все еще оставались не

решенными две существенные проблемы: углепластики демонстрировали низкую ударную вязкость (были слишком хрупкими) и имели недостаточную для конструкционных пластиков авиационного назначения прочность при межслоевом сдвиге.

Существенно поднять (до 75 МПа) сдвиговую прочность изделий удалось только начав применять высокопрочное эпоксидное связующее марки Т-26, которое было разработано ИНУМиТ специально для процессов высокотемпературной инфузии и RTM. Более того, имея температуру стеклования 205°C, оно обеспечило возможность эксплуатации ПКМ во влагонасыщенном состоянии при температурах до 150°C.

С 2014 года началось более тесное научно-техническое сотрудничество ЦИАМ с ИНУМиТ. На совместном совещании для рабочей группы специалистов была поставлена крайне амбициозная цель – разработать полностью отечественный углепластик, по своим характеристикам соответствующий лучшим зарубежным авиационным маркам, позволяющий заменить собой титановые сплавы (при температуре эксплуатации до 150°). На втором этапе работ стояла задача довести технологию его переработки до промышленного уровня применительно к высоконагруженным деталям АД сложной формы. В качестве целевого объекта была выбрана полноразмерная лопатка вентилятора.

В течение трех лет в ИНУМиТ проводились активные поиски. В итоге материал с требуемыми прочностными и технологическими свойствами был создан, после чего компания «ИТЕКМА» начала его промышленный выпуск.

Сегодня материал для получения ударопрочного углепластика выпускают в виде препрега двух типов: под торговой маркой «Карболон» производят однонаправленную ленту шириной 300...1000 мм без утка (волокна скреплены термопластичным биндером), а под маркой «Карбопласт» изготавливают ткань шириной 1000 мм с редким угольным утком. Углепластики, отформованные из данных препрегов, имеют показатели прочности при межслоевом сдвиге 90 МПа. А характеризующая вязкость разрушения средняя остаточная прочность при сжатии после низкоскоростного удара достигает значений $CAI = 330...340$ МПа. Высокий уровень этих свойств говорит об очень хорошей стойкости данного материала к ударным нагрузкам и способности активно сопротивляться процессу роста трещин. Данные материалы полностью удовлетворяют особым требованиям, предъявляемым к ПКМ авиационного назначения с температурой длительной эксплуатации

до 120°C.

В настоящий момент в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для нужд авиации ведется разработка препрегов с аналогично высокими техническими характеристиками.

Используя препреги марок «Карболон» и «Карбопласт», в ЦИАМ были отработаны две директивные технологии получения лопаток вентилятора. Первая технология в зарубежной классификации носит название Same-qualified resin transfer molding (SQRTM). Это процесс прессования изделий из препрега в закрытой жесткой металлической пресс-форме при одновременной подаче внутрь нее дополнительного жидкого связующего под давлением, которое поддерживается в течение всего процесса полимеризации. Причем управление уровнем гидростатического давления в смоле обеспечивается независимо от силы предварительного сжатия наполнителя в пресс-форме, то есть независимо от механического давления пресса на пакет армирующих волокон. Такой процесс гарантирует получение изделий с низкой пористостью при заданном объемном содержании волокна, что крайне актуально для обеспечения надежности деталей АД из ПКМ.

Вторая технология состоит в том, что, используя автоклавный способ формования и препрег любых марок, могут быть изготовлены изделия из ПКМ с двумя лицевыми сторонами с помощью пресс-формы, которая сама выполнена из углепластика. В ходе процесса прессования в зазоры между матрицей и пуансоном (аналогично процессу SQRTM) подается избыточное количество жидкого связующего под давлением. Данная технология, названная авторами автоклавным SQRTM, разработана в ЦИАМ.

С использованием обеих технологий были изготовлены полноразмерные лопатки вентилятора, которые подтвердили правильность выбранных технических решений. Лопатки прошли успешные испытания на вибростенде и показали высокую стойкость к выстрелам из пневматической пушки.

В течение ряда лет в рамках различных научных программ в ЦИАМ были сформованы как полноразмерные лопатки вентилятора, так и модельные (уменьшенные). Лопатки прошли этап контроля, были скомплектованы и собраны с дисками в рабочие колеса вентилятора и в их составе прошли успешные испытания на разгонном и аэродинамическом стендах. Была показана работоспособность лопаток при рабочих и увеличенных центробежных нагрузках, а также их устойчивость к критическим режимам: повышенным вибрациям и флаттеру. На всех этапах работ проводилась верификация расчетных моделей с

экспериментальными данными, которая продемонстрировала их высокую сходимость.

Для производства углепластиковых пресс-форм компанией ИНУМиТ было создано специальное инфузионное связующее ТО-29-02, обладающее уникальным набором свойств. Его частичная полимеризация происходит при комнатной температуре до состояния, позволяющего снять заготовку с мастер-модели. А после дальнейшей термообработки обеспечивается температура стеклования матрицы 220°C.

3. Перспективные разработки

Сегодня в ЦИАМ обрабатываются несколько инновационных технологий производства объемно-армированных преформ для деталей АД. К настоящему моменту создан задел в технологии создания заготовок методом автоматизированной нашивки армирующих волокон. Нашивка жгутов (ровинга) осуществляется на специализированном вышивальном станке с ЧПУ и сводит к минимуму долю ручного труда. Технология позволяет создавать преформы практически с любыми траекториями укладки волокна в плоскости нашиваемого слоя, одновременно с этим обеспечивая общую сшивку несколько слоев в трехмерные пакеты (до 8 мм). Эти пакеты затем сами могут быть собраны в стек и совместно прошиты в единую заготовку, готовую к пропитке.

К сожалению, в России пока еще не создано связующее, которое одновременно отвечало бы двум взаимно противоречащим условиям: было бы настолько жидким, чтобы давать возможность применять безавтоклавные методы пропитки объемно-армированных структур (включая нашитые), и одновременно с этим гарантировало бы высокую стойкость пропитанных углепластиков к повреждениям, то есть соответствовало бы по уровню трещиностойкости вязким связующим, традиционно применяемым в составе ударопрочных препрегов.

Чтобы обойти это противоречие, сотрудники ЦИАМ и ИНУМиТ разработали и запатентовали [1] гибридную двухстадийную технологию формования ПКМ. Первый этап пропитки сходен с методом пленочной инфузии (RFI), а вторым этапом является автоклавное прессование. Новая технология позволяет использовать для пропитки сухих заготовок любые смолы, разработанные ранее, включая те, что обычно применяются при производстве высокопрочных препрегов. Для пропитки своих 3D-преформ, изготовленных по технологии автоматической нашивки ровинга, в ЦИАМ используется связующее, производимое компанией «ИТЕКМА», входящее в

состав препрега марки «Карболом».

Используя технологии автоматической нашивки и гибридной пропитки, в ЦИАМ были изготовлены несколько модельных лопаток вентилятора. Их испытания показали, что нашитые лопатки обладают более высокой стойкостью к удару посторонними предметами и увеличенной усталостной прочностью по сравнению с классическими слоистыми лопатками, выполненными из препрега аналогичного состава. Обе технологии, и автоматическая нашивка ровинга, и технология гибридной RFI-автоклавной пропитки, сами по себе обладают большим потенциалом. Совместно же они способны поднять технологичность и надежность авиационных изделий из ПКМ на новый уровень.

4. Вектор будущего развития

Задачей будущего является создание авиационных ПКМ с повышенными температурами эксплуатации. Для температур до 230°C наиболее перспективными являются бисмалеимидные (БМИ) связующие. Для более высоких температур оптимальны фталонитрильные (ФН) связующие. Углепластики на основе ФН могут работать длительно при температурах до 300°C; при температурах до 450°C иметь средний ресурс (~100 ч); и при температурах порядка 1250°C обеспечивать работоспособность в течение короткого времени.

В ВИАМ было разработано связующее ВСН-31 на основе фталонитрила и углепластики на его базе марок ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН, из которых в ЦИАМ был изготовлен первый вариант рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) для малоразмерного газотурбинного двигателя.

В это же время группой ученых ИНУМиТ была создана уникальная модификация фталонитрильного связующего марки ФНИ350, которая позволяет применять при переработке все технологические решения, отработанные ранее для эпоксидных смол: вакуумную инфузию, RTM, порошковую пропитку и прессование в составе препрегов. В настоящий момент компанией «ИТЕКМА» начат промышленный выпуск как БМИ, так и ФН-связующих и препрегов на их основе.

Используя способ пространственной намотки жгута и пропитку БМИ, в ЦИАМ были изготовлены сепараторы подшипников, успешно прошедшие разгонные испытания. Сейчас в ЦИАМ начаты работы по созданию высокотемпературных лопаток вентилятора с применением БМИ-связующих. В ЦИАМ были изготовлены рабочие колеса центробежного компрессора малоразмерного ГТД

методом автоматической нашивки углеродного ровинга с последующей пропиткой ФНИ350 На основе кварцевой ткани и ФНИ350 удалось изготовить образцы высокотемпературного огнезащитного ПКМ, соответствующего требованиям безопасности, принятым в авиации.

Как БМИ, так и ФН-смолы обладают высокими прочностными свойствами, не уступая в этом эпоксидным связующим. Ближайшей задачей является обработка способов снижения их хрупкости и уменьшения микрорастрескивания смолы при термоциклировании. Решение этих задач приведет к тому, что высокотемпературные смолы и ПКМ на их основе непременно займут достойное место в перечне материалов авиационного применения.

5. Заключение

Тесно сотрудничая с производителями современных композиционных материалов, отдел под руководством Т.Д. Каримбаева накопил большой опыт в решении самого широкого круга технологических задач, направленных на внедрение ПКМ в узлы АД.

Список использованных источников

- [1] Способ изготовления деталей из волокнистого полимерного композиционного материала : пат. RU 2 656 317 C1/ Т.Д. Каримбаев, М.А. Мезенцев, Д.В. Афанасьев, В.В. Авдеев, А.В. Кепман, А.В. Бабкин ; патентообладатель Минпромторг России; № 2017110034; заявл. 27.03.2017; опубл. 04.06.2018. Бюл. 16. 6 с.

Моделирование эрозионного износа композиционных материалов от воздействия абразивных частиц в проточной части газотурбинных двигателей

Д.В. Афанасьев, С.В. Воробьев, Д.В. Матюхин
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

В работе рассмотрено влияние абразивных частиц различной природы, способных вызывать эрозионный износ в проточной части газотурбинных двигателей. Проведен анализ стандартных методов испытаний и экспериментального оборудования, предназначенного для исследования газоабразивного изнашивания. Предложены новые конструкции установок со сверхзвуковым соплом и комбинированная. Комбинированная установка позволяет имитировать вращение рабочих лопаток с одновременным регулированием скорости потока газа, что больше приближает условия испытаний к реальным условиям эксплуатации.

Modeling of erosive wear of composite materials from the impact of abrasive particles in the flow part of gas turbine engines

D.V. Afanasyev, S.V. Vorobev, D.V. Matykhin
CIAM, Moscow, Russia

The paper considers the influence of abrasive particles of various nature that can cause erosive wear in the flow part of gas turbine engines. The analysis of standard test methods and experimental equipment designed for the study of gas-abrasive wear is carried out. New designs of installations with a supersonic nozzle and a combined one are proposed. The combined installation allows you to simulate the rotation of the working blades with simultaneous regulation of the gas flow rate, which brings the test conditions closer to real operating conditions more accurately.

1. Введение

Эрозионный износ деталей, находящихся в проточной части газотурбинных двигателей (ГТД), вызывается

воздействием абразивных частиц (АЧ), которые могут различаться по составу, концентрации, твердости, размерам и по форме. Попадание частиц в двигатель может происходить на всех высотах эксплуатации

воздушного судна (ВС). Оценка условий возникновения на территории аэродромов пыльных и песчаных бурь, а также их влияние на работу ВС рассмотрены в работах [1; 2]. Согласно статистическим данным, приведенным в [3], полет ВС в облаке вулканического пепла является большой редкостью, но тем не менее проблеме безопасности полетов при извержениях вулканов уделяется большое внимание во всем мире. Это объясняется тем, что с ростом интенсивности воздушных перевозок все чаще случаются инциденты с самолетами, попавшими в облака вулканического пепла. Верхняя часть грибообразного облака пепла, или «зонтичная область» колонны вулканического пепла, распространяются вначале радиально, а затем под влиянием ветра перемещается преимущественно в одном или нескольких конкретных направлениях, причем в различных слоях атмосферы. Такой процесс вызывает загрязнение огромных объемов воздушного пространства на высотах до 14 км, которые используются как стандартные эшелоны крейсерского полета реактивных самолетов. Кроме того, существует вероятность образования облаков ресуспендированного пепла [4], возникающих под воздействием сильного ветра на склонах вулканов, и затем тоже распространяющихся на значительные расстояния.

При проведении сертификационных испытаний двигателей необходимо имитировать условия воздействия на их узлы и агрегаты абразивных частиц максимально точно. Есть возможность проводить испытания отдельных узлов двигателя, например газогенератора ПД-14, на высотных стендах [5]. Однако испытания ГТД размерностью типа ПД-14 и выше технически осуществимы только на наземных стендах без имитации скорости ($M=0$) и высоты ($H=0$ км). В этом случае условия воздействия посторонних частиц на рабочие лопадки вентилятора и другие элементы ГТД не будут воспроизводить полетные. Кроме того, такие испытания трудоемки и характеризуются высокой стоимостью. Их целесообразно проводить только на завершающем этапе сертификации.

В данной работе рассматриваются малогабаритные установки, которые позволяют близко к реальности воспроизводить условия воздействия АЧ на образцы материалов, покрытий и на конструктивно-подобные элементы (КПЭ).

2. Стандартные методики определения газоабразивного износа

В настоящее время стандартными методиками оценки эрозионной стойкости материалов и покрытий являются испытания с помощью центробежного

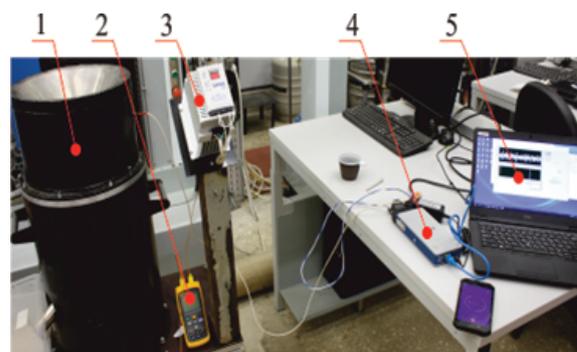


Рис. 1. Эрозионная центробежная установка
1 – бункер для загрузки АЧ; 2 – цифровой термометр;
3 – блок управления двигателем; 4 – измерительный модуль; 5 – ноутбук для контроля и поддержания частоты вращения ротора

ускорителя [6] или создание ударной струи твердых частиц потоком сжатого газа в пневматической эрозионной установке (ПЭУ) [7]. Центробежный ускоритель [7] предусматривает проведение испытаний на скоростях 36 м/с и 72 м/с с применением кварцевого песка фракцией 500...900 мкм и не предназначен для использования более мелких частиц, например вулканического пепла. В ПЭУ, рассмотренной в методике [3], в качестве АЧ применяется корунд (Al_2O_3), а испытания проводятся с дозвуковым соплом на скоростях частиц 30 м/с и 62 м/с. Данные методики не позволяют полностью соответствовать натурным условиям эксплуатации в части обеспечения высоких скоростей соударения или использования абразивных частиц иных фракций.

3. Обзор эрозионных установок

В ЦИАМ изготовлена установка с центробежным ускорителем с учетом стандартных требований [6]. Данная установка позволяет испытывать плоские образцы при заданных скоростях и размерах АЧ под разными углами атаки. В рамках одного эксперимента воздействию частиц подвергается как вновь исследуемый материал, так и образец из материала, принятого за эталон. Результат оценивают методом сравнения их степени износа. На рис. 1 представлен вид эрозионной установки после ее модернизации, в процессе которой была увеличена частота вращения ротора до 18 000 об/мин. Это позволило проводить испытания при скорости полета частиц в два раза превышающие рекомендованные стандартом [6]. С целью предотвращения перегрева контроль температуры корпуса двигателя осуществляется при помощи цифрового термометра. Блок управления двигателем позволяет изменять направление вращения ротора и поддерживать частоту вращения с высокой

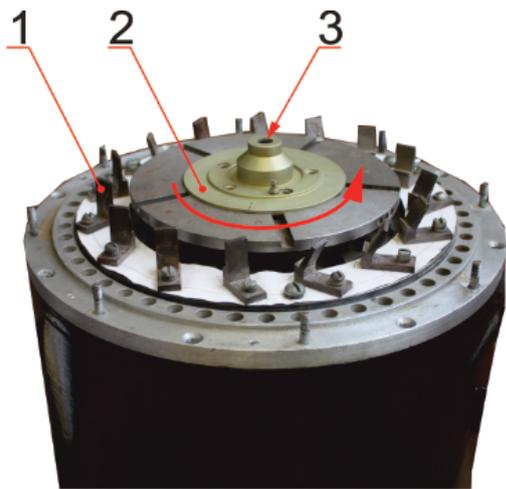


Рис. 2. Эрозионная центробежная установка без бункера для загрузки АЧ:
1 – держатели образцов; 2 – ротор центробежного ускорителя; 3 – отверстие для подачи АЧ из бункера

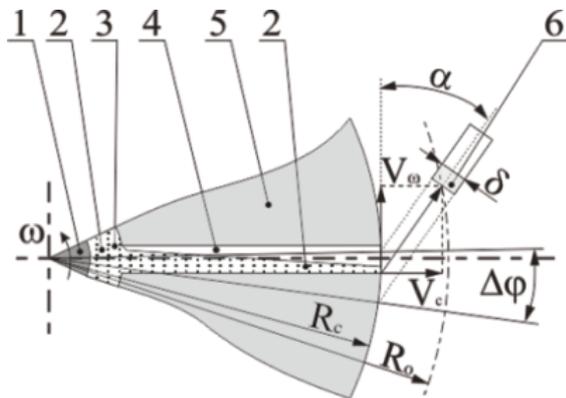


Рис. 3. Схема (вид сверху) движения АЧ в эрозионной установке:
1 – центральное тело; 2 – АЧ; 3 – кольцевой канал; 4 – радиальный канал; 5 – ротор; 6 – поверхность образца

точностью. Частота вращения определяется с помощью измерительного модуля. Параметры управления и сигналы контрольных датчиков передаются и отображаются на ноутбуке.

Установка позволяет размещать до пятнадцати образцов в держателях (рис. 2), отклоняющихся под углами 15; 30; 60 и 90° относительно вертикальной оси вращения ускорителя. АЧ поступают в ротор центробежного ускорителя из бункера через центральное отверстие и, ускоряясь в радиальных каналах ротора под действием центробежной силы, вылетают из них к образцам по баллистической траектории.

На рис. 3 представлена схема (вид сверху) движения АЧ в эрозионной установке. С помощью центрального тела под действием центробежных сил абразивные частицы из бункера распределяются по

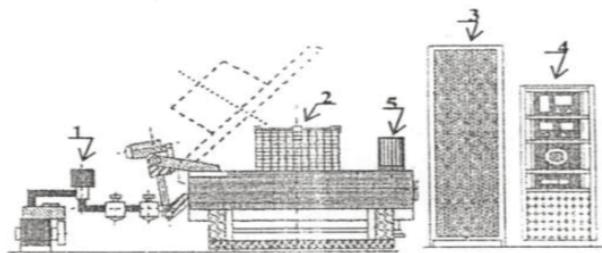


Рис. 4. Схема установок ЛЦС-5 и ЦС-871:
1 – система вакуумирования; 2 – рабочая камера; 3 – электропривод; 4 – пульт управления; 5 – дозатор частиц

кольцевому и пяти радиальным каналам внутри ротора. При этом кольцевой канал заполняется частицами полностью, а в радиальных их концентрация падает, так как частицы разгоняются и прижимаются к стенке канала, противоположной направлению вращения. Вылетая из ротора, АЧ ударяют по поверхности образца, установленного под углом α относительно направления касательного к ротору вектора.

В ВИАМ применяют центробежные установки ЛЦС-5 и ЦС-871 другого типа (рис. 4), обеспечивающие скорости частиц 50...300 м/с. В отличие от стандартной методики [6], принцип действия этих установок основан на вращении образцов относительно оси и соударением с потоком свободно падающих АЧ, подаваемых в рабочую камеру через дозирующее устройство. Рабочая камера вакуумируется, поэтому в эксперименте отсутствует воздействие воздуха на образцы.

Скорость соударения и угол атаки, которые должны имитироваться в ходе экспериментов по эрозии, зависят от геометрии элементов конструкции, режимов работы ГТД и условий полета воздушного судна (ВС). На взлетном режиме двигатель работает на повышенной частоте вращения, индуцируя большие окружные скорости полета АЧ, усиливающие эрозионный износ. Использование большинства систем реверса тяги в момент посадки и торможения поднимает со взлетно-посадочной полосы пыль и абразивные частицы крупного размера. Для имитации воздействия АЧ такого рода целесообразно



Рис. 5. ПЭУ со сверхзвуковым соплом:
1 – весы; 2 – компрессор; 3 – ресивер; 4 – манометр; 5 – пылезащитная камера; 6 – исследуемый образец; 7 – сверхзвуковое сопло

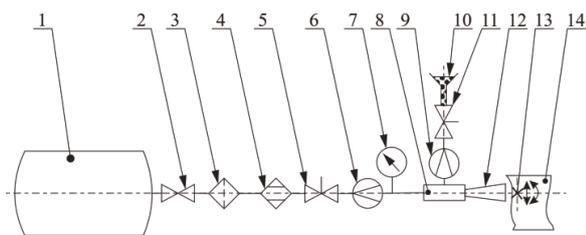


Рис. 6. Схема ПЭУ со сверхзвуковым соплом (ЦИАМ):
 1 – источник сжатого воздуха; 2 – отсечной клапан;
 3 – магистральный фильтр; 4 – осушитель; 5 – регулятор давления; 6 – система измерения расхода воздуха;
 7 – манометр; 8 – камера смешения; 8 – АЧ; 9 – система измерения расхода АЧ; 10 – бункер с АЧ; 11 – регулятор расхода АЧ; 12 – сверхзвуковое сопло; 13 – область воздействия АЧ; 14 – исследуемый объект

использовать установку, которая позволяет проводить исследования на скорости 36...110 м/с, варьируя размеры частиц в диапазоне 0,4...1,2 мм. На крейсерском режиме полета на высоте 11 км и с $M = 0,8$ для двигателя ПД-14 максимальная скорость столкновения АЧ с поверхностью рабочих лопаток вентилятора выше 300 м/с. Для установок ВИАМ типа ЛЦС-5, ЦС-871 [8] и стандартных методик [6; 7] предусматривают более низкую скорость. Однако скорость столкновения АЧ с преградой является наиболее важным фактором процесса износа. В работах [9; 10] показано, что относительный износ возрастает пропорционально скорости соударения с АЧ и подчиняется степенному закону. При этом показатель степени может находиться в диапазоне 2...3.

Высокую скорость соударения возможно создавать ПЭУ со сверхзвуковым соплом (рис. 5). Стойкость материалов к эрозионному износу оценивается по

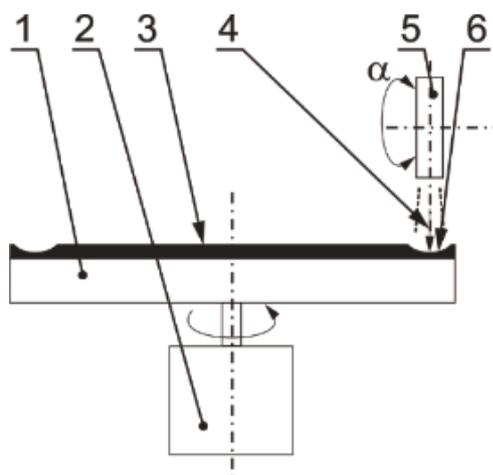


Рис. 7. Схема комбинированной эрозионной установки (ЦИАМ):

1 – ротор; 2 – двигатель; 3 – исследуемый материал или покрытие; 4 – струя газа с АЧ; 5 – сопло;
 6 – выработка от эрозионного износа

параметрам абсолютной или удельной потери массы образцов в результате эксперимента. Образцы взвешиваются на весах до и после испытания. Компрессором в ресивере создается избыточное давление, контролируемое манометром. В пылезащитной камере устанавливается образец, на который воздействует воздушный поток с частицами АМ, истекающий из сопла.

На рис. 6 представлена схема ПЭУ. Воздух от источника сжатого газа через отсечной клапан проходит через магистральный фильтр и осушитель. Давление задают регулятором давления, а расход определяют расходомером. Манометр размещен перед блоком камеры смешения. При помощи расходомера определяют количество АЧ, поступающее из бункера, а расход регулируют при помощи регулятора. В камере смешения АЧ, за счет эжекции, захватываются потоком сжатого воздуха и ускоряются в сверхзвуковом сопле. Исследуемый объект устанавливают в зоне воздействия под необходимым углом атаки. В качестве объекта могут быть использованы плоские образцы, КПЭ или полноразмерные изделия.

Перспективной разработкой является установка, предлагаемая авторами данной статьи. Ее схема представлена на рис. 7. На ротор, который вращается с заданной частотой, крепится образец из исследуемого материала, имеющий форму плоского диска. Поток АЧ истекает из сопла. Угол атаки зависит от сложения окружной скорости вращения и скорости потока воздуха в зоне обдува и регулируется наклоном сопла под расчетным углом α . Оценку износа определяют по глубине выработки.

Эрозионная установка предложенной конструкции позволяет имитировать вращение рабочих лопаток и обеспечивать воздействие на них абразивных частиц, летящих в высокоскоростном потоке воздуха. Оба параметра эксперимента регулируются независимо. Возможен дополнительный проточный подогрев струи воздуха. Такая схема проведения эксперимента позволяет воспроизводить условия соударения АЧ и узлов двигателя наиболее приближенно к полетным условиям, при этом используя частицы необходимых фракций.

4. Заключение

Рассмотрены наиболее распространенные источники пыли. Кроме песчаных бурь и вулканического пепла, образующегося при извержении, опасность также представляет ресуспендированный пепел. Отмечено, что стандартные методики испытаний на эрозионную стойкость имеют ограничения по размерам и скорости соударения частиц с объектами испытания, и не могут

полностью обеспечить имитацию условий эксплуатации современной авиационной техники. Проведен анализ конструкций эрозионных установок центробежного и пневматического типа. Представлена схема комбинированной установки, которая, по мнению авторов, является наиболее перспективной.

Список использованных источников

- [1] Влияние пыльных и песчаных бурь на работу авиационного транспорта и оценка условий их возникновения на аэродромах европейской части России / А.Р. Иванова, Е.Н. Скриптунова, Н.И. Комасько, А.А. Завьялова // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 78–95. DOI 10.37162/2618-9631-2020-4-78-95.
- [2] Эпизоды пыльных бурь на аэродромах азиатской части Российской Федерации / А.Р. Иванова, Е.Н. Скриптунова, Н.И. Комасько, А.А. Завьялова // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 20–42. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-20-42.
- [3] Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ / Международная организация гражданской авиации. Изд. 3-е. 2015. Doc 9691, AN/954.
- [4] Ресуспендированный пепел вулкана Шивелуч / О.А. Гирина, А.А. Сорокин, Д.В. Мельников, А.Г. Маневич, Ю.С. Крашенинникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 315–319. DOI 10.21046/2070-7401-2016-13-5-315-319.
- [5] Исследование устойчивости авиационного двигателя ПД-14 к воздействию вулканического пепла / А.А. Иноземцев, Л.С. Рысин, А.В. Челомбитько и др. // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26, № 2 (96). С. 60–70. DOI 10.54708/19926502_2022_2629660.
- [6] ГОСТ 23.201-84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя.
- [7] ASTM G76-18. Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets. 2018. 6 p.
- [8] Эрозионная стойкость композиционных материалов на основе клеевых препрегов при варьировании параметров испытания / А.Н. Боркова, Л.И. Помахаева, В.П. Помахаев, Л.А. Дементьева // клеи, герметики и технологии. 2007. № 3.
- [9] Finnie I., Wolak J., Kabel Y. Erosion of metals by solid particles // J. Mater. 1967. Vol. 2. P. 682–700.
- [10] Sheldon G.L., Kanhere A. An investigation of impingement using single particles // Wear. 1972. Vol. 21. P. 195–208.

Исследование разброса усталостных свойств в обеспечение требуемого уровня надежности при сертификации деталей из композиционных материалов

Д.С. Пальчиков, А.В. Демчишин
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

В работе рассмотрены методы учета минимальных свойств материала при сертификации деталей. Опробование приведенных методов выполнено на результатах циклических испытаний образцов из углепластика при растяжении. Сделаны выводы об их преимуществах и недостатках. Оценены разбросы свойств материала по двум критериям разрушения: снижение жесткости (расслоение) и полное разрушение.

Research of scatter in fatigue life for providing the required level of reliability in composite structural certification

D.S. Palchikov, A.V. Demchishin
CIAM, Moscow, Russia

Methods of providing reliability in structural certification are considered. Methods are tested on the results of tension-tension loading mode fatigue data. Conclusions about their advantages and disadvantages have been made. The estimation of material properties have been made for two failure criteria: delamination and full failure.

1. Введение

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции авиационного двигателя и воздушного судна требует проверенных процедур сертификации для демонстрации их конструктивной надежности. Одним из аспектов сертификации деталей и агрегатов из ПКМ является демонстрация соответствующей усталостной долговечности, обеспеченной испытаниями и их количественной интерпретацией. Методология сертификации композиционных конструкций в отличие от металлических предполагает учет большей чувствительности к технологическим дефектам, повреждениям и воздействию окружающей среды, учет множества возможных режимов отказа и усталостной долговечности гибридного соединения. В частности, композиционные материалы обладают большим разбросом свойств, что сказывается на требованиях к подтверждению прочностной надежности деталей из них. Например, для рабочей лопатки вентилятора (РЛВ) из ПКМ необходимым требованием является учет минимальных свойств материала при сертификационных испытаниях [1].

2. Основная часть

Цель работы – изучение мирового опыта по использованию методов учета минимальных свойств материала при сертификации деталей, их сравнение и определение границ применимости.

Для учета минимальных свойств материала при

сертификации деталей в общемировой практике используется подход, основанный на увеличении базы усталостных испытаний, где коэффициент увеличения (коэффициент долговечности – N_F) зависит от разброса свойств усталостной долговечности ПКМ (параметр формы (β) распределения Вейбулла (рис. 1). Так, если объект испытания рассчитан исходя из минимальных (худших) свойств материала (точка А), то объект испытания со средними свойствами должен пройти при сертификации базу равную $N_0 \cdot N_F$ (точка В).

Для снижения коэффициента долговечности (снижения продолжительности испытаний) с сохранением того же уровня надежности при испытаниях применяется коэффициент увеличения нагрузки (load enhancement factors – LEF), предложенный Центром развития военно-морской авиации NAVY (Naval Air Develop Center) [2]. Хотя традиционный метод изначально считался инновационной концепцией, он имеет ряд недостатков,

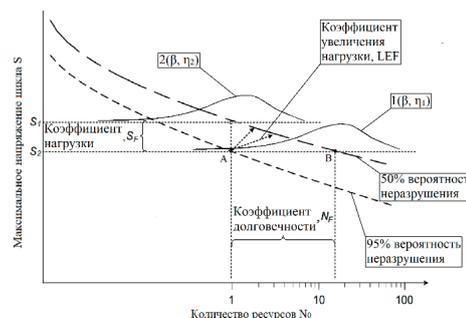


Рис. 1. Концепция учета минимальных свойств

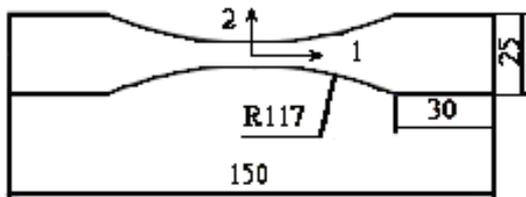


Рис. 2. Эскиз образца из углепластика

ограничивающих его применение, главными из которых являются предположения об одинаковом количестве образцов на каждом уровне нагружения и об одинаковом количестве образцов, достигших разрушения на каждом уровне нагружения.

Такие ограничения в реальных испытаниях являются труднопреодолимыми. Поэтому в работе [3] предложен альтернативный метод, призванный устранить эти ограничения. В формулировке нового метода используют традиционный LEF в качестве основы, но модифицированный объединенный (совместный) анализ Вейбулла. Оба метода исходят из предположения об одинаковом разбросе свойств (одинаковом параметре формы β) на каждом уровне нагружения (см. рис. 1, кривые 1 и 2).

Опробование приведенных методов выполнено на результатах циклических испытаний при растяжении ($R=0,1$) плоских образцов из углепластика. Образцы изготовлены по препреговой технологии и имеют схему армирования $[0; +45; 0; -45]_n$, (рис. 2).

4. Заключение

Выполнен анализ циклической долговечности по приведенным выше методам: метод, предложенный Р. Уайтхедом [2], и метод, предложенный Д. Джанкаспро [3]. Показаны допущения, принятые в данных методах. Сделаны выводы об их преимуществе и недостатках. Оценены разбросы свойств усталостной долговечности по двум критериям разрушения: снижение жесткости (расслоение) и полное разрушение.

Список использованных источников

- [1] Special Conditions: General Electric Company, GE9X Engine Models; Incorporation of Composite Fan Blades : 14 CFR Part 33 : [Docket No. FAA–2017–0171; Special Conditions No. 33–018–SC] / Department of Transportation, Federal Aviation Administration // Federal Register. 2017. Vol. 82, no. 60 (March 30). P. 15611–15612.
- [2] Certification testing methodology for composite structures. Vol. 1. Data analysis / R.S. Whitehead, H.P. Kan, R. Cordero, E.S. Saetheret : Naval air development center report 87042-60 (DOT/FAA/CT-86-39). 1986.
- [3] Giancaspro J., Taam W., Wong R. Modified joint weibull approach to determine load enhancement factors // International journal of fatigue. 2009. Vol. 31. P. 782–790.

Разработка перспективных методов экспериментальных исследований конструкционных керамических и композиционных материалов

М.А. Мезенцев, Б. Мыктыбеков, Д.С. Пальчиков, А.В. Синицын, А.А. Луппов, Д.В. Афанасьев,
С.В. Воробьев
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

Производилась разработка и отработка новых методов испытаний, средств измерений, типов образцов, экспериментальной оснастки и др. с целью получения расчетных значений характеристик керамических и композиционных материалов при высоких температурах. В результате разработаны опытный образец из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины и метод определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов с нагревом образца до заданной температуры с определенной скоростью при помощи инфракрасных тороидальных ламп.

Development of promising methods for experimental studies of structural ceramic and composite materials

M.A. Mezentsev, B. Myktybekov, D.S. Palchikov, A.V. Sinityn, A.A. Luppov, D.V. Afanasyev, S.V. Vorobyev
CIAM, Moscow, Russia

Work has been carried out on the development and refinement of new test methods, measuring instruments, types of samples, experimental equipment, etc. in order to obtain calculated values for the characteristics of ceramic and composite materials at high temperatures. As a result, a prototype of laminated composite materials for tensile testing in the thickness direction and a method for determining the ultimate tensile strength of ceramic and composite materials with heating the sample to a given temperature at a certain rate using infrared toroidal lamps were developed.

1. Введение

Для перспективных деталей и узлов горячего тракта газогенератора авиационного двигателя предъявляются высокие требования к конструкции и характеристикам материалов, которые должны обеспечивать следующие параметры: рабочая температура до 1500°C, стойкость к высоким перепадам температуры, возникающим при нагреве и охлаждении двигателя, статическая кратковременная прочность 250...300 МПа при температуре выше 1000°C, высокий коэффициент теплопроводности, высокие характеристики ударной вязкости и большое сопротивление развитию трещин. Конструкция должна компенсировать различные температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) в местах крепления узлов с ответными металлическими деталями.

Для определения некоторого перечня приведенных выше характеристик перспективных конструкционных материалов и конструкций авиационного двигателя необходимо проведение большого объема экспериментальных исследований. При этом необходимо постоянное развитие различных видов экспериментальных исследований, средств измерений,

удовлетворяющих требованиям квалификационных испытаний материалов и деталей и обеспечивающих их проведение.

В ЦИАМ разрабатываются новые методы испытаний, средства измерения, типы образцов, экспериментальная оснастка и др. с целью получения расчетных значений характеристик керамических и композиционных материалов при высокой температуре.

2. Разработка слоистого образца из композиционного материала

Понимание механического поведения композиционных материалов (КМ) при нагружении, знание характеристик физических свойств конструкционных материалов, таких как модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона, является основой для применения их в качестве конструкционных материалов. Хотя композиционные материалы анизотропны по своей природе, во многих случаях их свойства предполагаются однородными с точки зрения макромеханики, и в расчет принимаются усредненные механические свойства, что приводит к их неэффективному применению. В случае рассмотрения

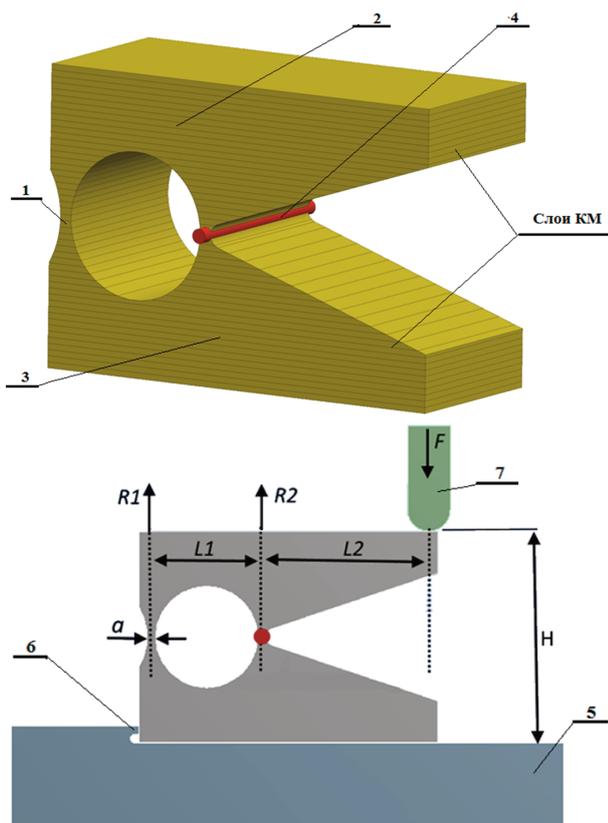


Рис. 1. Образец из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины

трансверсально-изотропной структуры КМ (направления в плоскости изотропии и нормальное направление к плоскости изотропии, или трансверсальное направление) описание линейной связи между напряжениями и деформациями трансверсально-изотропного композиционного материала при плоском напряженном состоянии необходимо иметь шесть упругих постоянных. Наиболее трудно реализуемым и практически невыполнимым является определение упругих и прочностных свойств КМ в направлении толщины КМ (трансверсальное направление). Для определения упругих и прочностных характеристик в этом направлении невозможно изготовить длинные стандартные образцы, в связи с чем необходимо другое исполнение образцов.

Разработанный образец из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины [1] представляет собой пластину, включающую захватные части и расположенную между ними рабочую часть (1). При этом захватные части выполнены в виде параллельно расположенных соответствующих балок (2) и (3), оси которых перпендикулярны оси рабочей части образца. Один конец каждой из балок жестко связан с соответствующим концом рабочей части образца, а

свободные концы предназначены для взаимодействия с нагружающим устройством (на чертеже не показана). Образец снабжен опорой (4), размещенной между балками (2) и (3) в средней их части и предназначенной для взаимодействия с последними (рис. 1). Опора может быть выполнена шарнирной, в виде металлической, керамической пластины или в виде слоя адгезионного материала, закладываемого между балками в процессе изготовления образца. Кроме того, при определении упругих характеристик исследуемого слоистого композиционного материала опора может быть выполнена в виде перемычки из материала образца, жестко связанной с балками.

3. Метод определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов

Определение упругих характеристик материалов достигается за счет того, что при осуществлении способа определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов, включающего нагрев образца до заданной температуры с определенной скоростью, выполняется при помощи инфракрасных тороидальных ламп [2].

Плоский образец (1) из керамического или конструкционного материала с рабочей зоной (2), которая составляет 5...10 мм, закрепляют в захватах (3, 4) нагружающего устройства, при этом размещают нагреватели, выполненные в виде инфракрасных тороидальных ламп (5). В процессе нагрева фокусируют тепловые лучи (6) инфракрасных

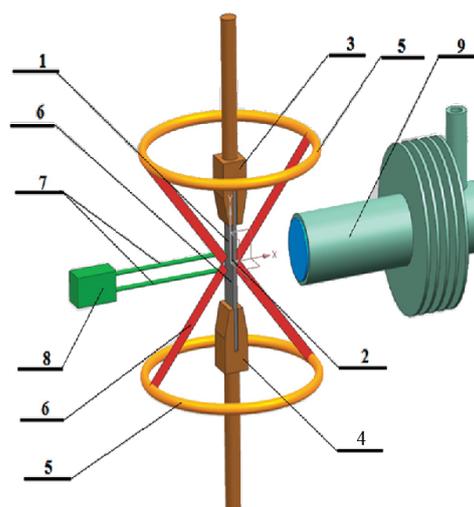


Рис. 2. Схема испытаний для определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов

тороидальных ламп под углом $15...75^\circ$ на ограниченной рабочей зоне плоского образца. Высокая скорость теплового излучения инфракрасных тороидальных ламп позволяет расширить диапазон скорости нагрева рабочей зоны плоского образца от 50 до $1500^\circ\text{C}/\text{с}$. Измерение деформации плоского образца выполняется в границах рабочей зоны при помощи щупов (7) высокотемпературного контактного экстензометра (8), а измерение температуры рабочей зоны плоского образца осуществляется при помощи тепловизора (9) (рис. 2).

4. Заключение

В результате разработан:

– образец из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины и выпущен патент [1];

– метод определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов и выпущен патент [2].

Список использованных источников

- [1] Образец из слоистых композиционных материалов для испытаний на растяжение в направлении толщины образца : патент RU 2798326 / Мыктыбеков Б., Луппов А.А., Мезенцев М.А., Пальчиков Д.С., Афанасьев Д.В. ; заявитель ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». 20.12.2022.
- [2] Способ определения предела прочности при растяжении керамических и композиционных материалов : RU патент 2794108 / Мыктыбеков Б., Луппов А.А., Мезенцев М.А., Пальчиков Д.С. ; заявитель ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». 07.10.2022.

Использование закономерностей течения вязких жидкостей в микроканалах для оценки возможности использования пропитки непрерывного углеродного волокна вязкими термопластичными связующими

Б. Мыктыбеков
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

Проведен обзор зарубежных работ по анализу закономерностей течения вязких жидкостей в микроканалах для оценки возможности использования пропитки непрерывного углеродного волокна вязкими термопластичными связующими. Разработка эффективного метода производства лески-препрега из непрерывного углеродного волокна и вязкого термопласта позволит максимально использовать преимущества аддитивного производства для изготовления деталей авиационных двигателей.

Use of flow patterns of viscous liquids in microchannels to assess the possibility of use for impregnation of continuous carbon fiber with viscous thermoplastic

B. Myktybekov
CIAM, Moscow, Russia

A review of foreign works on the analysis of the flow patterns of viscous liquids in microchannels was carried out to assess the possibility of using viscous thermoplastic binders for impregnation of continuous carbon fiber. The development of an effective method of producing a prepreg line from continuous carbon fiber and viscous thermoplastic will maximize the advantages of additive manufacturing for the manufacture of aircraft engine parts.

1. Введение

Проведен обзор зарубежных работ по анализу закономерностей течения вязких жидкостей в микроканалах для оценки возможности использования

пропитки непрерывного углеродного волокна вязкими термопластичными связующими.

В настоящее время наблюдается тенденция более широкого применения ПКМ с термопластичным связующим. В первую очередь это связано с их

некоторыми исключительными характеристиками:

- неограниченным сроком хранения;
- технологической простоте изготовления;
- возможности вторичной переработки;
- сохранению прочностных характеристик при высоких температурах;
- высокой вязкости разрушения.

Известно, что механические свойства материалов на основе смол для реактопластов сильно снижаются под действием влаги, в то время как термопластичные матрицы практически не поглощают воду и имеют высокую атмосферную и химическую стойкость к топливу, маслам, основаниям и кислотам. Одним из существенных недостатков полимерной матрицы по сравнению с металлом и керамикой является ее горючесть. Термопласты, которые имеют в структуре молекулы бензольных колец, при разложении не выделяют большого количества горючих летучих продуктов. Это снижает ее горючесть по сравнению с реактопластами. Некоторые термопласты могут содержать в своей структуре жесткоцепные полиарилены и полигетероарилены, которые позволяют достигать высокой рабочей температуры. Наряду с высокими термоустойчивостью и упруго-прочностными свойствами, материалы этой группы отличаются стойкостью к действию ударных циклических нагрузок и растрескиванию, стабильностью размеров при низких (-60°C) и повышенных ($+250^{\circ}\text{C}$) температурах.

Еще одним из преимуществ термопластов является возможность использования аддитивных технологий (АТ) для изготовления деталей. Однако, несмотря на все преимущества, АТ имеют ограничения для применения в авиационном двигателе (АД). Решением данной проблемы является 3D-печать с использованием специальной лески-препрега, состоящей из конструкционного термопласта, армированного непрерывными волокнами углерода (ТПКМ).

2. Основная часть

Одним из ключевых проблем создания ТПКМ является повышенная динамическая вязкость термопласта. Вязкость обычных термопластов находится в диапазоне $50 \dots 2000 \text{ Па}\cdot\text{с}$, что сильно контрастирует с терморезактивными пластиками в их несшитом состоянии, где вязкость редко превышает $50 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Это очень сильно усложняет процесс пропитки волокна связующим.

Пропитку слоя волокон (рис. 1) можно описать в терминах закона Дарси для одномерной жидкости [1]:

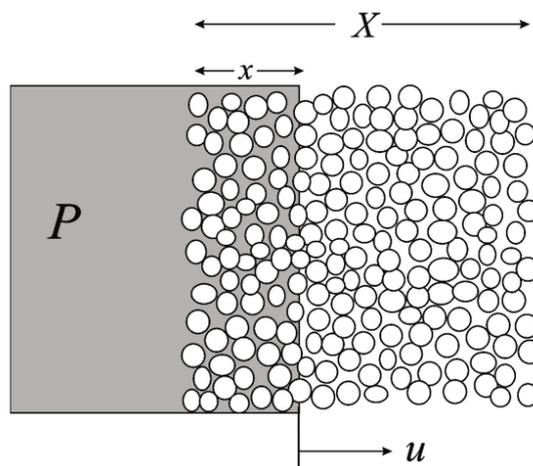


Рис. 1. Процесс пропитки углеродного волокна термопластом

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{Kdp}{\eta dx}, \quad (1)$$

где u – скорость потока термопласта, градиент давления равен dp/dx , K – проницаемость пучка волокон, а η – вязкость расплава полимера. Заметив, что градиент давления в этом случае равен просто p/x , и, интегрировав уравнения (1), получим время пропитки [1; 2]

$$t_{\text{imp}} = \frac{\eta X^2}{2Kp}, \quad (2)$$

где p – сумма прилагаемого и капиллярного давления. Капиллярное давление является результатом изменения поверхностной энергии, когда полимер смачивает поверхность волокна. К сожалению, значения капиллярного давления для систем термопласт – волокно обычно относительно невелики $4 \dots 40 \text{ кПа}$ [3]. Поэтому в случае использования только капиллярного давления время пропитки будет очень большим, если бы для достижения пропитки полагались только на капиллярные эффекты [4].

Проницаемость (K) – ключевой параметр в процессах пропитки. Предполагая, что слой волокна состоит из массива параллельных волокон, проницаемость можно оценить с помощью модифицированного уравнения Кармана – Козени [1]

$$K = \frac{r_f^2 (1 - v_f)^3}{4c v_f^2}, \quad (3)$$

где c – значения постоянной Козени различается для потоков, параллельных и перпендикулярных волокнам, и также зависит от конкретной системы связующее – волокно.

Малые диаметры лески ($0,6 \text{ мм}$) и филаментов углеродного волокна ($6 \dots 8 \text{ мкм}$) приводят к

необходимости использования соотношении микрофлюидики, когда поверхностные силы начинают доминировать над объемными. Такое соотношение сил приводит к ряду характерных особенностей течения жидкостей в микроканалах:

- высокому гидродинамическому сопротивлению;
- доминированию капиллярных сил в многокомпонентных средах;
- сильному влиянию стенок канала на деформационное поведение и предельные характеристики дисперсной фазы (эффекты конфейнмента).

Низкое число Рейнольдса приводит к существенно ламинарному характеру течения, что препятствует эффективному смешению термопласта и филаментов углеродного волокна.

С учетом вышесказанного для получения годной лески-препрега необходимо обеспечить два условия:

- высокое давление;
- высокое значение постоянной Козени.

Для оценки эффективного смешения термопласта и филаментов в микроканале были рассмотрены различные подходы, соответствующие концепции «лаборатория на кристалле» (Lab-on-a-chip) [5]. Эти подходы можно распределить по двум группам:

- активные микроканальные смесители;
- пассивные микроканальные смесители.

Активные микрожидкостные миксеры имеют повышенную эффективность благодаря использованию некоторой формы внешнего источника энергии. Как показано на рис. 2, в активных смесителях обычно используют акустические/ультразвуковые, диэлектрофорезные, электрокинетические импульсы, перепады давления, электрогидродинамические, магнитные или тепловые методы для улучшения характеристик перемешивания [6].

В то же время пассивные микромиксеры не содержат движущихся частей и не требуют подвода энергии, кроме напора, используемого для приведения потоков

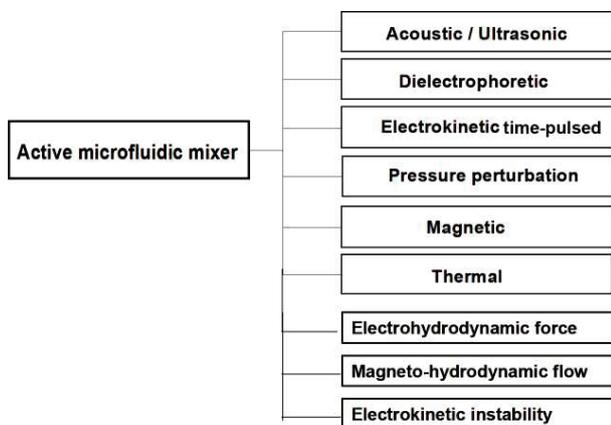


Рис. 2. Категории методов активного смешения в микроканале

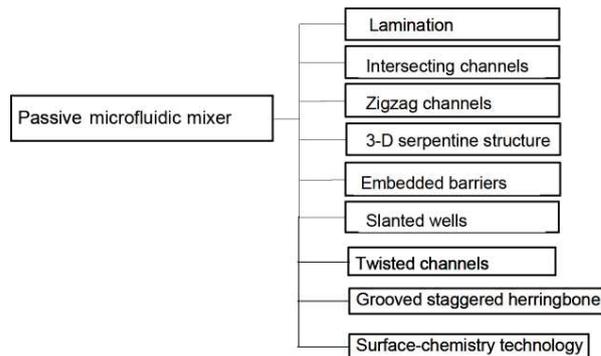


Рис. 3. Категории методов пассивного смешения в микроканале

жидкости с постоянной скоростью. Из-за присущих микромасштабным потокам ламинарных характеристик смешивание в пассивных микромиксерах в основном зависит от эффектов хаотической адвекции, реализуемых управлением ламинарным потоком внутри микроканалов или увеличением молекулярной диффузии за счет увеличения площади контакта и времени контакта между компонентами смешивания. На рис. 3 приведены основные методы пассивного перемешивания [6].

Существует множество различных систем, позволяющих получить леску-препрег. У каждой системы есть свои преимущества и недостатки. Необходимо учитывать, что используемая методика также должна обеспечивать получение непрерывной лески.

В работе [7] показано, что постоянная Козени существенно отличается для систем, где происходит пропитка волокна в продольном и поперечном направлении. В зависимости от типа термопласта и волокна соотношение постоянной для продольной и поперечной пропитки меняется в диапазоне от 6 до 30 раз. Поэтому для эффективного смешения необходимо обеспечить максимально продольное смешение. Необходимо отметить, что для получения непрерывной лески-препрега невозможно обеспечить полностью продольное смешение.

3. Заключение

Проведен обзор зарубежных работ по анализу закономерностей течения вязких жидкостей в микроканалах для оценки возможности использования пропитки непрерывного углеродного волокна вязкими термопластичными связующими.

На базе проведенного анализа была сформирована новая концепция получения лески-препрега, которая обеспечивает выполнение всех требований технического задания.

Список использованных источников

- [1] Gibson A.G. Continuous molding of thermoplastic composites // *Materials Science and Materials Engineering*. Vol. 2. Polymer Matrix Composites. Elsevier, 2000. Pt. 2.29. P. 979–998. DOI 10.1016/B0-08-042993-9/00185-6.
- [2] Gibson A.G., Manson J.-A. Impregnation technology for thermoplastic matrix composites // *Composites Manufacturing*. 1992. Vol. 3, iss. 4. P. 223–233. DOI 10.1016/0956-7143(92)90110-G.
- [3] Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements / Ahn Kyujong et al. // *Polymer Composites*. 1991. Vol. 12. P. 146–152.
- [4] Lee W.I., Springer G.S. A model of the manufacturing process of thermoplastic matrix composites // *Journal of Composite Materials*. 1987. Vol. 21, iss. 11. DOI 10.1177/002199838702101103.
- [5] Bruus H. *Theoretical Microfluidics*. Oxford University Press, 2008. xiii, 339 p.
- [6] Micromixing within microfluidic devices / L. Capretto, W. Cheng, M. Hill, X. Zhang // *Microfluidics. Technologies and Applications*. 2011. P. 27–68. (Topics in Current Chemistry).
- [7] On the variability of permeability induced by reinforcement distortions and dual scale flow in liquid composite moulding: a review / M. Bodaghi, S.V. Lomov, S. Advani, P. Simacek, N. Correia // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 120. P. 188–210.

Особенности экспериментальных исследований углепластиков для деталей авиационных двигателей

Д.С. Пальчиков, А.Д. Богомолова, А.В. Сеницын, Д.В. Афанасьев
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

В работе рассмотрены основные особенности экспериментальных исследований полимерных композиционных материалов для деталей авиационного двигателя на примере рабочей лопатки вентилятора из углепластика. Обсуждается перечень необходимых экспериментальных исследований материала, включая учет влияния повреждений, внешних воздействующих факторов. Также рассмотрены вопросы оценки статической и усталостной прочности хвостовика, основанной на испытаниях конструктивно подобных элементов и полноразмерной рабочей лопатки вентилятора.

Features of CFRP experimental studies for aircraft engine parts

D.S. Palchikov, A.D. Bogomolova, A.V. Sinitsyn, D.V. Afanasev
CIAM, Moscow, Russia

The paper considers the main features of CFRP experimental studies for aircraft engine parts using the example of a carbon fiber fan blade. The list of necessary experimental studies of the material is discussed, including consideration of the impact damage, external influencing factors. The issues of assessing the static and fatigue strength of the shank, based on tests of structurally similar elements and full-size fan blade, are also considered.

1. Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) все больше находят применение в конструкции авиационного двигателя и планера самолета. Опыт зарубежных и отечественных компаний показывает, что углепластики с успехом можно применять в конструкции планера самолета вместо алюминиевых сплавов и в лопатках вентилятора вместо титановых, если в процессе проектирования правильно подойти к

оценке их прочностных свойств.

По сравнению с деталями из металлических сплавов процесс создания деталей из ПКМ имеет существенные отличия. В первую очередь, это связано с особенностями самого композиционного материала, отличающегося анизотропией, высоким разбросом механических характеристик, относительно низкой ударостойкостью и в некоторых случаях низкой стойкостью к различным воздействующим факторам. Данные особенности требуют проведения широкого

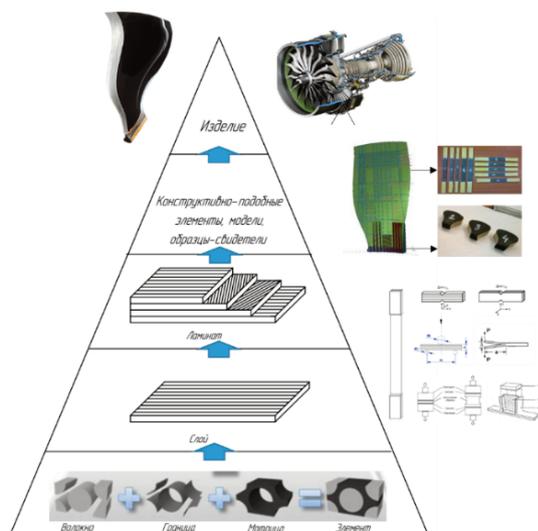


Рисунок. Пирамида испытаний на примере РЛВ из углепластика

спектра экспериментальных исследований. В данной работе рассмотрен перечень необходимых экспериментальных исследований ПКМ для деталей авиационных двигателей (АД), таких как рабочая лопатка вентилятора (РЛВ).

2. Экспериментальные исследования прочности ПКМ

С точки зрения перечня экспериментальных исследований подход к созданию деталей из ПКМ наглядно демонстрирует так называемая пирамида испытаний, используемая при сертификации деталей из ПКМ [1]. Согласно данной схеме испытания проводят снизу вверх, от простых образцов до конструктивных элементов и полноразмерной детали, причем большее количество испытаний приходится на простейшие образцы (рисунок).

Помимо базового перечня упруго-прочностных характеристик для ПКМ определяют такие характеристики, как прочность при растяжении и сжатии образцов с отверстием (ОНТ и ОНС), а также прочность при сжатии после удара (САИ). Данные характеристики напрямую не используются в расчетах, однако имеют высокую практическую важность, а в некоторых случаях являются определяющими при выборе материала для будущей детали [2]. Значение САИ показательно с точки зрения работоспособности материала, получившего ударное повреждение. Данная характеристика широко используется для деталей воздушного судна из ПКМ, где сжимающие нагрузки при предельных эксплуатационных режимах являются критическими. Однако для вращающихся деталей из ПКМ, в эксплуатации подвергаемых случайным ударам,

например РЛВ, определения одной прочности при сжатии после удара недостаточно, необходимо как минимум три характеристики: растяжение (ТАИ), сжатие (САИ) и сдвиг в плоскости после удара (ШАИ). На примере РЛВ разработки ЦИАМ (условное обозначение ЦИАМ-1) показано применение данных характеристик для оценки допустимых эксплуатационных напряжений РЛВ.

Следующим аспектом экспериментальных исследований ПКМ является определение механических характеристик с учетом внешних воздействующих факторов, таких как повышенная и пониженная температура, а также влажность. В работе показан характер влияния указанных факторов и их комбинаций на различные характеристики прочности углепластиков авиационного назначения.

Дополнительно приведены способы оценки статической и усталостной прочности хвостовика РЛВ ЦИАМ-1, основанные на испытаниях конструктивно-подобных элементов (КПЭ) хвостовика [3] и полноразмерной РЛВ.

3. Заключение

В работе показаны основные особенности экспериментальных исследований ПКМ для деталей АД. Приведен и обоснован перечень необходимых экспериментальных исследований ПКМ при создании РЛВ. Приведены результаты экспериментальных исследований углепластиков авиационного назначения с учетом повреждений и внешних воздействующих факторов. Продемонстрированы экспериментальные методы оценки статической и усталостной прочности хвостовика путем испытаний КПЭ и полноразмерной РЛВ ЦИАМ-1.

Список использованных источников

- [1] Composite Aircraft Structure : advisory circular : date: 08.09.2009 : AC No 20-107B / U.S. Department of transportation, Federal Aviation Administration. 2010. 13 p.
- [2] О формировании технических требований к полимерному материалу перспективной рабочей лопатки вентилятора ТРДД / Т.Д. Каримбаев, А.А. Луппов, Д.В. Афанасьев, Д.С. Пальчиков // Двигатель. 2015. №1 (97). С. 2–8.
- [3] Пальчиков Д.С. Экспериментальное определение долговечности хвостовиков рабочих лопаток вентиляторов, изготовленных из полимерных композиционных материалов // Прочность и надежность газотурбинных двигателей : сборник научных трудов / под ред. Ю.А. Ножницкого. М. : ЦИАМ, 2020. С. 223–226.

Статические испытания платформы вентилятора из композиционных материалов

О.С. Ахапкина, Д.В. Габов, А.В. Пахоменков
ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск

Для проверки статической прочности платформы вентилятора из полимерного композиционного материала необходимо проведение разгонных испытаний. Проведение таких испытаний – трудоемкая и дорогостоящая задача, и выводить на такие испытания необходимо готовую рабочую ступень. Для подтверждения промежуточных доработок и набора статистической базы необходимо применять менее трудоемкий и менее затратный метод расчетно-экспериментальной проверки статической прочности. Разработан вариант экспериментальной проверки статической прочности платформы при нагружении, имитирующем центробежную нагрузку. Такой метод проведения испытаний может являться альтернативой разгонным испытаниям.

Static testing of the composite fan platform

O.S. Ahapkina, D.V. Gabov, A.V. Pahomenkov
PJSC “UEC-Saturn”, Rybinsk, Russia

To check the static strength of the fan platform made of polymer composite material it is necessary to carry out acceleration tests. Such tests are time-consuming and expensive to provide, and it is necessary to test a finished working stage. To confirm intermediate improvements and gather the statistical database, it is necessary to use a less laborious and less costly method of computational and experimental verification of static strength. A version of the experimental verification of the static strength of the platform under load, that simulates a centrifugal load, has been developed. This test method can be an alternative to acceleration testing.

1. Введение

В настоящее время в конструкции авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) широко используются детали, изготовленные из полимерных композиционных материалов (ПКМ). По сравнению с металлическими материалами ПКМ обладают более высокой удельной прочностью и жесткостью. Это позволяет снизить массу двигателя и повысить его экономичность путем снижения удельного расхода топлива. Данное преимущество особенно ярко проявляется при изготовлении рабочих лопаток вентилятора (РЛВ) авиационных ГТД большой размерности, так как ведет к значительному снижению массы как диска вентилятора, так и РЛВ. При этом для обеспечения наименьших повреждений РЛВ на рабочих режимах вследствие взаимодействия с платформой, образующей нижнюю часть проточного тракта, логично ввести данный элемент конструкции из композиционного материала, что позволит не только обеспечить контактную пару сопоставимых материалов, но и снизить массу платформы.

2. Основная часть

Одной из основных нагрузок, действующих на

платформу при ее эксплуатации в составе ГТД, является центробежная нагрузка.

В данной работе рассматривались различные технологии изготовления, схемы укладки и компоновки платформы в целом. В каждом случае необходимо выполнять оценку статической прочности от центробежной нагрузки и выполнять ее экспериментальную проверку. Применение разгонных испытаний в этом случае является нерациональным вследствие их высокой стоимости. Целесообразно разработать метод, который позволил бы заменить дорогостоящие разгонные испытания статическими испытаниями, в которых моделируется действие центробежной нагрузки на платформу.

Суть предлагаемого метода статических испытаний заключается в приложении с помощью специального приспособления усилия, передаваемого через центр тяжести платформы, жестко закрепленной на основании растяжной машины (рис. 1). Предполагается, что такого рода одноосное нагружение позволяет сымитировать напряженно-деформированное состояние платформы, близкое к возникающему при ее эксплуатации в составе ГТД.

Первый вариант платформы был изготовлен с использованием сборной конструкции склеенных между собой элементов полимерного композицион-

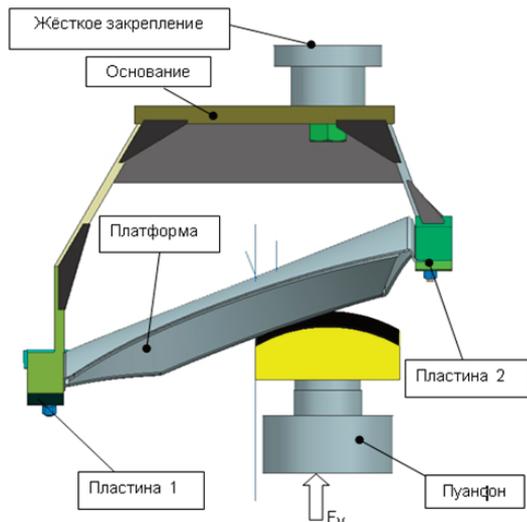


Рис. 1. Общий вид платформы в составе испытательной установки

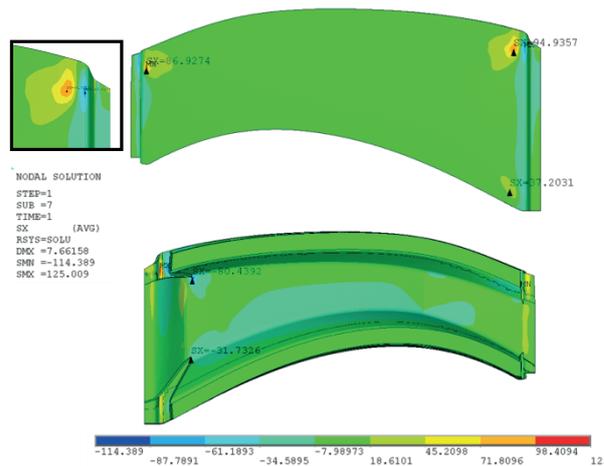
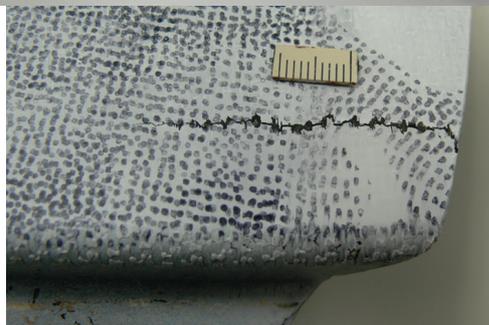
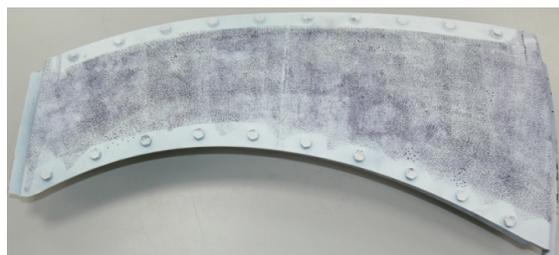


Рис. 3. Распределение напряжений (ГПа) в направлении основы XX платформы из ПКМ при центробежной нагрузке



а



б

Рис. 2. Разрушение по клеевому слою платформы из ПКМ

ного материала. Нагружение данной конструкции показало неудовлетворительный уровень адгезии такого типа материалов для использования клеевых соединений.

Согласно результатам испытаний укрепленной платформы, разрушение произошло по сечению, в котором располагаются критические зоны, полученные в ходе статического расчета (рис. 2).

Таким образом, сечение, по которому при испытаниях произошло разрушение платформы (рис. 3), совпадает с критическим сечением платформы в соответствии с результатами расчета.

3. Заключение

Для более корректного обоснования применимости предложенного метода испытания целесообразно измерить уровни деформаций или напряжений в критической части платформы с помощью видеоэксотензометров. Эти напряжения можно сравнить с расчетными значениями и сделать заключение о степени консерватизма использованной схемы испытания.

Разработка алгоритма аугментации обучающих данных для систем визуального контроля поверхностных дефектов композиционных материалов с использованием технологии преобразования текста в изображение

П.А. Королев, П.А. Ухов
МАИ (национальный исследовательский университет), Москва

Повышение метрик определения дефектов моделями машинного обучения за счет обогащения обучающего набора данных с учетом зон возможного размещения дефектов.

Development of an algorithm for augmenting training data for systems for visual inspection of surface defects in composite materials using text-to-image conversion technology

P.A. Korolev, P.A. Ukhov
MAI, Moscow, Russia

Improving the metrics for detecting defects by machine learning models by enriching the training data set, taking into account the zones of possible location of defects.

1. Введение

На сегодняшний день системы с искусственным интеллектом на базе компьютерного зрения широко применяют в промышленности [1]. Данные системы используют как для контроля внешних дефектов композиционных материалов, так и для обнаружения дефектов структуры композиционного материала. Например, для полимерных композиционных материалов (ПКМ) возможно выявление дефектов структуры на базе импедансного метода и алгоритмов машинного обучения для анализа сигналов датчика. Кроме того, для поточного производства композиционных материалов возможна реализация автоматизированных методов визуального контроля ПКМ на наличие поверхностных трещин, раковин и вмятин, растрескивание связующего, нахлест слоев или витков армирующих материалов, наличие складок армирующего материала, крупных царапин и других видов повреждений.

Машинное обучение позволяет получить эффективные и высокоточные алгоритмы для контроля только при наличии большого объема исходных данных, которые собирают в виде датасетов соответствующей структуры. При этом важным является наличие большого количества примеров дефектов того или иного класса в датасете и равномерность распределения различных дефектов по классам. Нередко этого сложно достигнуть ввиду малого количества исходных данных, а при использовании методов компьютерного зрения для визуального контроля влияют такие факторы, как

освещение и параметры камеры, использованной для получения изображений дефектов.

Для получения эффективных алгоритмов машинного обучения необходимо выполнить сбор данных в виде датасета, его балансировку по видам дефектов, а нередко предварительную обработку изображений, разметку в зависимости от решаемой задачи (сегментация или детекция дефектов) и аугментацию. Только после выполнения данных шагов становится возможным выбирать архитектуры моделей машинного обучения и анализировать их метрики на собранном датасете. На реальном производстве ПКМ обнаружение дефектов является довольно редким событием, что не позволяет сформировать сбалансированный датасет для машинного обучения в кратчайшие сроки. Кроме того, частота появления дефектов различна, что может существенно влиять на процесс обучения. Например, для ПКМ нарушение сплошности в виде трещин и крупных воздушных или газовых раковин являются более частыми, чем нахлест слоев или растрескивание связующего, что затрудняет сбор сбалансированного датасета.

Для увеличения объема данных в датасете прибегают к обогащению данных на основе имеющихся [2], такой прием называется аугментацией данных. Стандартная аугментация данных для решения задач дефектоскопии на основе машинного зрения реализуется путем изменения изображений через различные операции, такие как поворот, масштабирование, обрезка области интереса изображения, добавление шумов, повороты

изображений и т.д. Такой метод аугментации хорошо работает при наличии достаточного количества дефектов на изображениях, а также при одинаковом распределении классов дефектов в обучающем наборе данных. Однако для разработки алгоритмов машинного обучения в условиях, где дефекты встречаются довольно редко, такие технологии неэффективны и не позволяют получить высокие метрики работы алгоритмов и обобщающую способность модели, достаточные для использования решения в системах технической диагностики ответственных изделий, например элементов планера летательного аппарата или гондолы авиационного двигателя.

Чтобы решить проблему распределения классов дефектов на изображениях ПКМ, в данной работе предлагается использовать более сложный метод аугментации обучающих данных, основанный на генерации изображений по текстовому описанию [3]. Указанная технология основана на использовании специального класса алгоритмов машинного обучения – диффузионных моделей. Указанные модели были предложены для генерации изображений. К ним можно отнести DALLE 2, Midjourney, Imagen.

В августе 2022 года компанией Stability AI была выпущена нейросеть Stable Diffusion, которая предназначена для генерации изображений по текстовому запросу. Stable Diffusion – это алгоритм, состоящий из множества компонентов и моделей. Это не единая монолитная модель. В основе решения – компонент понимания текста, компонент создания информации об изображении и декодер изображения.

Для кодирования текста используется модель ClipText, получающая на вход текст и преобразующая его в 77 векторов эмбедингов токенов, каждый в 768 измерениях. Далее эта информация подается на вход сети UNet+Scheduler для постепенной обработки (диффузии) информации в пространстве информации (скрытом пространстве) – массив 4, 64, 64, который передается декодеру автокодировщика, рисующего готовое изображение при помощи массива обработанной информации. Результатом работы алгоритма является готовое изображение размера (3, 512, 512), что соответствует каналам цвета (красный/зеленый/синий), ширине и высоте.

Указанный алгоритм позволяет создавать новые изображения на основе текстового описания, которое задается человеком. Кроме этого, модель можно дообучить на собственных данных, что является ее существенным достоинством. Таким образом, на основе текстового описания можно сгенерировать новое изображение с дефектом, которое может быть добавлено в обучающий набор данных, после чего

применить стандартные методы аугментации, что в совокупности повысит валидационные метрики модели на распознавание объектов на изображениях.

Технология подготовки данных выглядит следующим образом. На изображениях ПКМ без дефектов эксперт предварительно указывает места, в которых, по его мнению, могут возникать те или иные поверхностные дефекты. Шаблоны с местами возможного расположения дефектов размечаются, к ним добавляется текстовое описание дефектов ПКМ. После этого на подготовленных данных выполняется так называемый тюнинг модели Stable Diffusion и получается алгоритм для генерации указанных дефектов.

Далее подготовленный на экспертных данных алгоритм позволяет сгенерировать произвольное количество дефектов и получить сбалансированный по классам датасет достаточного объема для обучения модели обнаружения дефектов на изображениях.

2. Заключение

Предложенный метод аугментации был протестирован на датасете дефектов поверхностей изделий из дерева [4] и датасете дефектов наружной поверхности металлических труб. Благодаря аугментации с генерацией изображений по текстовому описанию удалось добиться равномерного распределения классов дефектов в обучающем наборе данных и повысить валидационные метрики моделей обнаружения объектов на изображениях, в первую очередь mAP.

В перспективе указанные метод может быть использован для обнаружения методами компьютерного зрения поверхностных дефектов ПКМ на поточном производстве, что позволит существенно сократить трудоемкость контрольных операций и производить дефектовку изделий из ПКМ в автоматизированном режиме.

Список использованных источников

- [1] Ramentol E., Olsson T., Barua S. Machine Learning Models for Industrial Applications // AI and Learning Systems. Industrial Applications and Future Directions. 2021. Chap. 7. 19 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/349408537_Machine_Learning_Models_for_Industrial_Applications.
- [2] Mikołajczyk A., Grochowski M. Data augmentation for improving deep learning in image classification problem // 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW). IEEE, 2018. P. 117–123. URL:

https://www.researchgate.net/publication/325920702_Data_augmentation_for_improving_deep_learning_in_image_classification_problem.

- [3] High-resolution image synthesis with latent diffusion models / R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz, P. Esser, B. Ommer // 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New Orleans, Louisiana 19–24 June 2022 : proceedings.

2022. P. 10684–10695. DOI 10.48550/arXiv.2112.10752.

- [4] Kodytek P., Bodzas A., Bilik P. A large-scale image dataset of wood surface defects for automated vision-based quality control processes [version 2; peer review: 2 approved] // F1000Research. 2022. 10:581. 16 p. DOI 10.12688/f1000research.52903.2.

Опыт применения стекло- и углепластиков разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигателестроении

А.О. Курносов¹, А.В. Славин¹, А.Г. Гуняева¹, И.А. Зимнюков²

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва

² АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь

Создание современных двигательных установок было бы невозможным без разработки, всестороннего исследования и применения материалов нового поколения, к которым относятся полимерные композиционные материалы. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ уже много лет ведется разработка и успешно внедряются полимерные композиционные материалы (стекло- и углепластики) в конструкции отечественных двигательных установок ПС-90А, ПД-14, ПД-8.

Experience in the use of glass and carbon plastics processing NRC «Kurchatovsky institute» – VIAM in engine building

A.O. Kurnosov¹, A.V. Slavin¹, A.G. Gunyaeva¹, I.A. Zimnyukov²

¹ NRC “Kurchatov Institute” – VIAM, Moscow, Russia

² JSC “UEC-Aviadvigatel”, Perm, Russia

The creation of modern propulsion systems would not be possible without the development, comprehensive research and implementation of new generation materials, which include polymer composite materials. NRC “Kurchatov Institute” – VIAM have been working for many years on the development and successful implementation of polymer composite materials (carbon and fiberglass) in the design of domestic propulsion systems PS-90A, PD-14, PD-8.

1. Введение

Двигателестроение – одна из наиболее высокотехнологичных отраслей отечественной промышленности. Создание современных авиационных двигательных установок (ДУ) было бы невозможным без разработки, всестороннего исследования и применения полимерных композиционных материалов (ПКМ). Применение ПКМ в составе авиационных двигателей позволяет уменьшить массу конструкции, увеличить топливную эффективность, повысить надежность и увеличить межремонтный ресурс и, соответственно, сократить прямые эксплуатационные расходы. Применение ПКМ дополнительно позволяет применить новые подходы к конструированию ДУ, в

том числе внедрить новые звукопоглощающие конструкции.

Авиационный двигатель эксплуатируется при критической частоте вращения роторов, высокой температурной нагруженности отдельных элементов конструкции и значительных перепадах температуры в разных климатических зонах. Поэтому к качеству выполнения деталей и сборочных единиц авиационного двигателя, от которых напрямую зависит эффективность работы всего двигателя, предъявляются высокие требования [1].

В данной работе рассмотрены стекло- и углепластики, применяемые в составе выпускаемых двигательных установок ПС-90А, ПД-8 и ПД-14, предназначенных для самолетов гражданской авиации.



Рис. 1. Двигатель ПС-90А

ПС-90А и его модификации (рис. 1) – российский турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД), одно из важнейших достижений российского авиационного моторостроения 1980...90-х гг., первый российский авиадвигатель четвертого поколения, сертифицированный по международным стандартам.

Разработка двигателя четвертого поколения потребовала внедрения самых передовых на тот момент конструкторских решений и технологий: новых методов проектирования и доводки, значительной реконструкции испытательной базы, внедрения новейших производственных технологий и материалов.

По заданному уровню термодинамических и удельных параметров ПС-90А соответствовал нормам научно-технического уровня 1990-х годов и не уступал по основным характеристикам и параметрам рабочего процесса лучшим зарубежным аналогам, которые находились в разработке в 1980-х годах и вошли в эксплуатацию в 1990-е годы.

Двигатель ПС-90А устанавливается на пассажирские самолеты семейства Ил-96 (Ил-96-300 и Ил-96-400) и Ту-204 (Ту-204-100, Ту-204-300, Ту-214) и за годы эксплуатации данные самолеты зарекомендовали себя на международных и внутренних авиалиниях как безопасные и комфортабельные лайнеры.

В узлах двигателя ПС-90А применяются разработанные и серийно поставляемые НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ угле- и стеклопластики на основе растворного эпоксидного связующего: углепластик марки КМУ-4э-2М и стеклопластики марки ВПС-33 и ВПС-34. Данные материалы применены в составе звукопоглощающих конструкций и реверсивном устройстве (рис. 2), которые представляют собой сложную многослойную конструкцию, изготовленную из углепластиковой трубчатой сэндвич-панели с комбинированными обшивками из углепластика и стеклопластика.



Рис. 2. Реверсивное устройство двигателя ПС-90А

Долгие годы ПС-90А был флагманской разработкой отечественного двигателестроения, но в июне 2008 года было принято решение о создании новейшего российского газотурбинного двигателя ПД-14.

Одной из важнейших проблем при создании ДУ ПД-14 являлась разработка мотогондолы.

Впервые в отечественной инженерной и технологической практике АО «ОДК-Авиадвигатель» совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ сконструировали мотогондолу двигателя ПД-14, состоящую ~60% по массе из ПКМ, обеспечивающую высокую весовую эффективность по сравнению с металлическими аналогами при сохранении требуемых упруго-прочностных свойств, в том числе высоких ударной вязкости и стойкости к климатическим факторам, и отвечающую требованиям по шуму как внутри салона, так и на местности.

Перед сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и АО «ОДК-Авиадвигатель» стояла задача по разработке и проведению общей и специальной квалификации комплекса ПКМ нового поколения на основе высокодеформативной полимерной матрицы и стекло- и углеродных наполнителей, организации серийного производства их полуфабрикатов для изготовления узлов мотогондол перспективных двигательных установок. С 2013 года в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ начал активно проводить данные работы.

В результате проведенных научно-исследовательских работ был создан комплекс ПКМ (углепластики типа ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39 и стеклопластики типа ВПС-48) на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-1212, обладающих высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных характеристик, являющихся конкурентоспособными на мировом рынке, которые успешно внедрены в конструкцию мотогондолы ДУ ПД-14 (рис. 3), определенного для самолета МС-21. При разработке данных материалов была выпущена вся необходимая нормативно-технологическая



Рис. 3. Мотогондола двигателя ПД-14

документация для их внедрения в производство, а при проведении общей специальной квалификации было испытано более 25 000 шт. зачетных образцов ПКМ.

Разработанные ПКМ нашли свое применение для изготовления створок капота, реверсивного устройства и воздухозаборника, были внесены в спецификацию и серийно поставляются на предприятия – изготовители деталей (АО «ПЗ «Машиностроитель», филиал ПАО «Ил» – ВАСО, АО «ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина») и сборочных единиц мотогондол двигательных установок.

Благодаря проведению комплекса научно-исследовательских работ по разработке и общей квалификации ПКМ, их успешному внедрению в конструкцию двигательной установки ПД-14 (рис. 3) стало возможным применение этих же материалов в конструкции двигательной установки ПД-8, определенной для самолета SJSJ-New, для замены зарубежного двигателя SaM146 компании PowerJet.

В настоящее время наблюдается общемировая тенденция расширения применения ПКМ в конструкции авиационной техники за счет изготовления из них теплонагруженных элементов планера (капотов двигателей, обтекателей теплообменников, панелей газогенераторов и пр.). Для внедрения материалов нового поколения в теплонагру-

Рабочая температура, °C	Термостойкие связующие	Марки связующих	Марки ПКМ
	Фталонитрильные Траб. до 400°C	ВСН-31	ВКУ-38ТР, ВКУ-38ЖН, ВКУ-38ТП
	Кремнийорганические Траб. 300-350°C	К-9-70С, К-9ФА	СК-9ФА, СК-9ДФ, МСТ-5К
	Полиимидные Траб. 250-320°C	СП-97с, СП-97к, ВС-51	СТП-97с, СТП-97К, ВКУ-61, ВПС-72
	Бисмаленимидные Траб. до 220°C	ПАИС-104, ВСТ-57	КМУ-8, ВКУ-74, ВПС-75
	Цианэфирные Траб. 180-200°C	ВСТ-1208, ВСЦ-14, ВСТ-32, ВСТ-1210	ВКУ-42, ВКУ-48, ВПС-47/7781, ВПС-41

Рис. 4. Высокотемпературные ПКМ

женные элементы конструкций авиационной техники и увеличения в них доли ПКМ необходимо расширение температурного диапазона и повышение эксплуатационных характеристик данного класса материалов.

Так, для вышеуказанных задач в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана широкая линейка материалов (рис. 4) на основе разных классов связующих (цианэфирные, бензоксазиновые, кремнийорганические, бисмаленимидные, полиимидные, фталонитрильные), работоспособных при температуре свыше 200°C, среди которых особый интерес представляют ПКМ на основе полиимидных связующих.

2. Заключение

В результате многолетней работы в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ создан широкий ассортимент отечественных ПКМ, обладающих высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных характеристик, которые успешно внедрены в конструкцию двигателей ПС-90А, ПД-14 и ПД-8.

Список использованных источников

- [1] Рубцов С.М. Применение современных полимерных композиционных материалов в элементах и узлах газотурбинных авиационных двигателей: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Пермь, 2009. 17 с.
- [2] ПКМ нового поколения для мотогондолы двигателя ПД-14 / А.О. Курносков, И.И. Соколов, Д.А. Мельников, А.Е. Раскутин // Сборник тезисов докладов. Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века». М.: ЦИАМ, 2015. С. 706.
- [3] Курносков А.О., Соколов И.И., Мельников Д.А. Композиционные материалы на основе термореактивных связующих и стеклянных наполнителей для изделий авиационной техники // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения. М.: ВИАМ, 2017. С. 102–115.
- [4] Гуняева А.Г., Курносков А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) / Труды ВИАМ : электрон. науч.-техн. журн. 2021. №1 (95). С. 43–53.

Технология бесконтактных частотных испытаний композитных элементов силовых установок и винтомоторных групп воздушных судов

А.В. Смотров, С.А. Смотров, М.Ю. Зайцев, А.Ю. Юрьев
ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

На основе многолетнего опыта выполнения бесконтактных частотных испытаний специалистами ЦАГИ была разработана промышленная базовая технология. Применение технологии возможно как в лабораторных условиях (голографическая интерферометрия), так при проведении частотных испытаний на авиационных заводах, в ангарах и испытательных залах (лазерная доплеровская виброметрия). Даны примеры определения основных динамических характеристик малогабаритных, легких и имеющих сложную форму авиационных конструкций. Результаты, зарегистрированные бесконтактно, позволяют точнее верифицировать расчетные модели и доводить физические модели до требуемых параметров подобия.

Noncontact ground vibration test technology for composite elements of propulsion systems and engine-propeller units of aircrafts

A.V. Smotrov, S.A. Smotrova, M.V. Zaytsev, A.Yu. Yuriev
TsAGI, Zhukovsky, Russia

On the basis of long-term experience of performance fulfillment of noncontact ground vibration tests (GVT) by experts of the TsAGI the new industrial basic technology has been developed. Technology application is possible as in vitro (holographic interferometry), so at carrying out of GVT at aviation factories, in hangars and test halls (laser Doppler vibration measurement). Examples of definition of the basic dynamic characteristics of aviation designs small-sized, lightweight and having the difficult form are produced. The results registered remotely, allow to verify more precisely computational models and to improve up to demanded parameters of similarity physical models.

1. Введение

Термином частотные испытания (ЧИ) в ЦАГИ традиционно обозначают экспериментальные исследования по определению основных динамических характеристик натуральных воздушных судов (ВС), их агрегатов, элементов и моделей, а также образцов конструкционных материалов. ЧИ проводят, как правило, с целью получения доказательного материала для выдачи заключений по безопасности ВС от явлений аэроупругости, выявления уровня динамических нагрузок, проведения вибродиагностики.

При выполнении штатных ЧИ применяется так называемый метод фазового резонанса, при котором используется многоточечное гармоническое возбуждение, поочередное выделение и регистрация собственных тонов колебаний конструкции [1]. Значительно реже используются приемы, базирующиеся на возбуждении и анализе свободных колебаний. Основные динамические характеристики, определяемые в ходе ЧИ, – это спектр собственных частот (в заданном частотном), формы, коэффициенты демпфирования и обобщенные массы собственных

тонов. Главная задача ЧИ – создание частотного паспорта (свидетельства), верификация и коррекция расчетной динамической схемы ВС или его агрегатов, сравнение динамических характеристик натурной конструкции и ее моделей, контроль соответствия характеристик материалов и конструкций заданным требованиям.

2. Основная часть

В ЦАГИ для ЧИ методом фазового резонанса применяются аппаратно-программные комплексы с системой контактных акселерометров и присоединяемых к испытываемой конструкции электродинамических силовозбудителей. В зависимости от места проведения ЧИ и номенклатуры исследуемых объектов используют как передвижные лаборатории, созданные на шасси полуприцепов и автобусов (рис. 1), так и мобильные стенды на базе кейсов-контейнеров. В большинстве случаев применение штатного метода ЧИ совместно с контактными средствами возбуждения и измерения колебаний позволяет достичь поставленных целей.



Рис. 1. Проведение выездных ЧИ авиационного двигателя с использованием передвижной виброизмерительной лаборатории ЦАГИ

Однако существует немалый перечень задач, когда необходимо исследовать малогабаритные, легкие и имеющие сложную форму изделия, а также выполнить измерения в труднодоступных местах (например, при повышенной температуре). Например, применение акселерометра Prodera AC565/II ($m = 2,7$ г) при определении низшей частоты колебаний консольного стержня массой ~ 30 г может привести к ошибке в 17% из-за влияния на результаты измерений его массогабаритных показателей и демпфирующего эффекта от кабельной разводки [2].

Решить указанные проблемы позволяет проведение ЧИ на основе перспективных оптических методов. Специалисты ЦАГИ совместно с сотрудниками ИМАШ РАН с 1995 года выполняли поисковые научные исследования, результатом которых является разработка базовой промышленной технологии ЧИ с бесконтактным возбуждением и съемом информации о характеристиках колебаний.

При лабораторном определении основных динамических характеристик агрегатов ВС, элементов и моделей, имеющих малые размеры, массу и сложную форму, рекомендуется применять методы голографической и спекл-интерферометрии (рис. 2, верхний ряд). В стендовых условиях и при выездных промышленных испытаниях для бесконтактных ЧИ рекомендуется использовать метод лазерной доплеровской виброметрии (рис. 2, нижний ряд).

Отличительной особенностью технологии является созданные технические решения, устраняющие не только паразитное воздействие системы измерений на регистрируемые данные, но и негативное влияние присоединенных к объекту испытаний средств возбуждения колебаний, что особенно актуально при испытаниях нежестких и легких конструкций. Предлагаемый подход отработан в многочисленных экспериментах по определению динамических характеристик таких элементов винтомоторных групп ВС, как натурные и модельные

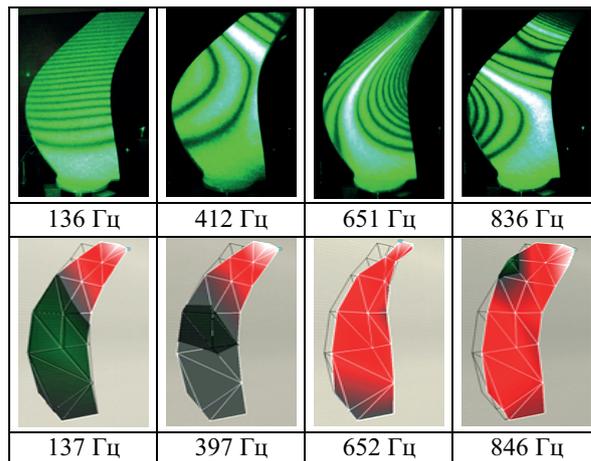


Рис. 2. Сравнение картин четырех низших тонов колебаний модели саблевидной широкохордной лопасти винтовентиляторного двигателя (консольное закрепление)

лопасти винтов. На рис. 3 в качестве иллюстрации приведены некоторые результаты сравнительных ЧИ шарнирно вывешенной модели лопасти несущего винта вертолета из ПКМ – формы и значения частот колебаний в Гц, определенных в экспериментах штатным контактным и новым бесконтактным (рис. на сером фоне) способами и рассчитанных методом конечного элемента в программе CATIA_Analysis.

Технология бесконтактных ЧИ дает возможность испытывать как полноразмерные агрегаты, элементы ВС, так их модели, другие изделия и образцы конструкционных материалов. Причем испытания можно проводить как в условиях стандартной атмосферы, так и при высоких температурах,

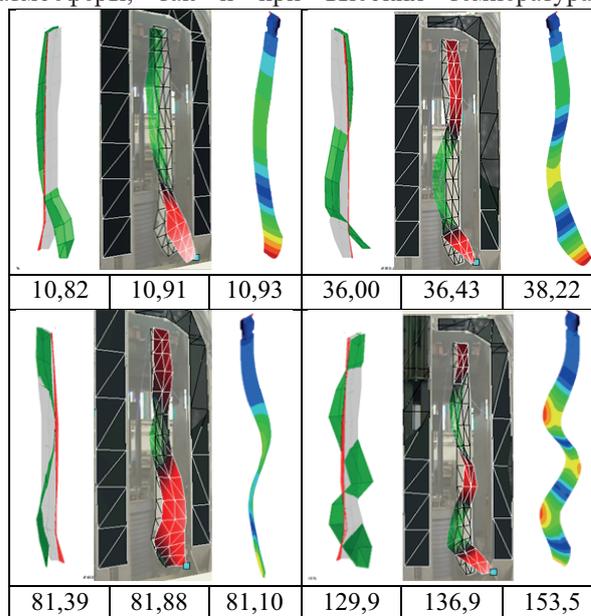


Рис. 3. Сравнение картин четырех низших тонов изгибных колебаний модели лопасти несущего винта вертолета, определенных в экспериментах и при расчете

например, при размещении контролируемого объекта в температурной камере. Тестовые воздействия производятся размещенным в горячей зоне возбудителем, не прикрепляемым к конструкции, а съём информации о характеристиках колебаний выполняется через окно камеры лазерным виброметром. Управление возбуждением – механическое через гермоввод.

На сегодняшний день с применением разработанной технологии бесконтактных ЧИ в лабораторных и стендовых условиях испытаны следующие элементы ЛА: турбинные лопатки, натурные и модельные лопасти винтов вертолетов и самолетов, аэродинамические поверхности моделей ЛА, большой набор образцов перспективных составов ПКМ и другие изделия.

3. Заключение

Разработанная промышленная базовая технология дает возможность определять основные динамические характеристики (формы, частоты и параметры

затухания собственных колебаний) малогабаритных, легких и имеющих сложную форму конструкций как в лабораторных условиях, так и в аэродромных ангарах/заводских цехах. Ключевыми элементами бесконтактной технологии ЧИ являются новые подходы к проведению экспериментов и оригинальные технические решения – запатентованные методы и устройства.

Список использованных источников

- [1] О современных методиках наземных испытаний самолетов в аэроупругости / П.Г. Карклэ, В.А. Малютин, О.С. Мамедов, В.Н. Поповский, В.И. Смыслов, А.В. Смотров 2012. С. 1–34. (Труды ЦАГИ ; вып. 2708).
- [2] Апальков А.А., Одинцев И.Н., Смотров А.В. Определение основных динамических характеристик конструкций с использованием голографической интерферометрии. 2001. С. 162–164. (Труды ЦАГИ.; Вып. 2642).

Неразрушающий контроль образцов ПКМ для авиационных конструкций с использованием лазерно-ультразвуковой измерительной системы

С.А. Смотров, А.В. Смотров, А.Н. Кускова, Ю.В. Мантрова, А.Ю. Юрьев
ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

В ЦАГИ разработана комплексная инновационная технология неразрушающего контроля для обнаружения и количественной оценки ударных повреждений композитных конструкций ВС, в первую очередь, повреждений, малозаметных глазу инспектора, на основе использования ударочувствительного индикаторного полимерного покрытия с оптическими свойствами и лазерно-ультразвуковой измерительной системы. Технология предназначена для целевого применения в авиационной и других отраслях промышленности как импортозамещающая отечественная разработка.

Non-destructive testing of PCM samples for aircraft structures using a laser-ultrasonic measuring system

S.A. Smotrova, A.V. Smotrov, A.N. Kuskova, Ju. V. Mantrova, A. Yu. Yuriev
TsAGI, Zhukovsky, Russia

TsAGI has developed a comprehensive innovative non-destructive testing technology for detecting and quantifying impact damage to composite aircraft structures, primarily damage that is barely noticeable to the inspector's eye, based on the use of an impact-sensitive indicator polymer coating with optical properties and a laser-ultrasonic measuring system. The technology is intended for targeted use in aviation and other industries, as an import-substituting domestic development.

1. Введение

Для обеспечения безопасности полетов воздушных судов (ВС) все полученные повреждения должны быть своевременно диагностированы. Возникновение в авиаконструкциях из полимерных композиционных материалов (ПКМ) ударных повреждений сопровождается расслоением и растрескиванием внутренних слоев с существенным ухудшением прочностных характеристик.

Одним из способов достижения этой цели является прогнозирование и обоснование высокой прочности и живучести изготовленных из ПКМ элементов ВС. Значительное влияние на эти свойства оказывает возможность обнаружения эксплуатационных повреждений ударного характера. Актуальность вопроса обусловлена не только значительным увеличением доли конструктивных элементов ВС из ПКМ, но и существенным отличием физических процессов деформирования и разрушения металлов и ПКМ.

В настоящее время в России и за рубежом общепринятым подходом для обеспечения прочности композитных авиаконструкций по условиям живучести является классификация эксплуатационных повреждений по пяти категориям в зависимости от степени и надежности их обнаружения при

визуальном контроле. Для каждой категории установлены требования по статическим и усталостным нагрузкам, которые должна выдерживать конструкция ВС при эксплуатации вплоть до момента обнаружения повреждения.

Одним из основных критериев прочности конструкций ВС из ПКМ по условиям допускаемых повреждений является минимальный размер малозаметного ударного повреждения (МЗУП) – глубина вмятины (h), возникшей при случайном ударном воздействии, при этом МЗУП должен гарантированно обнаруживаться при стандартных формах технического обслуживания ВС.

Результаты, приведенные в открытых публикациях, а также в отчетах по выполненным в ЦАГИ и ГосНИИГА проектам, позволили установить практический критерий порогового значения обнаруживаемости МЗУП на поверхности ВС из ПКМ ($h_{\text{порог}} = 0,25$ мм) в целом, подтвердить его надежность, а также позволили охарактеризовать влияние на визуальную обнаруживаемость эксплуатационных факторов [1]. Расчеты показали, что МЗУП основных силовых элементов конструкции ВС из ПКМ являются последствиями внешних воздействий с величинами энергии ≤ 30 Дж. Эти вычисления подтверждаются зарубежными статистическими данными.

Прочность авиаконструкции, имеющей МЗУП,

должна быть обеспечена расчетным путем с учетом действующих на конструкцию нагрузок. МЗУП не должны снижать прочность ниже расчетной нагрузки. Для обоснования соответствия конструкции ВС этому требованию необходимо определить порог визуальной контролепригодности, т.е. оценить параметры МЗУП.

В связи с этим, с одной стороны, весьма актуальна задача повышения эффективности визуально-оптического метода контроля путем создания и применения чувствительных к удару покрытий – ударочувствительных полимерных покрытий с оптическими свойствами (УИП) для экспресс-диагностики состояния авиационных конструкций из ПКМ для выявления трудно обнаруживаемых повреждений. УИП, нанесенные на поверхность элементов и агрегатов ВС из ПКМ, помогут быстро, надежно и с малыми затратами выявить механические повреждения и опасные зоны, а их количественную оценку выполнить позднее с использованием инструментальных методов неразрушающего контроля. С другой стороны, необходимо повысить точность, достоверность и информативность инструментальных методов контроля, например, ультразвукового (УЗК). Это позволит провести необходимый ремонт прежде, чем ситуация станет критической.

2. Основная часть

Авторами была разработана комплексная технология неразрушающего контроля для обнаружения и количественной оценки МЗУП элементов авиаконструкций из ПКМ, основанная на использовании разработанных УИП (рис. 1) и действующего макета лазерно-ультразвуковой измерительной системы (ЛУИС) (рис. 2), сочетающей в себе функции измерителя глубины вмятины и дефектоскопа. На сегодняшний день достигнут седьмой уровень готовности технологии (УГТ-7) [2].

Технология включает следующие этапы:

1) выявление с помощью УИП и ультрафиолетового освещения мест расположения МЗУП на поверхности планера ВС во время штатного визуального осмотра;

2) использование ЛУИС для количественной оценки параметров разрушений ПКМ в зонах МЗУП, обнаруженных на предыдущем этапе.

УИП позволяет увеличить вероятность обнаружения мест локализаций МЗУП на поверхности элементов авиаконструкций из ПКМ в диапазоне энергий ударов 20...25 Дж. Причем процедура нанесения УИП является стандартной (аналогична штатной окраске ВС), экономически эффективной и не



Рис. 1. Визуализация ударного повреждения углепластикового образца, окрашенного полиуретановой эмалью, с нанесенным УИП при обычном (а) и ультрафиолетовом (б) облучении



Рис. 2. Действующий макет ЛУИС

требует специальной квалификации обслуживающего персонала [3].

Известно, что прямой визуальный контроль композитных изделий принципиально не позволяет выявить внутренние несплошности, не выходящие на поверхность, истинный размер которых может в разы превышать видимые на поверхности следы. Поэтому для их качественной и количественной оценки используют различные инструментальные методы.

В разработанной технологии применяют программно-аппаратный комплекс ЛУИС, действующий макет которого является совместной разработкой прочнистов ЦАГИ и объединенного коллектива ИПЛИТ РАН и ИОФ РАН (руководитель – профессор А.А. Карабутов), финансируемой в рамках проекта РФФИ № 19-29-13019. Комплекс построен на основе российской элементной базы, алгоритмов и программного обеспечения.

В ЛУИС используется лазерно-ультразвуковой метод генерации зондирующего сигнала вместо электромеханического, применяемого в большинстве промышленных УЗК-дефектоскопов. Мертвая зона ЛУИС не превышает 0,05 мм (аналогичная характеристика обычных УЗК-дефектоскопов 0,7 мм), что дает возможность исследовать вмятины МЗУП. Разрешающая способность ЛУИС: по глубине составляет 0,1 мм, в плоскости $\geq 1,0$ мм. Программно-аппаратный комплекс позволяет как на тонкостенных (1...2 мм), так и на толстых (до 60 мм) композитных изделиях определять внешние и внутренние параметры МЗУП и зарегистрировать картину их

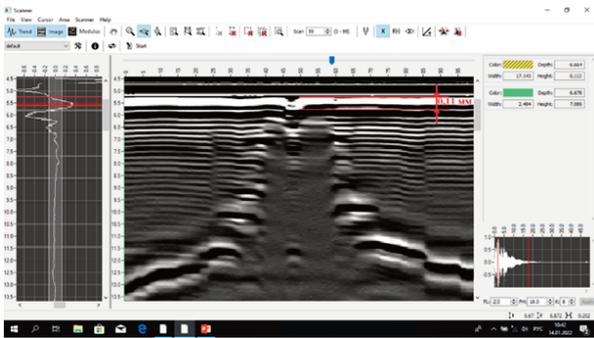


Рис. 3. Пример визуализации пирамиды ударного повреждения с помощью ЛУИС и оценки глубины вмятины в углепластике (0,11 мм)

рельефа (рис. 3).

ЛУИС дает возможность при ручном сканировании оценивать глубины расположения внешних и внутренних несплошностей в ПКМ с характеристикой их типа (вмятина, расслоение, избыток связующего и пр.), при использовании датчика пути определять протяженность несплошностей вдоль оси сканирования. Кроме того, ЛУИС позволяет зафиксировать подповерхностные несплошности, не обнаруживаемые при визуальном контроле из-за релаксации напряжений, в самом ПКМ или многослойном пакете с лакокрасочным покрытием (выравниватель, грунтовка, эмаль).

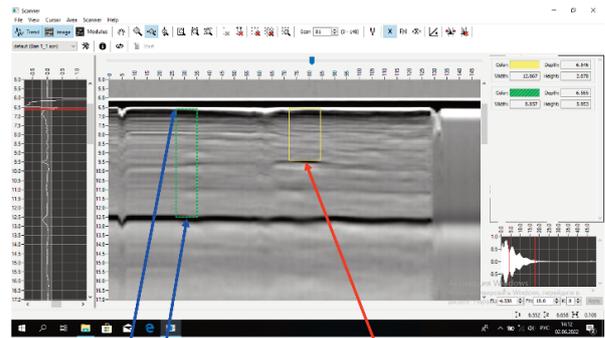
Контроль можно выполнять на плоских и квазиплоских композитных образцах и элементах конструкций ВС как в лабораторных/стендовых, так и в полевых/аэродромных условиях. ЛУИС обладает большим потенциалом для модернизации (дооснащения), например системой планшетного сканирования или роботизированным манипулятором, в этом случае можно будет получать не только развертки (сканы) типа А, В и D, но и развертки типа С – послойные карты несплошностей.

Принимая во внимание важность улучшения эксплуатационных характеристик композитных силовых элементов авиаконструкций, снижения трудоемкости и стоимости работ по их техническому обслуживанию и ремонту, а также с учетом опасности наличия дефектов и повреждений критических мест конструкций, была проведена отработка технологии на элементарных, конструктивно подобных образцах и элементах натуральных авиаконструкций из ПКМ (рис. 4 – рис. 7).

Разработанная комплексная технология позволит быстро и эффективно получать достоверные данные о техническом состоянии элементов авиаконструкций, облегчит техническую поддержку их летной годности и сократит время, затрачиваемое на техническое обслуживание и ремонт, в результате будет способ-



Рис. 4. Металлокомпозитные валы двигателей



Верх и дно композитной части Несплошность (расслоение)

Рис. 5. Пример визуализации внутренней несплошности в композитной части вала



Рис. 6. Образец, вырезанный из регулярной части малогабаритной лопасти тянущего винта из углепластика с пенопластовым наполнителем и подкрепляющим элементом (лонжероном)

ствовать повышению безопасности эксплуатации авиаконструкций из ПКМ.

3. Заключение

Выполненные эксперименты подтверждают большой потенциал локализации и количественной оценки поверхностных и внутренних несплошностей у различных машиностроительных изделий из ПКМ, что возможно с применением разработанной в ЦАГИ

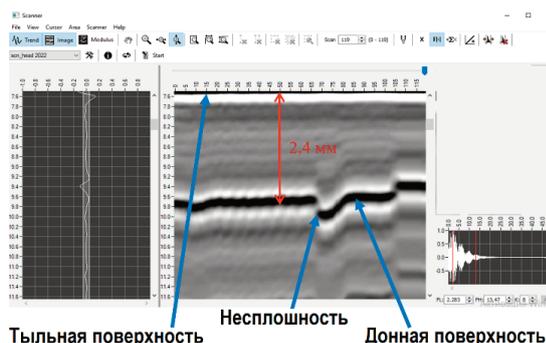


Рис. 7. Пример визуализации внутренней несплошности – технологического дефекта в виде непрочлея (сканирование вдоль лонжерона)

комплексной технологии.

Список использованных источников

[1] Дубинский С.В., Фейгенбаум Ю.М., Сенюк В.Я. Определение критериев прочности по условиям визуальной контролепригодности ударных

повреждений в композитных авиационных конструкциях // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 6. С. 86–99.

[2] Технология обнаружения малозаметных ударных повреждений силовых элементов авиационных конструкций из армированных ПКМ с использованием ударочувствительных полимерных покрытий с оптическими свойствами С.Л. Чернышев, М.Ч. Зиченков, С.А. Смотров, В.М. Новоторцев, А.М. Музафаров. // Конструкции из композиционных материалов. 2018. № 4 (152). С. 48–53.

[3] С.А. Смотров. Отработка технологии обнаружения малозаметных ударных повреждений с помощью чувствительного к ударам индикаторного покрытия на конструкции летательного аппарата из полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 2 (162). С. 14–19.

Опыт производства непрерывных текстилепригодных SiC-нитей и SiC-SiC-материалов в АО «Композит»

Тимофеев П.А., Тимофеев А.Н.
АО «Композит», Королев

В настоящей работе собран накопленный в АО «Композит» опыт разработки и производства керамических карбидокремниевых бескерновых волокон и керамоматричных материалов типа SiC-SiC на их основе. Представлены основные подходы, описан текущий уровень свойств и опыт переработки SiC-нитей. Обсуждаются вопросы интерфазных покрытий и способов формирования керамической SiC-матрицы.

Experience of manufacturing of silicon carbide fiber and SiC-SiC-materials at JSC “Kompozit”

P.A. Timofeev, A.N. Timofeev
JSC “Kompozit”, Korolev, Russia

At present article we have a discussion about experience on manufacturing of silicon carbide non-core fiber and SiC-SiC materials based on it. There are a main methods of production SiC-fibers demonstrated. Also discussion about interface layers and methods of producing SiC-matrix.

1. Введение

Общая тенденция развития двигателестроения сводится к повышению производительности, снижению объемов вредных выбросов, экономии топлива и прочим улучшениям технических характеристик. Решением представленных задач могут быть либо

улучшение конструкции (модернизация) двигательных установок (ДУ), либо замена деталей и узлов, ограничивающих текущую эффективность имеющихся ДУ. В настоящей работе предпринята попытка оценить возможность, перспективность и применимость новых материалов в части материаловедческих изысканий последних лет.

Двигательным установкам авиационной техники характерны достаточно специфические требования. Так, помимо традиционных для всех материалов высокой прочности, низкой плотности, стойкости к атмосферным факторам различных климатических зон и т.д., для авиационных двигателей характерны требования по чрезвычайно высокому ресурсу, стойкости к вибрационным и знакопеременным нагрузкам, стойкости к достаточно высоким температурам в окислительных средах [1]. В частности, лопатки турбин газотурбинных двигателей из керамоматричных композитов на треть легче и выдерживают температуру на 200°C выше, чем аналогичные детали из металлов [2].

Преимущества перехода от металлов к неметаллическим композитам достаточно весомые, чтобы заниматься чрезвычайно сложной и трудоемкой операцией разработки как рецептур и методов изготовления непосредственно композитов, так и переработкой конструкций текущих изделий на применение новых материалов. Как известно, за окислительную стойкость подобных двух- и более компонентных материалов отвечает в основном матрица. В соответствии с этим может возникнуть сомнение в необходимости разработки новых для России керамических SiC-волокон и необходимость направить усилия на улучшение матричных рецептур для использования композиций углеродное волокно – керамическая матрица. Однако такой подход к построению планов не является верным в силу требований к ресурсу и, самое главное, безопасности эксплуатации газотурбинных двигателей гражданского назначения. Причиной этому является склонность к окислению углерода (углеродного волокна) при температуре выше 600°C. При этом керамические SiC-волокна способны сохранять свои свойства в окислительных средах в течение тысяч часов при температуре, в отдельных случаях, до 1400°C.

2. Основная часть

За последние четыре года в АО «Композит» пройден достаточно внушительный путь по созданию как технологий получения самих SiC-нитей, так и композиционных материалов SiC-SiC на их основе. В частности, решены вопросы переработки исходного сырья, поликарбосилана, в полимерные нити, отработаны стадии перевода нити из плавкого в неплавкое состояние, термообработки и замасливания. Как известно, одним из критических требований к керамическим волокнам, определяющим температуру их эксплуатации, жесткость и ресурс является отсутствие (<1%) кислорода в их структуре. Такие

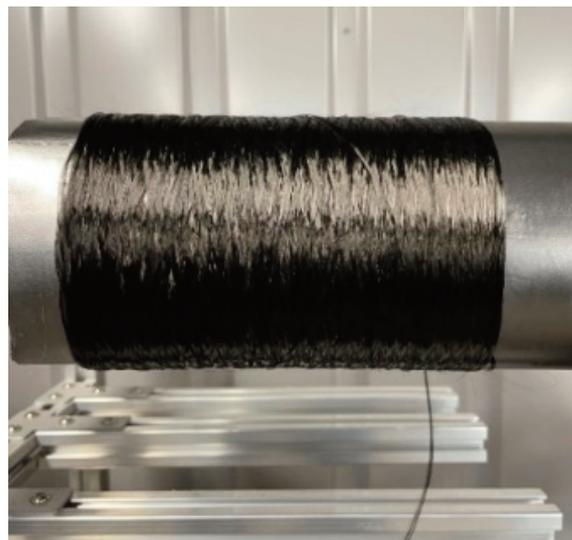


Рис. 1. Нить на катушке

показатели достигаются в мире двумя путями: применением специальных модификаторов исходного сырья (волокна производства компании Ube industries марки Tugano) либо облучением несшитых волокон ускоренными электронами (волокна Hi-Nicalon компании Nippon Carbon/NGS) [3]. По ряду причин в АО «Композит» выбран путь получения бескислородных волокон методом облучения несшитых волокон ионизирующим излучением.

Промежуточным результатом исследований можно считать организацию лабораторного производства керамического волокна по схеме «поликарбосилан (ПКС) – ПКС-волокно, облученное (сшитое) ПКС-волокно – керамическое SiC-волокно». На текущий момент удалось достигнуть следующих характеристик: количество филаментов в нити до 750 (получаются путем сложения нитей, состоящих из 150 или 250 филаментов), предел прочности при растяжении монофиламента до 1,8 ГПа, содержание кислорода до 5%, возможность текстильной переработки, возможность получения отрезков нитей длиной до 50 м (рис. 1).

На сегодняшний день организовано производство как самих нитей, так и 2D-тканей на их основе (рис. 2).

Специально разработанное и изготовленное ткацкое оборудование позволяет перерабатывать керамическую жесткую и, соответственно, хрупкую нить в текстильную форму. Параметры ткани на сегодняшний день: ширина 200 мм, поверхностная плотность 700...750 г/м². При этом снижение прочностных характеристик нитей в процессе переработки не превышает 10%, что является достаточно высоким показателем для керамических материалов.

Из образцов тканей на основе керамических нитей



Рис. 2. Процесс изготовления SiC-ткани

были изготовлены образцы керамоматричных SiC-SiC материалов по схеме «волокно – текстильная преформа – интерфаза нитрида бора – матрица карбида кремния». Благодаря накопленному опыту, формирование интерфазного покрытия нитрида бора происходит в объеме заготовки на каждом волокне с высокой степенью равномерности (перепад толщины покрытия для преформы толщиной 5 мм не более 10% от поверхности в глубину). После ряда исследований целевым показателем толщины интерфазного слоя в зависимости от задач выбран диапазон 100...400 нм. Формирование карбидокремниевой матрицы в рамках данной работы проводилось из газовой фазы с применением достаточно известной технологии пиролиза газового прекурсора (CVI).

После получения конечного продукта – высокоплотных образцов SiC-SiC были проведены испытания на стойкость к термоциклическим нагрузкам двух типов: $20 \leftrightarrow 1200^\circ\text{C}$ и $20 \leftrightarrow 1400^\circ\text{C}$. В испытаниях многократно повторялась следующая схема: нагрев испытываемых образцов газовой горелкой в воздушной атмосфере до заданной

температуры, отвод горелки с соответствующим остыванием образцов до комнатной температуры. При испытаниях до 1200°C образцы так и не были доведены до разрушения, а испытания остановлены при достижении 10 000 циклов. При этом испытания с предельной температурой на поверхности образцов 1400°C привели к разрушению образцов после 3000 циклов. Судя по всему, наличие 4...5% кислорода в структуре волокна приводит к преждевременному разрушению образцов при столь высоких температурах.

3. Заключение

В заключении стоит отметить чрезвычайную важность проводимых исследований не только для авиационной, но и для атомной и ракетно-космической отраслей промышленности. Разработка высококачественных образцов материалов типа SiC-SiC откроет широкие возможности для модернизации передовых изделий науки и техники в указанных отраслях. Текущий уровень развития технологий позволяет начинать проектирование новых типов конструкций особо ответственных узлов, например ГТД из предлагаемых материалов, а одновременно с разработкой улучшенных версий указанных изделий свойства волокон и конечных материалов на их основе за ближайшие 2...3 года должны достигнуть мировых аналогов.

Список использованных источников

- [1] Steibel J. Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation // American Ceramic Society Bulletin. 2019. Vol. 98, no. 3. P. 30–33.
- [2] Michio Takeda. Silicon carbide fiber and its application to ceramic matrix composites. 2018. (Ceramics expo, May 1st, 2018).
- [3] H. Ichikawa, T. Ishikawa. Silicon carbide fibers (Organometallic Pyrolysis) // Comprehensive Composite Materials II. 2018. Vol. 1. P. 127–166.

Моделирование ступенчатого нахлесточного клеевого соединения стержня из ПКМ методом КЭ

В.С. Жернаков¹, П.В. Соловьев¹, С.Н. Никитин²

¹ Уфимский университет науки и технологии, Уфа

² АО «Институт технологии и организации производства» (АО НИИТ) Уфа.

Работы проводили в рамках научного исследования влияния термоциклических нагрузок на прочность клеевого ступенчатого соединения элементов конструкций из ПКМ. Рассмотрены результаты моделирования методом конечных элементов (МКЭ) ступенчатого нахлесточного клеевого соединения балки из полимерного композиционного материала (ПКМ) до и после теплосмен. Показано, что напряженное состояние распределено неравномерно вдоль клеевого шва. Ввиду наибольшей изгибной деформации разрушение клеевого соединения начинается с внешних слоев.

Modeling a stepped lap adhesive bonding of a PCM rod using the FE method

V.S. Zhernakov¹, P.V. Solovyov¹, S.N. Nikitin²

¹ Ufa University of Science and Technology" Ufa, Russia,

² JSC "Institute of Technology and Organization of Production" (JSC NIIT), Ufa, Russia.

The work was carried out within the framework of scientific work on the study of the influence of thermocyclic loads on the strength of the adhesive step connection of structural elements made of PCM. The results of modeling by the finite element method (FEM) of a stepped overlapping adhesive joint of a beam made of polymer composite material (PCM) before and after heat transfer are considered. It is shown that the stress state is distributed unevenly along the adhesive seam. In view of the greatest bending deformation, the destruction of the adhesive joint begins with the outer layers.

1. Введение

Клеевые соединения широко применяются в современном машиностроении. Одним из факторов, влияющих на прочность клеевого соединения – работа в условиях теплосмен. При работе в условиях теплосмен (термоциклирования) из-за разности коэффициента теплового расширения матрицы и армирующей составляющей происходит процесс накопления повреждений и в результате разупрочнение клеевого соединения [1]. Таким образом, одной из актуальных задач является определение упругих и прочностных характеристик изделия из ПКМ в условиях теплосмен. Работа по определению напряженно-деформированного состояния ступенчатого нахлесточного клеевого соединения стержня из ПКМ методом КЭ является этапом научной работы по изучению влияния термоциклических нагрузок на прочность клеевого ступенчатого соединения элементов конструкций из ПКМ.

МКЭ нашел широкое применение в практике проектирования клеевых соединений. Этим методом определяют возникающие максимальные напряжения. Целью расчета является определение напряженно-

деформированного состояния клеевого соединения, также визуализация картины напряжений с учетом снижения прочности после термоциклических нагрузок. Задачей расчета является определение опасных элементов конструкции изделия с клеевыми соединениями и проведение прогнозирования снижения прочностных характеристик по результатам моделирования [1].

2. Ключевая идея

Способом, описанным в [2–4], ранее изготавливали образцы ступенчатого нахлесточного клеевого соединения из стелопластика на основе стеклоткани Т10-14 и связующего ВСТ-1210 (производства ВИАМ). Проведены испытания образцов на теплосмены в диапазоне температур 50...200°С. Общее количество теплосмен (термоциклов) – 700. В ходе всего периода испытаний производились замеры модуля упругости образцов на растяжение при нормальной температуре. До и после теплосмен проводили прочностные испытания образцов. С целью анализа напряженно-деформированного состояния конструкции ступенчатого нахлесточного клеевого соединения балки проведено моделирование МКЭ.

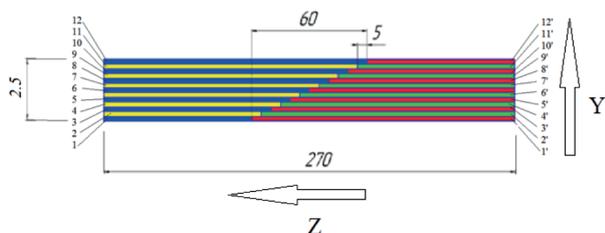


Рис. 1. Схема ступенчатого нахлесточного клеевого соединения пластин из ПКМ

Конечно-элементная модель (КЭМ) с учетом количества слоев и направления их выкладки формировалась с использованием специализированной программы Pre-Post, интегрированной в пакет Ansys Workbench. Модель создавалась последовательной укладкой всех слоев с направлением укладки нити основы – 0° по отношению к действующей силе. Геометрия модели образца соответствовала параметрам его реальной конструкции (рис. 1) [2; 3]. Ввиду малости толщины клеевого слоя, 0,005... 0,008 мм, его свойства отдельно не учитывались.

Шаг сетки 0,5 мм. Количество элементов в модели – 116 472, количество узлов в модели – 843 456. Произвели моделирование упругих, прочностных характеристик ступенчатого нахлесточного клеевого соединения ПКМ на основе стеклоткани Т10-14 и связующего ВСТ-1210 при комнатной температуре до и после теплосмен. Внешний вид клеевого стыка пакета слоев до приложения нагрузки представлен на рис. 2. Модель ступенчатого нахлесточного клеевого соединения состоит из 12 слоев. Длина клеевого шва составляет 60 мм, длина одной ступени в каждом слое – 5 мм. Растягивающая нагрузка прикладывается вдоль образца – вдоль оси z.

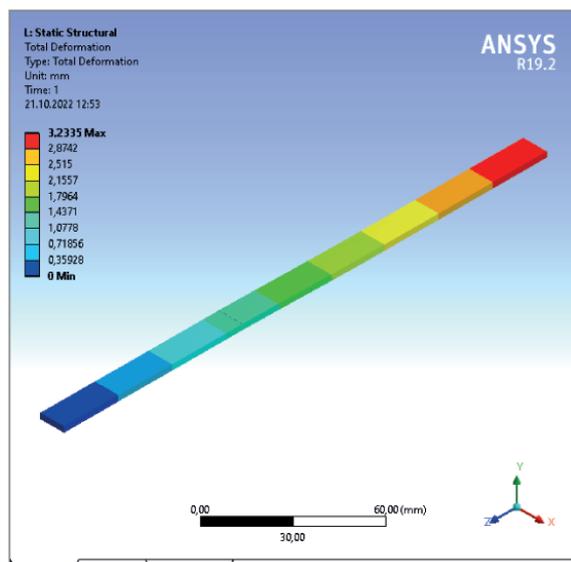


Рис. 2. Картина перемещения образца при разрушающей нагрузке

Таблица. Исходные характеристики ПКМ, граничные условия

Размеры клеевого соединения	
Толщина ПКМ, мм	2,5
Ширина клеевого соединения, мм	11
Общая длина клеевого соединения, мм	60
Длина клеевого соединения слоя, мм	5
Число слоев, мм	12
Структура укладки слоев в образце (по направлению нити основы)	0
Механические характеристики матрицы ВСТ-1210	
Плотность ρ_B , г/см ³	1,21
прочность на растяжение $\bar{\sigma}_M^+$, МПа	70
модуль упругости E_M , МПа	$3,0 \times 10^3$
коэффициент Пуассона ν_M	0,4
коэффициент термического расширения α_M	35×10^{-3} град ⁻¹
предельное удлинение при растяжении $\bar{\epsilon}_M^+$	2,5
Механические характеристики слоя стеклопластика	
коэффициент объемного содержания волокон ψ_B	0,6
плотность ρ_B , г/см ³	1,5
прочность на растяжение вдоль нити основы направления армирования $\bar{\sigma}_1^+$, МПа	618
прочность на растяжение поперек направления армирования $\bar{\sigma}_2^+$, МПа	309
модуль упругости вдоль армирования E_1 , МПа	$33,4 \times 10^3$
модуль упругости поперек армирования E_2 , МПа	$14,7 \times 10^3$
модуль сдвига G_{12} , МПа	5×10^3
коэффициент Пуассона ν_{12} (нагружение в направлении армирования)	0,29
Коэффициенты линейного расширения КМ (вдоль и поперек волокон)	$5,5 \times 10^{-3}$ 12×10^{-6}
Граничные условия	
Напряжение разрушения в сечении (при растягивающая нагрузка 13,2 кН) действующее на образец клеевого МПа соединения в модели МПа	480
Нумерация слоев в математической модели идет снизу вверх вдоль оси y	–
Жесткая заделка (fixed support) без трения по наружной поверхности образца	–

Картина деформационных перемещений (рис. 3) и напряжения получена при действии растягивающей силы в 12 кН. Определены суммарные деформационные перемещения. Деформация растяжения вдоль оси z составила 3,24 мм, деформация изгиба вдоль оси y составила 0,17 мм. Получены и анализируются картины распределения эквивалентных напряжений в композиционном материале послойно. Деформация, представленная на рис. 3, соответствует напряжению

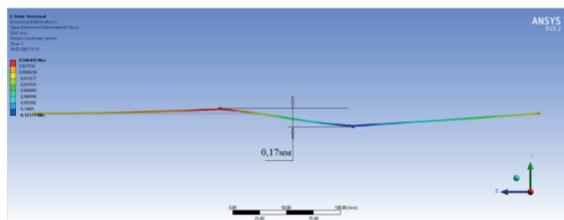


Рис. 3. Поперечная деформация образца (вдоль оси y) под действием растягивающих сил 12 кН

растяжения 480 МПа (разрушения). Продольная деформация образца (рис. 3,а) вдоль оси z – 2,91 мм поперечная деформация (рис. 3,б) вдоль оси y – 0,17 мм. Для визуального эффекта деформация увеличена в 100 раз. Расчет конструкции ступенчатого нахлесточного клевого соединения на данном этапе выполнен без учета температурного воздействия.

В клеювом слое реализуется неоднородное напряженное состояние. Напряжения по толщине пакета слоев и напряжения отдельно в клеювой ступени слоя распределяются неравномерно (рис. 4.). В каждой ступени (длиной 5 мм) касательное напряжение распределено также неравномерно, изменяется от минимального до максимального.

Касательные напряжения в слоях имеют максимальные значения на стыках. На контактную поверхность между волокном и матрицей действует одновременно касательные и нормальные напряжения. Максимальные касательные напряжения находятся вблизи конца нахлестки и имеют тот же порядок, что и нормальные напряжения (по оси y).

Как показано на модели (см. рис. 3), нагрузка приложена с эксцентриситетом и связанный с ним момент вызывает изгиб образца. В связи с этим наибольшие напряжения изгиба возникают на поверхности образца, что ведет к разрушению внешнего слоя (рис. 5,а).

Максимальное нормальное напряжение (изгиба) при разрушающей нагрузке в слое №1-1 достигает 383 МПа. При этом в срединной части пакета (слой

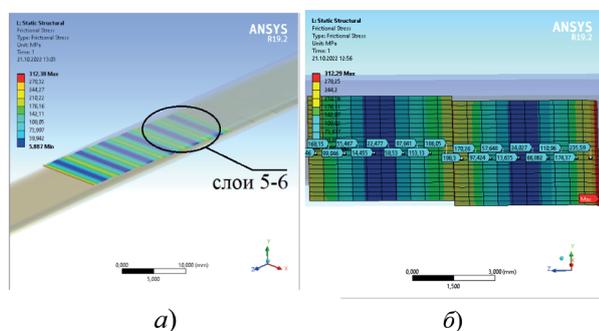
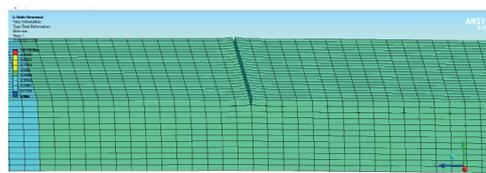
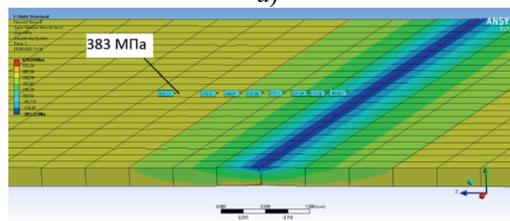


Рис. 4. Распределение касательных напряжений: а – вдоль всего клеювого соединения; б – вдоль стыка слоев 5–6



а)



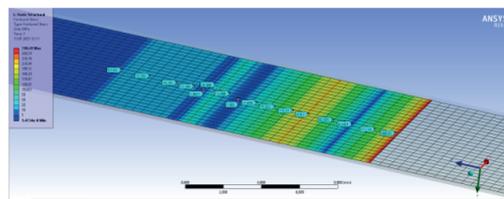
б)

Рис. 5. Деформация слоя № 1-1 при разрушении от растягивающей силы 13,2 кН (а). Нормальные напряжения в слое № 1 (по оси z) – 383 МПа (б)

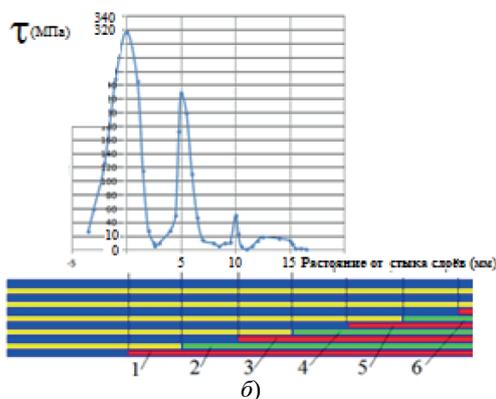
№ 6) клеювого соединения нормальное максимальное напряжение – 225 МПа.

Распределение касательных напряжений вдоль клеювого слоя неравномерно. (рис. 6.) Как видно из расчета, максимальное значение касательного напряжения возникает на стыке внешних слоев № 1-1. Пики максимумов напряжений возникают в местах стыков второго и далее других слоев. При этом пики максимумов касательных напряжений уже не имеют таких значений, как первые слои.

Аналогичная картина распределения касательных напряжений вдоль слоя № 6. С разницей положения максимума касательного напряжения и меньшей



а)



б)

Рис. 6. Распределение касательных напряжений вдоль слоев №1-1 при разрушающей нагрузке до термоциклирования

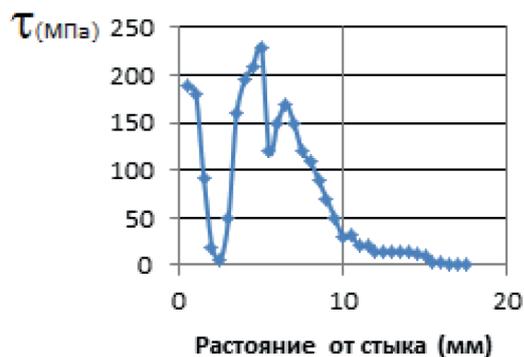


Рис. 7. Распределение касательных напряжений вдоль слоя № 1

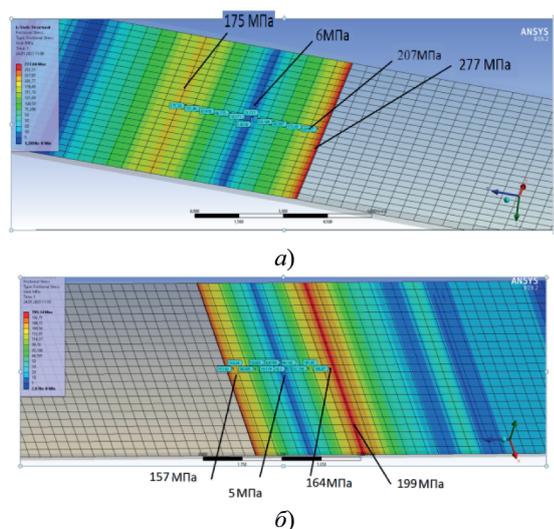


Рис. 8. Модуль упругости образца $E = 32,0$ ГПа, $\sigma_2^+ = 400$ МПа, напряжение в образце при разрушении растягивающей силы 11 000 Н.
 $a - \tau_{\text{макс}} = 277$ МПа в слое № 1, $b - \tau_{\text{макс}} = 199$ МПа в слое № 6

величины, приходится на стык соседнего слоя (рис. 7). Причина снижения максимума разности в том, что действующая нагрузка на образце передается внутренним слоям через наружные слои, т.е. наружные слои более нагружены.

Моделирование с характеристиками после теплосмен ожидаемо показало снижение значений касательных напряжений вдоль слоя.

3. Заключение

Распределение касательных и нормальных напряжений в ступенчатом нахлесточном клеевом

соединении неравномерно как по глубине пакета слоев, так и вдоль слоя. Максимальная неравномерность распределения касательных напряжений в наружном слое составляет до 55 раз, во внутренних слоях – до 45 раз.

Проведенное моделирование позволяет визуализировать места снижения прочности клеевых соединений в конструкции из ПКМ по итогам термоциклирования, выявить зоны концентрации напряжений в слоях, в местах состыковок слоев. Также позволяет прогнозировать в первом приближении усилие разрушения при проектировании изделий, работающих в условиях теплосмен.

Для дальнейшего увеличения точности моделирования необходимо снизить шаг сетки и отдельно учитывать свойства клевого слоя с учетом разрушения и последующего перераспределения напряжений.

4. Список использованных источников

- [1]. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учебное пособие / под общей редакцией Каблова Е.Н. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
- [2]. Прочность клевого соединения при термоциклических нагрузках / В.С. Жернаков, А.Н. Ермоленко, В.Л. Юрьев, С.Н. Никитин // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2020 : сборник тезисов. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2020. С. 546–548.
- [3]. Результаты исследований образцов клеевых соединений, прошедших термоциклические испытания / В.С. Жернаков, А.Н. Ермоленко, И.Г. Каримов, С.Н. Никитин // Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения», Уфа, 23 Марта 2021 г. Тезисы доклада. Уфа, 2021.
- [4]. Способ изготовления рабочего колеса центробежного компрессора из композиционного материала : патент RU 2 652 269 C2 / Никитин С.Н., Ахметов А.М., Юрьев В.Л., Грибановский В.А., Жернаков В.С.; патентообладатель АО НИИТ. Заявка № 2016107247, 29.02.2016 ; опубл. 25.04.2018. Бюл. 12. 16 с.

Влияние межслоевой гибридности, углов укладки на свободные колебания и деформативные характеристики

А.В. Ахмедьянов¹, В.С. Жернаков¹, П.В. Соловьев¹
¹ ФГБОУ ВО «УУНиТ», Уфа

Собственные частоты и формы колебаний, а также жесткость твердых тел являются важнейшими параметрами, учитываемыми при проектировании элементов конструкций в целях учета условий динамического нагружения. В статье приведены результаты вычислений собственных частот первых форм изгибных колебаний композитных пластин, обладающие межслоевой гибридностью. Выявлены зависимости прогибов стержней под действием распределенной нагрузки по поверхности от внутренней структуры. Расчеты были получены численным и приближенным методами. Для численного анализа использовался программное обеспечение основанный на методе конечных элементов (ANSYS).

Influence of interlayer hybridity, laying angles on free vibrations and deformation characteristics

A.V. Akhmedyanov¹, V.S. Zhernakov¹, P.V. Solovyev¹
¹ FSBEI HE "UUST", Ufa, Russia

Natural frequencies and modes of vibration, the rigidity of solids, are the most important parameters taken into account when designing structural elements in order to take into account dynamic loading conditions. The article presents the results of calculating the natural frequencies of the first forms of bending vibrations of composite plates with interlayer hybridity. The dependences of the deflections of the rods under the action of a distributed load over the surface on the internal structure are revealed. The calculations were obtained by numerical and approximate methods. For numerical analysis, software based on the finite element method (ANSYS) was used.

1. Введение

Композиты в силу особенностей своей морфологии предоставляют возможность управления своими вибрационными свойствами (частотами собственных колебаний, например) без дополнительных геометрических изменений детали и установки промежуточных опор, что привело бы к увеличению массы, крайне нежелательному в авиакостроении, а лишь за счет варьирования параметрами структуры укладки многослойных КМ.

Для реализации данного механизма управления свойствами элементов конструкций ЛА из КМ актуальной научной задачей, требующей детальной проработки, является выявление влияния структуры композитных силовых элементов в форме стержней и пластин, а также граничных условий их закрепления на характер изменения их частот собственных колебаний

Следует также отметить, что при поиске структур КМ, удовлетворяющим заданным требованиям по вибрационной устойчивости, важно сохранить жесткость и несущую способность композитной конструкции, установленную на первоначальном этапе проектирования на основе структурно-функционального анализа [1; 2], без существенных

изменений. Все вышесказанное делает поиск рациональной структуры композита комплексной и многофакторной задачей, практическая значимость решения которой не вызывает сомнений.

2. Постановка задачи

Рассматриваются композитные пластины с различной внутренней структурой на двух опорах. Одна из опор шарнирно-неподвижная, а другая шарнирно-подвижная рисунок 1.

Расчет проводился в несколько этапов. Первый этап является расчет прогиба пластины под действием распределенной нагрузки по поверхности. Второй этап

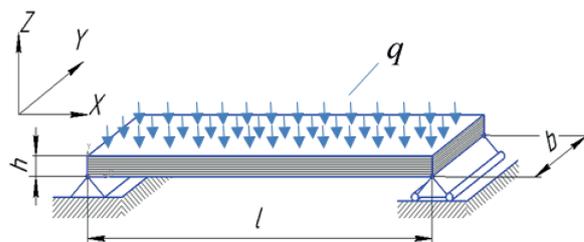


Рис. 1. Схема нагружения и граничных условий

определение ЧСК пластины при заданных опорах без

Таблица 1. Механические свойства однонаправленного слоя при разных коэффициентах армирования ψ

Механические свойства	$\psi = 0,5$	$\psi = 0,6$	$\psi = 0,7$
Плотность, г/см ³	1,5	1,56	1,62
E_1 – модуль упругости вдоль армирования, ГПа	121	139,72	162,29
E_2 – модуль упругости в поперечном направлении, ГПа	8,6	10,75	14,3
E_3 – модуль упругости в перпендикулярном направлении, ГПа	8,6	10,75	14,3
Коэффициент Пуассона γ_{12}	0,27	0,256	0,242
Коэффициент Пуассона γ_{23}	0,34	0,34	0,34
Коэффициент Пуассона γ_{13}	0,27	0,256	0,242
Модуль сдвига G_{12} , ГПа	4,7	7,78	10,26
Модуль сдвига G_{13} , ГПа	4,7	7,78	10,26
Модуль сдвига G_{23} , ГПа	3,1	3,1	3,1

распределенной нагрузки. Третий этап изменение внутренней структуры (угол укладки, коэффициент армирования) композитного стержня и сравнение изменения прогиба и ЧСК при тех же условиях. Для оценки точности численного моделирования в программном комплексе ANSYS WORKBENCH 19.2, был проведен предварительный сравнительный расчет прогиба аналитическим и приближенным методами.

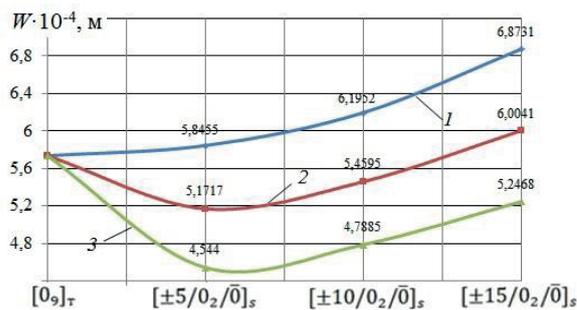
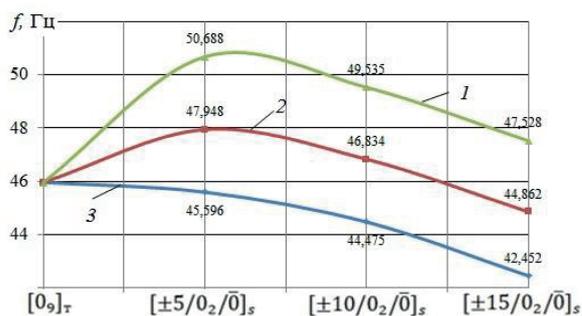
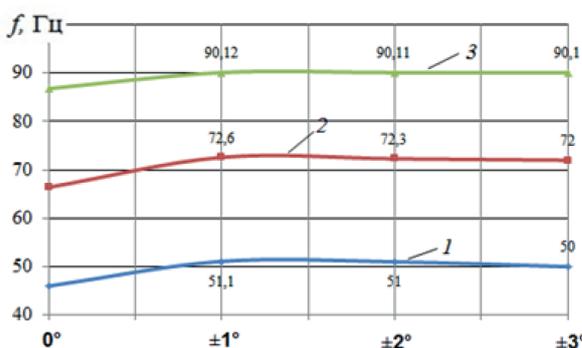
3. Исходные данные

Для расчета выбраны композитные стержни имеющие 9, 13, 17 однонаправленных из углепластика слоев. Геометрические размеры соответственно (1,8×100×400), (2,6×100×400), (3,4×100×400). В таблице 1 представлены упругие характеристики однонаправленного слоя при разных коэффициентах армирования $\psi = 0,5; 0,6; 0,7$.

4. Результаты исследований

На рисунке 2 представлены прогибы девятислойных пластин от действия распределенной нагрузки 100 Па.

1 – пластины с $\psi = 0,5$ во всех слоях и во всех

**Рис. 2.** Прогиб пластин с различной структурой**Рис. 3.** ЧСК пластин с различной структурой**Рис. 4.** ЧСК пластин с различной структурой, армирующей долей и слоев

отклоненных от 0° углов укладки

2 – пластины с $\psi = 0,6$ во всех отклоненных слоях от 0°. Слои уложенные под 0° $\psi = 0,5$

3 – пластины с $\psi = 0,7$ во всех отклоненных слоях от 0°. Слои уложенные под 0° $\psi = 0,5$

Влияние изменения коэффициента армирования на жесткость больше чем влияние первых шагов отклонения углов укладки от нуля.

На рисунке 3 представлены частоты свободных колебаний пластины.

Ниже представлены ЧСК пластин в зависимости от количества слоев и коэффициента армирования.

1 – пластина (9 сл.) с $\psi = 0,7$ во всех отклоненных слоях от 0°. Слои уложенные под 0° $\psi = 0,5$

2 – пластина (13 сл.) с $\psi = 0,7$ во всех отклоненных

слоях от 0° . Слои уложенные под $0^\circ \psi = 0,5$

3 – пластины (17 сл.) с $\psi = 0,7$ во всех отклоненных
слоях от 0° . Слои уложенные под $0^\circ \psi = 0,5$

Анализ результатов показывает, что с увеличением
количество слоев влияние отклонения укладки
уменьшается.

5. Заключение

При необходимости повысить запас вибрационной
устойчивости без изменения геометрии силового
элемента, можно путем введения межслойной
гибридности наружных слоев. При изменении
коэффициента армирования на 0,6 и 0,7 и небольшого
отклонения их углов укладки $\pm 5^\circ$ можно сместить ЧСК
и повысить жесткость конструкции на 4,5% и 10,3%
соответственно.

Список использованных источников

- [1] Соловьев П.В., Первушин Ю.С., Жернаков В.С.
Функциональный анализ морфологии структуры
и напряженного состояния конструкций из
композиционных материалов. Вестник УГАТУ.
Изд. УГАТУ, Уфа – 2019. Т.23, №4 (86). – С. 18–25.
- [2] Соловьев П.В., Первушин Ю.С., Жернаков В.С.
Формирование структуры пера композитной
вентиляторной лопадки ГТД на основе
функционального анализа. Вестник УГАТУ. Изд.
УГАТУ, Уфа – 2020. Т.24, №4 (90). – С. 76–83.

*Примечание: Орфография и пунктуация авторов
сохранены без изменений и дополнений.*

Структурно-функциональный анализ как основа проектирования структуры массоэффективных силовых элементов конструкций из композиционных материалов

П.В. Соловьев¹, Ю.С. Первушин¹, В.С. Жернаков¹, А.В. Ахмедьянов¹
¹ ФГБОУ ВО «УУНиТ», Уфа

В данной работе рассматривается применение структурно-функционального анализа (СФА) в качестве основного инструмента для проектирования структуры силовых элементов конструкций из композиционных материалов. Сформированные в результате СФА структуры обеспечивают удельную несущую способность композитных конструкций, близкую к максимальной. Практическое применение метода продемонстрировано на слоистой композитной пластине, закрепленной консольно и испытывающей сложное нагружение в виде косоугольного изгиба с кручением. Полученная в результате СФА структура пластины превосходит стандартные и подобранные исходя из типовых рекомендаций структуры с точки зрения несущей способности и жесткости.

Structural&functional analysis as a basis for designing the structure of mass-efficient load-bearing elements of constructions made of composite materials

P.V. Solovyev¹, Y.S. Pervushin¹, V.S. Zhernakov¹, A.V. Akhmedyanov¹
¹ FSBEE HE "UUST", Ufa, Russia

In this paper, we consider the use of structural-functional analysis (SFA) as the main tool for designing the structure of load-bearing elements of constructions made of composite materials. The structures formed as a result of SFA provide the specific bearing capacity of composite structures close to the maximum. The practical application of the method is demonstrated on a layered composite plate fixed as a cantilever and subjected to complex loading in the form of an oblique bending with torsion. The resulting plate structure after SFA outperforms typical and standardized structures in terms of load-bearing capacity and stiffness.

1. Введение

Применение композиционных материалов в авиационных конструкциях обусловлено их высокими удельными механическими характеристиками – в первую очередь удельной прочностью и удельной жесткостью, – а также направленной анизотропией механических свойств, что позволяет уменьшить массу конструкции при достижении требуемой несущей способности.

Тем не менее, вопрос выбора структуры композита, включающей в себя количество слоев и их углы укладки, не имеет однозначного ответа из-за геометрического многообразия форм композитных изделий и большого количества сочетаний нагрузок, действующих на них.

Несмотря на имеющиеся на данный момент вычислительные мощности, включая суперкомпьютеры, решение задачи подбора структуры композита методом перебора всех возможных вариантов даже для 10-15-слойного изделия занимает достаточно много времени, наиболее массивные композитные изделия, например, лонжероны лопастей вертолета, включают

в себя более 100 слоев, таким образом делая задачу выполнимой исключительно на квантовых компьютерах следующего поколения.

В связи с этим разработка методики направленного поиска структуры композита в зависимости от его геометрии и характера действующих нагрузок, требующей адекватных временных затрат, является актуальной задачей, обладающей практической значимостью.

2. Методы и материалы

В классической и современной технической литературе, связанной с расчетом и проектированием изделий из композиционных материалов [1–5], имеются рекомендации для выбора структуры изделий конкретных типов (лопатка, пластина, балка и др.), однако при сложном напряженно-деформированном состоянии применимость данных рекомендаций существенно сужается. Суть структурно-функционального анализа заключается в том, чтобы с помощью метода конечных элементов выявить направления главных напряжений в слоях изделия и

произвести выкладку армирующей компоненты с учетом этих направлений.

Первоначальное количество слоев может быть определено исходя из аналитических формул сопротивления материалов без учета слоистости и анизотропии композита либо на основе уже имеющегося прототипа. В дальнейшем количество слоев может быть скорректировано исходя из нагруженности каждого слоя при послойном анализе прочности.

Таким образом, на первом этапе проектирования выкладка слоев осуществляется квазиизотропным материалом, имеющим упругие характеристики, близкие к элементарной композитной ячейке со структурой укладки 0/45/90/-45. Определяются направления главных напряжений в каждом из слоев композита.

Далее производится выкладка слоями уже требуемого ортотропного однонаправленного композита с учетом направлений главных напряжений.

Если основной целевой функцией является максимизация жесткости, то достичь этого можно с помощью выкладки всех слоев в соответствии с направлениями главных напряжений, что было продемонстрировано в работах [6–7].

При выборе наибольшей несущей способности в качестве целевой функции вышеупомянутая структура обычно не дает значимых результатов, требуется другая структура композита, наиболее приближенная к ортотропной [7]. Истинно ортотропную структуру с симметрией физико-механических характеристик слоев относительно срединной поверхности изделия можно получить только для тел с относительно простой геометрией (балки, пластины и т.д.).

После такой выкладки необходимо повторно проверить направления главных напряжений, и, в случае существенного их отклонения от первоначально полученных данных ($\geq 3^\circ$), скорректировать выкладку и вновь оценить результаты. Обычно требуется не более 2–3 итераций для достижения совпадения углов укладки слоев с углами главных напряжений в них в пределах требуемой точности ($< 3^\circ$).

Если на данном этапе выясняется, что минимальный коэффициент запаса прочности в слоях изделия RF_{\min} не попадает в рекомендованный диапазон значений 2,0...3,0, то требуется соответствующая корректировка числа слоев изделия (уменьшение числа слоев при $RF_{\min} \geq 3$ и наоборот) и повтор всех предыдущих шагов.

Последним шагом данного метода является поворот всего слоистого пакета на $\pm 5^\circ$ с повторной оценкой жесткости и несущей способности слоев

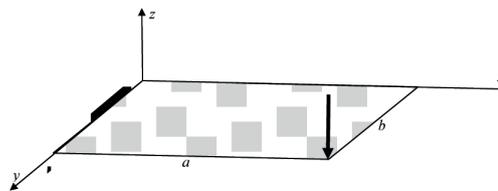


Рис. 1. Схема нагружения пластины

композита. В случае ухудшения НДС принимается решение о том, что искомая структура композита была достигнута. В случае улучшения НДС требуется корректировка углов укладки и повторное проведение предыдущих шагов.

Параллельно производится сравнение результатов напряженного и деформированного состояния полученной структуры с типовыми структурами укладки композита (например 0, 0/90, 0/45/90/-45, 45/0/-45 и др.), а также структурами, полученными исходя из предыдущего опыта проектирования подобных деталей или из имеющихся в технической литературе рекомендаций. Если полученная структура превосходит все остальные, то она окончательно принимается для данного изделия при данных качественных и количественных нагрузках.

Рассмотрим практическое применение структурно-функционального анализа для подбора структуры консольно закрепленной слоистой композитной пластины с габаритами 200×100 мм при косом изгибе с кручением под действием силы $F = 10$ Н, приложенной на свободном углу пластины (рис. 1). Количество слоев пластины – 9. Толщина слоя – 0,15. Материал слоя – углепластик на основе препрега с продольным модулем упругости $E_1 = 121$ ГПа.

Полученная в программном комплексе ANSYS Workbench конечно-элементная модель пластины представлена на рис. 2. Для создания композитной выкладки и анализа результатов применялись модули ANSYS ACP Pre/Post.

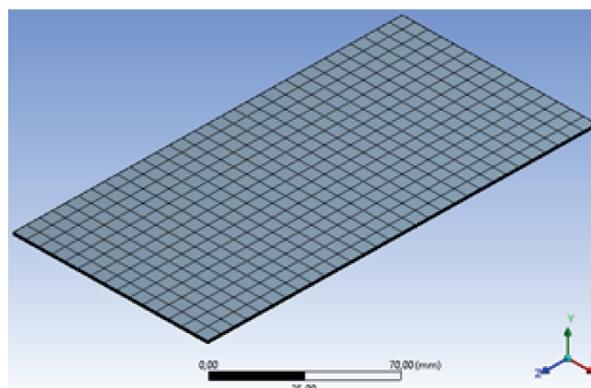


Рис. 2. Конечно-элементная слоистая модель пластины

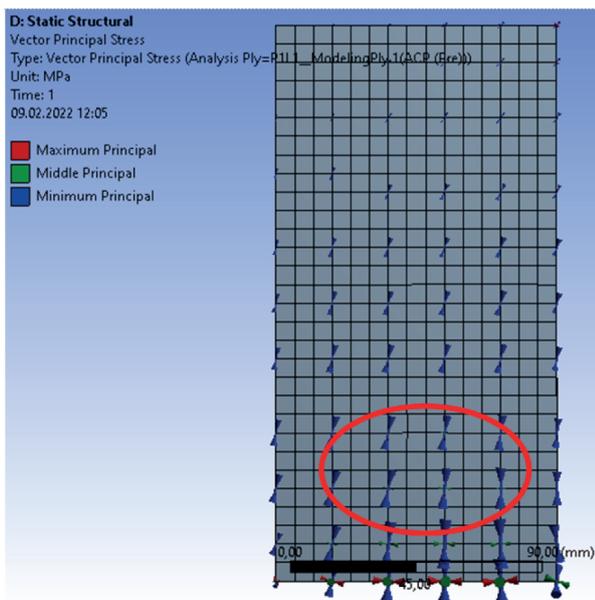


Рис. 3. Направления главных напряжений в 1-м (нижнем) слое пластины

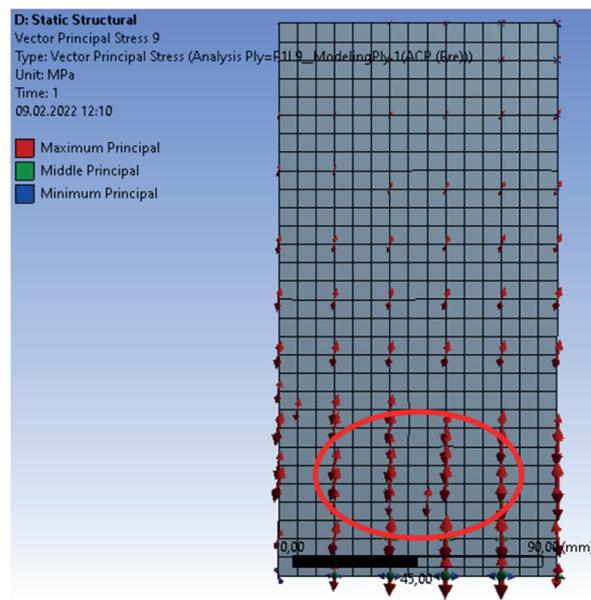


Рис. 5. Направления главных напряжений в 9-м (верхнем) слое пластины

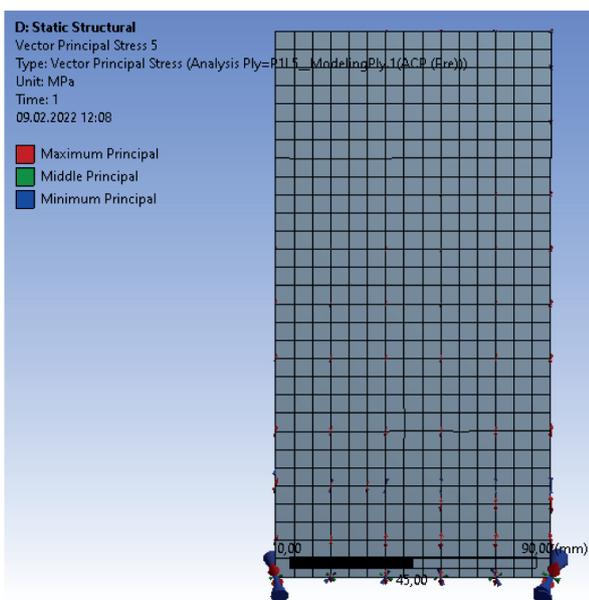


Рис. 4. Направления главных напряжений в 5-м (среднем) слое пластины

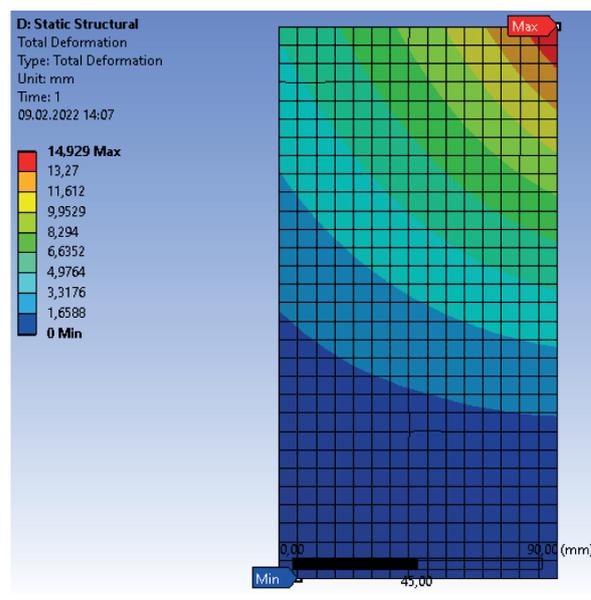


Рис. 6. Картина распределения деформаций пластины при выкладке по главным напряжениям

3. Обсуждение и результаты

На рис. 3 – 5 представлены направления главных напряжений в характерных слоях пластины.

Направления главных напряжений по всем слоям сведены в таблицу 1. Углы отсчитываются относительно продольной оси пластины. Знак «-» обозначает направление по часовой стрелке при взгляде на пластину сверху.

Распределение деформаций и коэффициентов запаса прочности по слоям согласно критерию Ця-

Хилла при выкладке слоев в направлении действия главных напряжений представлены на рис. 6 и рис. 7 соответственно.

В результате всех расчетов согласно вышеуказанной методике СФА была получена ортотропная структура пластины с углами укладки $(-14/14)_2/0/(-14/-14)_2$, которая имеет наивысшую несущую

Таблица 1. Направление главных напряжений в слоях пластины

Номер слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол главных напряжений,	-7	-7	-7	-8	-8	-8	-9	-9	-9

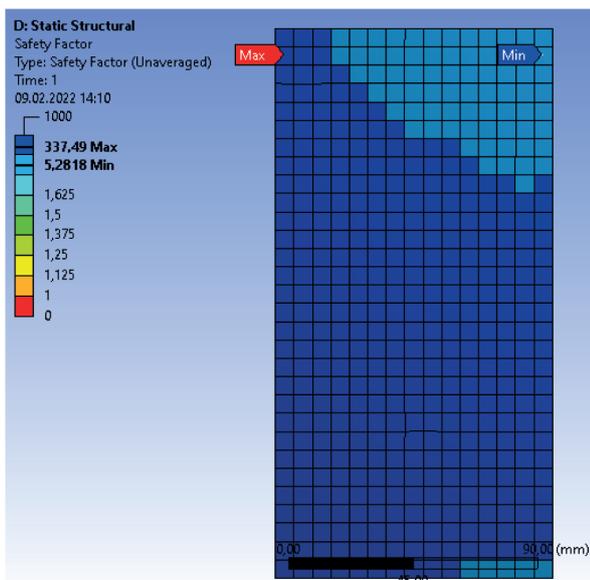


Рис. 7. Картина распределения коэффициентов запаса прочности слоев пластины при выкладке по главным напряжениям

способность по отношению ко всем остальным и на 112% лучше по отношению к однонаправленной структуре (0)₉. С точки зрения жесткости лучшей оказалась структура с выкладкой по главным напряжениям (-7)₃/(-8)₃/(-9)₃, превосшедшую однонаправленную структуру по жесткости на 25%, а выбранную ортотропную структуру на 3%, однако по несущей способности структура с выкладкой по главным напряжениям хуже выбранной ортотропной на 42%.

4. Заключение

Таким образом, структурно-функциональный анализ (СФА) представляет собой упорядоченную методику и инструмент для подбора структуры композитной конструкции в зависимости от ее геометрии и характера действующих нагрузок. Подобранная

структура удовлетворяет выбранным в ходе поиска критериям (максимизация несущей способности, жесткости и др.) и в целом обеспечивает максимально эффективное использование жесткости и несущей способности армирующих волокон композита.

Список использованных источников

- [1] Веселов С.И., Карташов Г.Г. Композиционные материалы в авиадвигателестроении: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1986. – 122 с.
- [2] Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Структурная теория армированных пластиков. Рига, Зинатне, 1978. 192 с.
- [3] Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
- [4] Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с., ил.
- [5] Михайлин, Ю. А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике : учебное пособие / Ю. А. Михайлин. — Санкт-Петербург : НОТ, 2013. — 720 с. — ISBN 978-5-91703-037-1.
- [6] Соловьев П.В., Первушин Ю.С., Жернаков В.С. Функциональный анализ морфологии структуры и напряженного состояния конструкций из композиционных материалов. Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2019. Т.23, №4 (86). – С. 18–25.
- [7] Соловьев П.В., Первушин Ю.С., Жернаков В.С. Формирование структуры пера композитной вентиляторной лопадки ГТД на основе функционального анализа. Вестник УГАТУ. Изд. УГАТУ, Уфа – 2020. Т.24, №4 (90). – С. 76–83.

Примечание: Орфография и пунктуация авторов сохранены без изменений и дополнений.

Содержание

Т.Д. Каримбаев – основоположник работ по композиционным материалам в советском и российском авиадвигателестроении	3
Солнцев С.С., Розененкова В.А., Гаврилов С.В., Денисова В.С. Вклад д.т.н., проф. Т.Д. Каримбаева в разработку керамических композиционных материалов C-SiC на основе керамообразующих полимеров	5
Милейко С.Т. Новые композиты с металлической матрицей	7
Колчин А.А., Петухов И.Д., Малышев В.Ю., Милейко С.Т. Слоистые композиты на основе титана	11
Гальшев С.Н. Влияние сдвиговой прочности между матрицей и волокном на прочность углеалюминиевой проволоки	12
Иванова Ю.С., Виноградов Д.В., Кравченко И.И. Технология обеспечения качества поверхности алюмоматричных композиционных материалов	14
Курьшев И.М., Худякова А.Д., Сапронов Д.В. Программная реализация анализа прогрессирующего разрушения хрупкого композиционного материала.	18
Петухов А.А., Филатов Н.Ю. Система крепления теплозащитной футеровки из высокопористого керамического волокнистого композита к металлической подложке	20
Склезнев А.А., Рыжова Т.М., Кузьмин А.А. Оценка влияния технологических параметров намотки на устойчивость лайнера металлокомпозитного баллона при его изготовлении	23
Николаев А.Л., Пронина М.А., Вербицкий А.Б. Анализ проблем применения деталей из композиционных материалов в конструкции вспомогательного двигателя.	26
Гусев С.А. Применение эпоксидных конструкционных клеев А-77Н и АТ-44К	27
Иванченко А.В., Морозов О.С., Кепман А.В. Высокотемпературные дисперсно-наполненные композиционные материалы с фталонитрильной матрицей	28
Панина К.С., Данилов Е.А., Курганова Ю.А. Углепластики на основе композиции полидиметилсилоксанового каучука и фенолформальдегидной смолы.	31
Афанасьев Д.В. Развитие современных полимерных композиционных материалов и технологий применительно к деталям авиационных двигателей	33
Афанасьев Д.В., Воробьев С.В., Матюхин Д.В. Моделирование эрозионного износа композиционных материалов от воздействия абразивных частиц в проточной части газотурбинных двигателей	37
Пальчиков Д.С., Демчишин А.В. Исследование разброса усталостных свойств в обеспечение требуемого уровня надежности при сертификации деталей из композиционных материалов	42
Мезенцев М.А., Мыктыбеков Б., Пальчиков Д.С., Сеницын А.В., Луппов А.А., Афанасьев Д.В., Воробьев С.В. Разработка перспективных методов экспериментальных исследований конструкционных керамических и композиционных материалов	44
Мыктыбеков Б. Использование закономерностей течения вязких жидкостей в микроканалах для оценки возможности использования пропитки непрерывного углеродного волокна вязкими	

термопластичными связующими	46
Пальчиков Д.С., Богомолова А.Д., Сеницын А.В., Афанасьев Д.В.	
Особенности экспериментальных исследований углепластиков для деталей авиационных двигателей	49
Ахапкина О.С., Габов Д.В., Пахоменков А.В.	
Статические испытания платформы вентилятора из композиционных материалов	51
Королев П.А., Ухов П.А.	
Разработка алгоритма аугментации обучающих данных для систем визуального контроля поверхностных дефектов композиционных материалов с использованием технологии преобразования текста в изображение	53
Курносое А.О., Славин А.В., Гуняева А.Г., Зимнюков И.А.	
Опыт применения стекло- и углепластиков разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигателестроении	55
Смотров А.В., Смотров С.А., Зайцев М.Ю., Юрьев А.Ю.	
Технология бесконтактных частотных испытаний композитных элементов силовых установок и винтомоторных групп воздушных судов	58
Смотров С.А., Смотров А.В., Кускова А.Н, Мантрова Ю.В., Юрьев А.Ю.	
Неразрушающий контроль образцов ПКМ для авиационных конструкций с использованием лазерно- ультразвуковой измерительной системы	61
Тимофеев П.А., Тимофеев А.Н.	
Опыт производства непрерывных текстилепригодных SiC-нитей и SiC-SiC- материалов в АО «Композит»	64
Жернаков В.С., Соловьев П.В., Никитин С.Н.	
Моделирование ступенчатого нахлесточного клеевого соединения стержня из ПКМ методом КЭ	67
Ахмедьянов А.В., Жернаков В.С., Соловьев П.В.	
Влияние межслоевой гибридности, углов укладки на свободные колебания и деформативные характеристики	71
Соловьев П.В., Первущин Ю.С., Жернаков В.С., Ахмедьянов А.В.	
Структурно-функциональный анализ как основа проектирования структуры массоэффективных силовых элементов конструкций из композиционных материалов	74

Contents

Solntsev S.S., Rozenenkova V.A., Gavrilov S.V., Denisova V.S. Contribution of Dr. Sc., prof. T.D. Karimbaev to the development of ceramic composite materials C-SiC based on ceramic-forming polymers	5
Mileiko S.T. Novel metal matrix composites	7
Kolchin A.A., Petukhov I.D., Malyshev V.Yu., Mileiko S.T. Titanium based laminated composites	11
Galyshev S.N. Effect of shear strength between matrix and fiber on the strength of carbon fiber-aluminum matrix wire	12
Ivanova Y.S., Vinogradov D.V., Kravchenko I.I. Technology of surface quality provided of aluminum matrix composite materials	14
Kuryshv I.M., Hudyakova A.D., Sapronov D.V. Software implementation of the analysis of the progressive damage of a fragile composite material	18
Petukhov A.A., Filatov N.Y. The system of fastening a heat-protective lining made of highly porous ceramic fiber composite to a metal substrate	20
Skleznev A.A., Ryzhova T.V., Kuzmin A.A. Evaluation of the influence of technological parameters of winding on the stability of the metal-composite cylinder liner during its manufacture	23
Nikolaev A.L., Pronina M.A., Verbitckii A.B. Analysis of the problems of using parts made of composite materials in the design of an auxiliary engine	26
Gusev S.A. Application of epoxy structural adhesives A-77N and AT-44K	27
Ivanchenko A.V., Morozov O.S., Kepman A.V. High-temperature dispersed-filled composite materials with phthalonitrile matrix	28
Panina K.S., Danilov E.A., Kurganova Yu.A. Carbon plastics based on a composition of polydimethylsiloxane rubber and phenol formaldehyde resin	31
Afanasyev D.V. Development of advanced polymer composite materials and technologies for structures of aviation engines	33
Afanasyev D.V., Vorobev S.V., Matykhin D.V. Modeling of erosive wear of composite materials from the impact of abrasive particles in the flow part of gas turbine engines	37
Palchikov D.S., Demchishin A.V. Research of scatter in fatigue life for providing the required level of reliability in composite structural certification	42
Mezentsev M.A., Myktybekov B., Palchikov D.S., Sinitsyn A.V., Luppov A.A., Afanasyev D.V., Vorobyev S.V. Development of promising methods for experimental studies of structural ceramic and composite materials	44
Myktybekov B. Use of flow patterns of viscous liquids in microchannels to assess the possibility of use for impregnation of continuous carbon fiber with viscous thermoplastic	46
Palchikov D.S., Bogomolova A.D., Sinitsyn A.V., Afanasev D.V. Features of CFRP experimental studies for aircraft engine parts	49
Ahapkina O.S., Gabov D.V., Pahomenkov A.V. Static testing of the composite fan platform	51
Korolev P.A., Ukhov P.A. Development of an algorithm for augmenting training data for systems for visual inspection of surface defects in composite materials using text-to-image conversion technology	53

Kurnosov A.O., Slavin A.V., Gunyaeva A.G., Zimnyukov I.A. Experience in the use of glass and carbon plastics processing NRC «Kurchastovsky institute» – VIAM in engine building	55
Smotrov A.V., Smotrova S.A., Zaytsev M.V., Yuriev A.Yu. Noncontact ground vibration test technology for composit elements of propulsion systems and engine-propeller units of aircrafts	58
Smotrova S.A., Smotrov A.V., Kuskova A.N., Mantrova Ju.V., Yuriev A.Yu. Non-destructive testing of PCM samples for aircraft structures using a laser-ultrasonic measuring system	61
Timofeev P.A., Timofeev A.N. Experience of manufacturing of silicon carbide fiber and SiC-SiC materials at JSC “Kompozit”	64
Zhernakov V.S., Solovyov P.V., Nikitin S.N. Modeling a stepped lap adhesive bonding of a PCM rod using the FE method	67
Akhmedyanov A.V., Zhernakov V.S., Solovyev P.V. Influence of interlayer hybridity, laying angles on free vibrations and deformation characteristics	71
Solovyev P.V., Pervushin Y.S., Zhernakov V.S., Akhmedyanov A.V. Structural&functional analysis as a basis for designing the structure of mass-efficient load-bearing elements of constructions made of composite materials	74

Научное издание

**Межотраслевой семинар
памяти профессора Т.Д. Каримбаева
«Применение композиционных материалов
в двигателестроении»**

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Корректор: Дячук Н.В.
Компьютерное макетирование: Хохлов Д.В.

ЦИАМ им. П.И. Баранова, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2, www.ciam.ru