

На правах рукописи



ОРЛОВ МАКСИМ АНДРЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ НАШИВКИ РОВИНГОМ**

Специальность:

05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Шаталов Роман Львович

Официальные оппоненты: - **Тимофеев Анатолий Николаевич**
доктор технических наук, АО «Композит», первый
заместитель генерального директора.

- **Насонов Федор Андреевич**
кандидат технических наук,
ПАО «Авиационная холдинговая компания «Сухой»,
инженер-технолог 1 категории.

Ведущая организация: - ФГБУН Федеральный Исследовательский центр
химической физики им. Н.Н. Семенова Российской
академии наук

Защита диссертации состоится 01 декабря 2020 года в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mat.i.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/upload/iblock/8c2/Dissertatsiya_Orlov.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Скворцова С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При создании современных газотурбинных двигателей (ГТД) особое внимание уделяется широкому применению полимерных композиционных материалов (ПКМ), массовая доля которых в отдельных элементах и конструкциях турбин растет из года в год.

В целях достижения максимально возможного уровня технического совершенства, снижения времени и затрат на разработки двигателей российскими и иностранными двигателестроительными компаниями постоянно ведутся поиск и отработка новых быстроперенастраиваемых и экономически выгодных технологий для создания ГТД нового поколения. Постоянное совершенствование характеристик ГТД влечет за собой необходимость проведения исследований, разработок и внедрения новых технологий, материалов и конструкторских решений.

Современные технологии изготовления изделий из ПКМ во многом зависят от размеров, структуры и формы предварительной заготовки (преформы), процесс создания которой является одним из самых трудоемких и продолжительных этапов в технологическом звене. Основными способами изготовления преформ являются методы автоматизированной выкладки ленты, ручная выкладка, препреговая технология, плетение и 3D-ткачество. Анализ известных способов изготовления заготовок из ПКМ установил, что они обладают рядом недостатков: дороговизна оборудования, сложность процесса или влияние человеческого фактора на качество преформ. В связи с этим изучение закономерностей влияния методов выкладки ровинга на качество преформ и автоматизация процесса получения полимерных композитных заготовок имеют важное научное и практическое значение. Разработка на их основе научно-обоснованных технических и технологических решений в области ПКМ позволит обеспечить возможность изготовления высокопрочных сложно-профильных деталей и элементов ГТД из ПКМ с повышенными технико-экономическими показателями производства, что актуально.

Целью работы является разработка новой технологии создания качественных полимерных композиционных материалов с применением автоматизированной

нашивки углеродного волокна на водорастворимую подложку для сложно-профильных, высокопрочных элементов газотурбинного двигателя.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Анализ технологий создания ПКМ и определение преимуществ и недостатков технологических и технических решений на качество заготовок и производительность процессов.
2. Исследование влияния технологических параметров изготовления сухих преформ на прочностные характеристики готовых изделий.
3. Определение физико-механических свойств ПКМ и исследование влияния технологических факторов на их изменение, а также разработка рациональных режимов изготовления элементов ГТД из ПКМ.
4. Разработка математических моделей формирования физико-механических свойств и напряженно-деформированного состояния ПКМ от технологических параметров получения преформы нашивкой ровинга.
5. Использование результатов исследований при создании и применении новых технологических и технических решений, обеспечивающих совершенствование технологии, улучшение качества и выхода годных преформ из ПКМ.

Научная новизна:

1. Показано, что при плотности нашивки 50-60 у.е. с шагом 7-10 мм наблюдается повышение энергоемкости структуры углепластика, увеличение прочности на сдвиг до 30%, а ресурса пластичности на 50% по сравнению с прессованными композиционными полимерными изделиями.
2. Разработана математическая модель для расчета нормальных и касательных напряжений слоистого полимерного материала, позволяющая определять распределение напряжений в подложке, контактном слое и по толщине композита.
3. Установлено, что при достижении нашитого пакета толщины 4 мм при шаге прошивки от 4 мм происходит разрушение его внутренних слоев, что обусловлено механическим воздействием иглы на углеродное волокно.

4. Показано, что увеличение содержания арамидного волокна более 5% в общей массе преформы, используемого в качестве армирующего материала в поперечном направлении, приводит к снижению прочности на разрыв до 30%, а не к увеличению сдвиговой прочности, что обусловлено разрушением углеродного волокна.

Теоретическая значимость.

1. Разработаны новые математические модели, позволяющие определять упругие и прочностные свойства и распределение напряжений в заготовках изделий из ПКМ от технологических параметров изготовления преформ автоматизированной нашивкой ровингом.
2. Установлены закономерности влияния определяющих факторов технологии нашивки ровингом на качество заготовок из ПКМ.

Практическая значимость

1. Разработана технологическая схема изготовления объёмно-армированных преформ лопаток ГТД из ПКМ с применением автоматизированной нашивки ровингом, исключая влияние человеческого фактора на качество изделия. Получен патент «Способ изготовления преформ для лопаток компрессора газотурбинного двигателя» (RU 2717228 C1). Лопатки компрессора ГТД на основе преформ, созданных по разработанной технологии, успешно прошли испытания и использованы для изготовления рабочего колеса центробежного компрессора МГТД на ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Применение рациональных технологических параметров позволило существенно (до 50%) увеличить энергию разрушения и сдвиговую прочность (до 30%) нашивных материалов по сравнению с прессованными углепластиками, что подтверждено соответствующим актом.
2. Результаты работ используются в НИР и ОКР, а также на опытном производстве Межотраслевого инжинирингового центра «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено соответствующим актом.

Достоверность результатов. Достоверность научных положений и результатов подтверждается всесторонним анализом литературных источников по выбранной теме, применением современного технологического и аналитического оборудования, корректностью разработанных математических моделей и их

адекватностью, согласованностью полученных теоретических данных с экспериментальными.

На защиту выносятся:

- 1) Технология изготовления элементов ГТД из ПКМ с применением автоматизированной нашивки ровингом на водорастворимую подложку;
- 2) Рациональные технологические параметры создания преформ изделий из ПКМ;
- 3) Математические модели формирования физико-механических свойств ПКМ от технологических параметров получения преформы.

Апробация работы. Диссертационная работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» на основании Соглашения о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 г. №14.574.21.0160 с Министерством образования и науки Российской Федерации по теме: «Разработка лабораторной технологии создания элементов газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов с применением автоматизированной нашивки ровингом». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57417X0160.

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2018» (19–20 февраля 2018г., МПУ, Москва), V и VI Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (2018 и 2019г, НПО «Сатурн», г. Рыбинск, Ярославская область), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (8–10 августа 2018 г, КНИТУ-КАИ им. Туполева, Казань), Международном форуме по композитам «Ключевые тренды в композитах: Наука и технологии» (5-8 декабря 2018г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва) и Международной выставке и конференции JEC World 2019 (12 – 14 марта 2019 года, Париж, Франция).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 научных работ, из них 18 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для кандидатских диссертаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 102 наименований и приложения. Текст изложен на 128 страницах, включает 54 рисунка и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов исследования.

Глава 1. Современные тенденции развития технологических процессов, применимых для изготовления преформ элементов ГТД из ПКМ

В первой главе представлен обзор современного состояния научных и технических подходов по теме работы, включающий анализ применения композиционных материалов в двигателестроении. Приведен анализ существующих способов и современных тенденций изготовления деталей, узлов и сборочных единиц газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов, выявлены их основные преимущества и недостатки. Изучен отечественный и зарубежный опыт использования композиционных материалов при производстве газотурбинных двигателей. Анализом установлено, что перспективными технологиями изготовления предварительных заготовок элементов ГТД являются методы создания объемно-армированных преформ, в том числе TFR-технология.

Глава 2. Материалы и методы

Во второй главе приведены основные методы исследования и использованные материалы, включая методы изготовления образцов и методики проведения экспериментов.

В качестве волокнистых наполнителей при изготовлении преформ автоматизированной нашивкой были выбраны углеродные волокна HTS 45 12K и IMS 65 24K (TohoTenax®, Япония) с диаметром филаментов 7μm и 5μm соответственно и арамидное волокно Русар-С (ООО НПП «Термотекс», г. Мытищи, Россия) линейной плотности 29,4 Текс.

Нашивка всех преформ выполнялась на автоматической вышивальной машине с ЧПУ JCW 0100-500 (ZSK Stickmaschinen GmbH, Германия), управляющая программа для которой разрабатывалась в специализированном программном обеспечении GIS BasePac.

Плоские преформы пропитывались методом вакуумной инфузии при комнатной температуре 23°C и давлении в -1атм в течение 30 мин. Отверждение преформ проводилось при 110 °С в течение 4 ч. Композиция для пропитки материалов состояла из 100 м.ч. эпоксидной смолы Araldite LY-556 («Huntsman», Швейцария), 90 м.ч. отвердителя изо-метилтетрагидрофталевого ангидрида (и-МТГФА) (Triune Chemicals Materials (TCM), Китай) и 0,2 м.ч. ускорителя 2-метилимидазола (ООО «Модификатор», г. Томск, Россия). Полученные пластины разрезали на образцы необходимых размеров для проведения испытаний на изгиб и кручение.

Испытания образцов при трехточечном изгибе в условиях квазистатического нагружения, при четырехточечном изгибе (ГОСТ Р 56805-2015) и методом кручения пластины (ГОСТ 32659-2014) проводились на универсальной испытательной машине Zwick Roell Z100 (Zwick GmbH & Co. KG, Германия). Испытания образцов на ударную вязкость при трехточечном изгибе в условиях низкоскоростного удара проводились в соответствии с ГОСТ Р 56805-2015 и ГОСТ 4647-80 на пружинном копре КПС-2.

Для подтверждения применимости разработанной технологии создания ПКМ были изготовлены лопатки на основе tfr-преформ из углеродного волокна IMS-65 для рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК), состоящего из 5шт силовых колец из углепластика марки ВКУ-38ТР и 20шт лопаток. Преформы лопаток пропитывались высокотемпературным фталонитрильным связующим РН-3М (ИТЕСМА, г. Москва, Россия). Исследование напряженного состояния РКЦК в поле центробежных сил производили на разгонном стенде РС-1Д при нормальной и повышенной температуре.

Глава 3. Определение эффективности метода нашивки преформ

Третья глава посвящена исследованиям эффективности существующих способов создания и оценке показателей качества по сравнению с разработанной

технологией автоматизированной нашивки ровингом (рис. 1), а также количественному анализу технологичности предлагаемого решения.

Сравнение осуществлялось путем определения и анализа основных показателей (облой, отклонение массы и размеров преформ от номинальных значений, трудоемкость) при изготовлении преформ тремя методами:

- послойной выкладкой монослоев тканого материала с прошивкой;
- послойной выкладкой монослоев тканого материала без прошивки;
- автоматизированной нашивкой ровинга, технологическая схема которой представлена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Автоматизированная направленная нашивка углеродного ровинга на водорастворимую подложку:

- 1-катушка с углеродным ровингом,
- 2 – игла с армирующей нитью,
- 3 – водорастворимая подложка,
- 4 – нашиваемый образец преформы

Результаты исследования основных показателей эффективности различных технологий создания преформ из ПКМ представлены в Таблице 1.

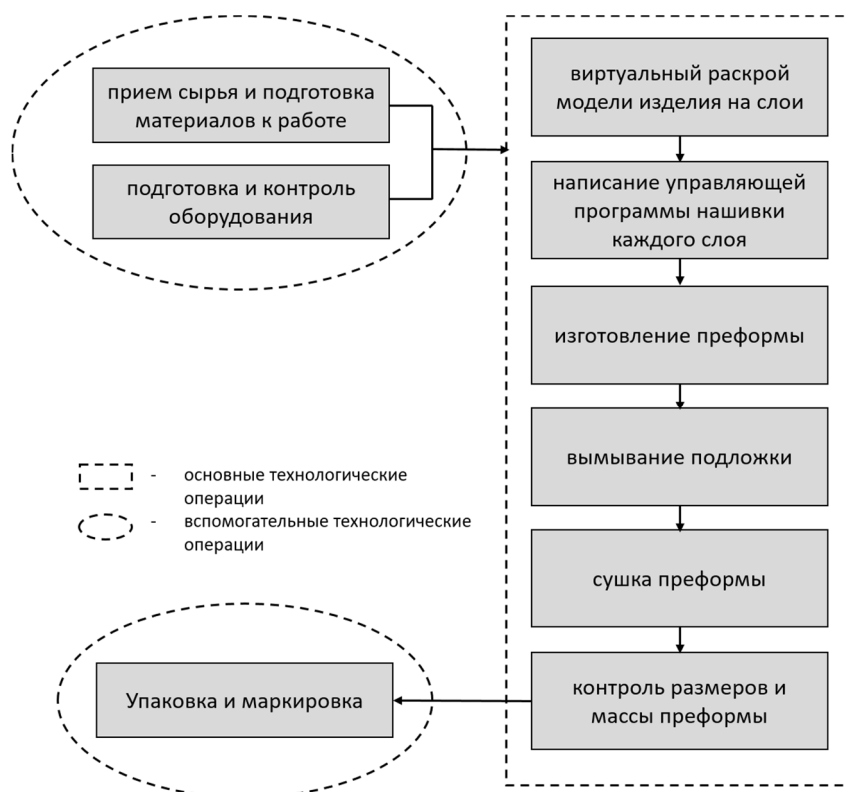


Рисунок 2 – Технологическая схема процесса создания преформ элементов газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов методом нашивки ровинга

Таблица 1. Показатели известных и разработанной технологии создания преформ из ПКМ

Характеристика	Послойная укладка монослоев ткани без прошивки	Послойная укладка монослоев ткани с прошивкой	Нашивка ровинга на подложку
Вид изготовления	Ручной	Ручной	Автоматизированный
Доработка преформ	требуется	требуется	не требуется
Облой (излишки материала)	40%	41,5%	2%
Отклонение массы преформы	8,7%	9%	1,2%
Отклонение размеров преформы	± 2мм	± 2мм	нет отклонений
Трудоемкость	8 ч	10 ч	4 ч

Как видно из таблицы, вышеназванные исследуемые показатели существенно выше у опытных образцов преформ, изготовленных по разрабатываемой технологии

с применением автоматизированной нашивки углеродного волокна, что позволяет говорить о практически безотходном производстве, получении преформ с конечной геометрией готового изделия и изготовлении изделий с идентичными параметрами при их серийном производстве. Также следует отметить существенное уменьшение трудоемкости.

Глава 4. Исследование физико-механических свойств плоских экспериментальных образцов материала для изготовления элементов ГТД из ПКМ

В четвертой главе представлено исследование физико-механических свойств образцов углепластиков на основе преформ, изготовленных с разными технологическими параметрами режимов нашивки (Табл.2), и результаты испытаний.

Таблица 2. Технологические параметры нашивки преформ

№	Параметры режима		№	Параметры режима	
	Плотность укладки ρ , мм/у.е.	Шаг стежка Δ , мм		Плотность укладки ρ , мм/у.е.	Шаг стежка Δ , мм
1	2,35/47	4	11	3/60	4
2	2,35/47	5	12	3/60	5
3	2,35/47	7	13	3/60	7
4	2,35/47	9	14	3/60	9
5	2,35/47	10	15	3/60	10
6	2,85/57	4	16	3,5/70	4
7	2,85/57	5	17	3,5/70	5
8	2,85/57	7	18	3,5/70	7
9	2,85/57	9	19	3,5/70	9
10	2,85/57	10	20	3,5/70	10

Плотность укладки $\rho_{у.е}$ задавалась в программе GIS BasePac 8. Данная величина в программе GIS BasePac не имеет размерности и обозначается через условные единицы (у.е.). 1 у.е.= 0,05 мм.

В ходе проведения исследований определялись прочность при изгибе σ_s и полная энергия разрушения A_{fs} образцов нашивных углепластиков при трехточечном изгибе в условиях квазистатического нагружения, прочность при изгибе σ_d и полная энергия разрушения A_{fd} образцов в условиях низкоскоростного удара. Кроме того, определяли прочность σ и модуль упругости E при четырехточечном изгибе, а также

модуль сдвига G методом кручения пластины.

При испытаниях нашивных образцов на изгиб (как трехточечный, так и четырехточечный) наблюдался смешанный механизм разрушения. Из рисунка 3 видно, что образцы разрушились как от нормальных, так и от касательных напряжений, о чем свидетельствуют трещины, распространившиеся вдоль и поперек углепластиков. По-видимому, образцы разрушаются от нормальных напряжений в большей степени, чем от касательных, поскольку развитие трещин от касательных напряжений тормозится прошивками арамидных волокон. Исследование установило, что плотность и шаг нашивки мало влияют на тип разрушения и носят случайный характер. Для контрольных углепластиков, полученных намоткой ровинга на пластину с дальнейшим прессованием, наблюдался типичный для таких материалов тип разрушения – от нормальных напряжений (рис. 3д)

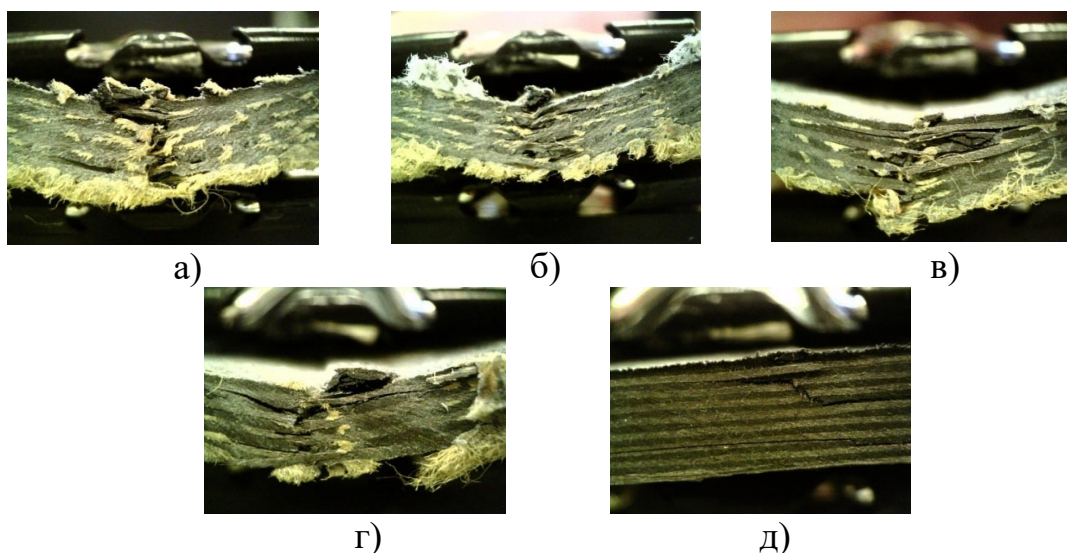


Рисунок 3 – Внешний вид разрушенных образцов нашивных углепластиков, выпиленных из пластины в направлении 0° и испытанных на четырехточечный изгиб. Шаг нашивки углеродного жгута 7 мм, плотность нашивки: а – 47 у.е., б – 57 у.е., в – 60 у.е., г – 70 у.е.

По результатам исследований было выявлено, что свойства нашивных материалов сопоставимы со свойствами прессованных углепластиков с высокоориентированной структурой, прочность на изгиб которых отличается не более, чем на 25%. Однозначной зависимости физико-механических свойств от технологических параметров нашивки обнаружено не было. Однако наиболее энергоёмкая структура нашивного углепластика достигается в диапазоне плотности

нашивки 50 – 60 у.е. и шага прошивки 7-10 мм (уровень энергии контрольного образца показан на рисунке горизонтальной линией, а разброс значений этого параметра – заштрихованной областью). При этом углепластики на основе tfr -преформ обладают более высокими энергией разрушения (рис. 4) и прочностью на сдвиг (до 30%) по сравнению с прессованными. Это связано с наличием арамидных нитей в армирующей структуре, препятствующих движению и развитию трещин. В прессованных углепластике прочность сохраняется при деформации до 0,5мм, а в дальнейшем трещина распространяется рывками, о чем свидетельствуют высокие вторичные пики нагрузки на диаграмме нагружения, представленной на рисунке 5б). У нашивных материалов (рис. 5а) прочность сохраняется при деформации до 1 мм, а колебание нагрузки при росте деформации значительно меньше, трещина распространяется плавно, без существенных скачков.

Результаты исследований позволили разработать рациональные технологические режимы и установить параметры нашивки ровинга, обеспечивающие заданные свойства преформ, которые превосходят качество прессованных композитов.

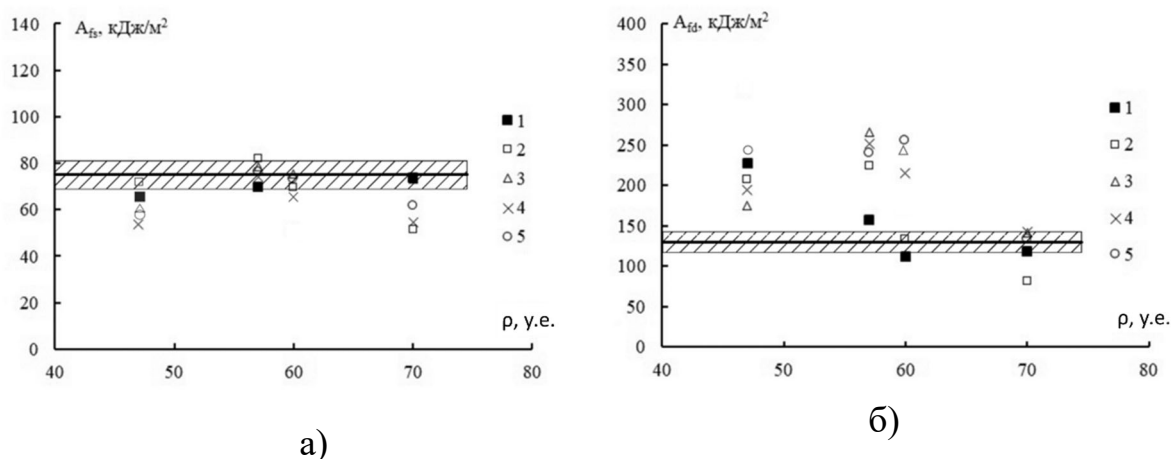


Рисунок 4 – Зависимость энергии A_{fd} разрушения углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при квазистатической (а) и динамической (б) скорости нагружения, от плотности нашивки ρ . Шаг нашивки Δ : 1 – 4 мм, 2 – 5 мм, 3 – 7мм, 4 – 9 мм, 5 – 10 мм

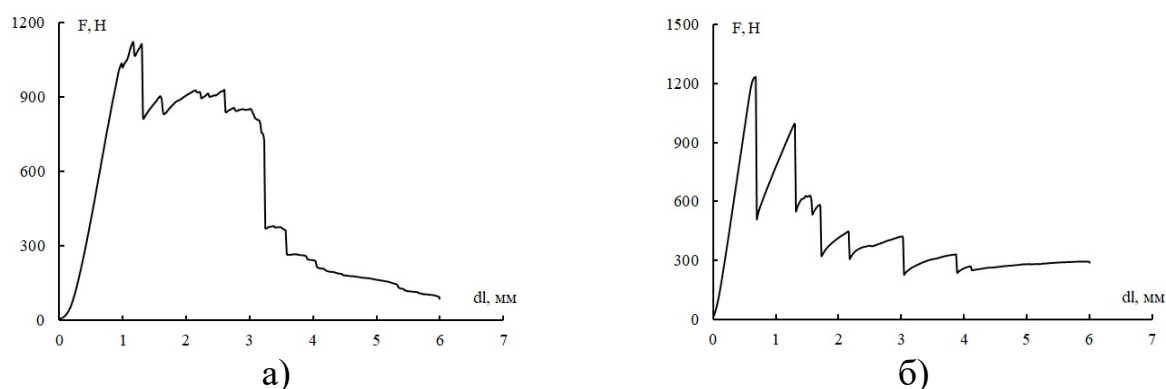


Рисунок 5 – Типичные диаграммы нагружения нашивных (а) и контрольных (б) углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при квазистатической скорости нагружения

В таблице 3 приведены усредненные значения энергий разрушения, прочностей и модулей упругости нашивных углепластиков, полученных в рациональном диапазоне технологических параметров и контрольного углепластика. Видно, что изготовление изделий по TFR-технологии позволяет приблизиться, а по энергии разрушения превысить свойства высокоориентированных прессованных композитов.

Таблица 3. Физико-механические свойства нашивных и прессованных углепластиков

Параметр \ Материал	Нашивной углепластик	Прессованный углепластик
A_{fs} , кДж/м ²	~ 80	75±6
A_{ds} , кДж/м ²	~ 180	126±13
σ_s , МПа	~ 500	714±36
σ_d , МПа	~ 550	731±61
σ_b , МПа	~ 550	738±35
E_b , ГПа	~ 45	79±7
G , ГПа	~ 8	10,0±0,1

Глава 5. Моделирование зависимостей физико-механических свойств изделий из ПКМ от параметров процесса получения преформы

В пятой главе представлены модели и приведены зависимости для расчета упругих и тепло-физических характеристик волокнистых композитов при их продольном, поперечном и продольно-поперечном взаимодействии. Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния слоистого материала с учетом его взаимодействия с подложкой при послойной нашивке ровинга.

По результатам моделирования было выявлено, что расчет физико-механических и теплофизических свойств материалов, получаемых методом автоматизированной нашивки ровинга, можно производить с использованием формул смеси с учетом особенностей формирования композитных структур. Полученные выражения для расчета модуля упругости E , коэффициента Пуассона ν и коэффициента линейного расширения α представлены в таблице 4.

Таблица 4. Зависимости для определения физико-механических свойств нашивных материалов

Характеристика	Продольное взаимодействие	Поперечное взаимодействие	Продольно-поперечное взаимодействие
Модуль упругости	$E = E_g \psi_g + E_m \psi_m$	$E_y = \frac{E_g E_m}{E_g \psi_m + E_m \psi_g}$	при приложении только силы P_2 : $E_x = \psi_1^* \frac{E_m E_g}{E_m (1-\psi) + E_g \psi} + (1-\psi_1^*) \cdot ((E_m \psi) + E_g (1-\psi))$ для равных объемов слоев: $E_x = \frac{1}{2} \left[\frac{E_m E_g}{E_m (1-\psi) + E_g \psi} + (E_m \psi + E_g (1-\psi)) \right]$ при приложении только силы P_1 : $E_y = E_m \psi + E_g (1-\psi)$
Коэффициент Пуассона	$\nu_{xy} = \nu_{xy}^g \psi_g + \nu_{xy}^m \psi_m$	$\nu_{xy} = \frac{\nu_{yx} E_y}{E_x}$	$\nu_{xy} = \frac{\nu_m \psi + \nu_g (1-\psi)}{2} \cdot \frac{E_m E_g + E_y \cdot [E_m (1-\psi) + E_g \psi]}{E_x [E_m (1-\psi) + E_g \psi]}$
Коэффициент линейного расширения	$\alpha = \frac{\alpha_g \psi_g E_g - \alpha_m \psi_m E_g}{\psi_g E_g + E_m \psi_m} + \alpha_m$	$\alpha = \alpha_g \psi_g + \alpha_m \psi_m$	от силы P_1 : $\alpha_1 = \alpha = \frac{E_m \psi \Delta T (\alpha_m - \alpha_g)}{E_m \psi + E_g (1-\psi)} + \alpha_g$ от силы P_2 : $\alpha = \frac{E_1 \Delta T (\alpha_1 - \alpha_2)}{E_1 + E_2} + \alpha_2$

В уравнениях обозначено:

E_g, E_m -модули упругости волокна и матрицы соответственно

ν_g, ν_m -коэффициенты Пуассона волокна и матрицы соответственно

α_g, α_m -коэффициенты линейного расширения волокна и матрицы соответственно

$\psi_m + \psi_g = 1$ -где ψ_m, ψ_g объемные доли матрицы и волокна в теле

$\psi_1^* + \psi_2^* = 1$ -где ψ_1^*, ψ_2^* объемные доли тел 1 и 2 в композите

Особенностью автоматизированной нашивки является то, что игла с нитью

пришивает ровинг сначала к подложке в направлении, перпендикулярном подложке, затем каждый слой к предыдущему. Поэтому нижние наиболее близкие к подложке слои могут сильно уплотняться, а игла, прошивающая i -ый слой при определенных локальных напряжениях будет разрушать цельность волокон в слое. Это приведет к неоднородности свойств по высоте преформы. При моделировании напряженно-деформированного состояния материала с подложкой для расчета возникающих напряжений $\sigma(y)$ в процессе послышной нашивки ровингом рассматривали случай, когда иглы, пробивая верхний слой, не уплотняют остальную толщу, а уплотнение происходит лишь в наращиваемом (укладываемом) слое.

Модуль упругости всей толщи материала $E_{0+1+\dots+j-1}$ выражали через полученные в результате моделирования зависимости:

$$E_{0+1+\dots+j-1} = E \cdot \psi_{1+\dots+j-1} + E_0 \cdot \psi_0 = E_{1+\dots+j-1} \frac{(j-1) \cdot \Delta}{(j-1) \cdot \Delta + d} + \frac{E_0 \cdot d}{(j-1) \cdot \Delta + d} = \\ = \frac{1}{(j-1) \cdot \Delta + d} [E \cdot (j-1) \cdot \Delta + E_0 \cdot d]$$

Из уравнения равновесия и всех преобразований напряжение σ_j рассчитывали по формуле:

$$\sigma_j = -E \varepsilon_c \left(1 - \frac{\Delta \cdot E}{j \cdot E \cdot \Delta + d \cdot E_0} \right);$$

Чтобы найти напряжения σ в толще материала, просуммировали все σ_j от 1 до j :

$$\sigma(y, y_{фр}) = -E \varepsilon_c \left(1 - \ln \frac{E_0 \cdot d + E \cdot y_{фр}}{E_0 \cdot d + E \cdot y} \right);$$

где E, E_0 - модуль упругости наращиваемого материала и подложки соответственно, d - толщина подложки, $y_{фр}$ - текущая высота наращиваемого изделия, y - координата по оси.

Параметры, входящие в установленное для расчета σ выражение, были получены экспериментально: $E_{0,90}=30$ МПа, $E_{-45;+45}=53$ МПа, $E=95$ ГПа, $d=0,25$ мм, $y_{фр}=3,7$ мм, $\varepsilon_c=-0,01$. Результаты расчета представлены графически на рисунке 6. Из рисунка следует, что слои материала, наиболее близкие к подложке, находятся в состоянии сжатия, и наоборот, слои, наиболее отдаленные от подложки, находятся в состоянии растяжения. Сжимающие напряжения, возникающие в толще материала,

затрудняют пропитку преформы связующим. Зоны, в которых образуются растягивающие напряжения, наиболее склонны к появлению трещин и расслоений, если они приближаются к пределу прочности (временному сопротивлению) материала (арамидного или углеродного волокна). Таким образом, если напряжения в преформе наследуются готовым изделием, то эти зоны будут наиболее опасны при нагружении изделия растягивающими силами. Применяемые в технологии создания ПКМ углеродное волокно HTS 45, имеющее предел прочности $\tau_{у.в.} = 4300$ МПа, и арамидное волокно Русар-С с $\tau_{а.в.} = 5500-6500$ МПа, обеспечивают стабильность процесса пропитки и прочность преформ.

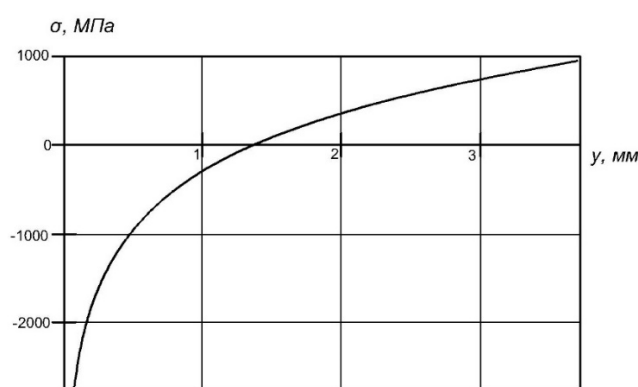


Рисунок 6 – Изменение напряжений $\sigma(y)$ в процессе послойной нашивки ровингом

При расчете напряженно-деформированного состояния слоистого материала с учетом его взаимодействия с подложкой ввели понятие контактного слоя, представляющего собой совокупность прошивных стежков, находящихся между подложкой и слоем материала, и характеризующегося толщиной h^* , модулем Юнга E^* и модулем сдвига G^* . Для расчета касательных и нормальных напряжений применяли формулы равновесия, полных и сдвиговых деформаций, граничных условий непрерывности перемещений, соотношение Коши и закон Гука. После всех необходимых подстановок и преобразований нормальные напряжения в подложке рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{x0}(x) = \frac{\beta}{\omega^2} \left(1 - \frac{ch(\omega x)}{ch(\frac{\omega l}{2})} \right) \quad (1)$$

Нормальные напряжения в первом слое материала рассчитывали по формуле:

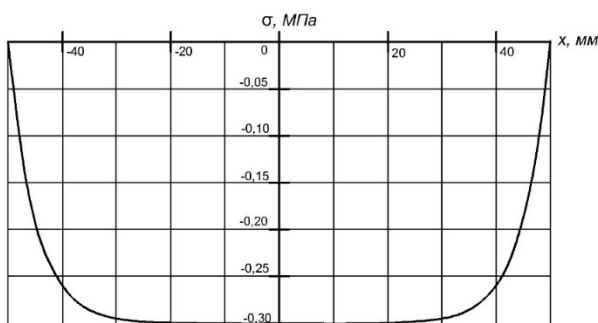
$$\sigma_{x1} = \frac{d}{\Delta} \frac{\beta}{\omega^2} \left(\frac{ch(\omega x)}{ch(\frac{\omega l}{2})} - 1 \right); \quad (2)$$

Касательные напряжения в контактном слое рассчитывали по формуле:

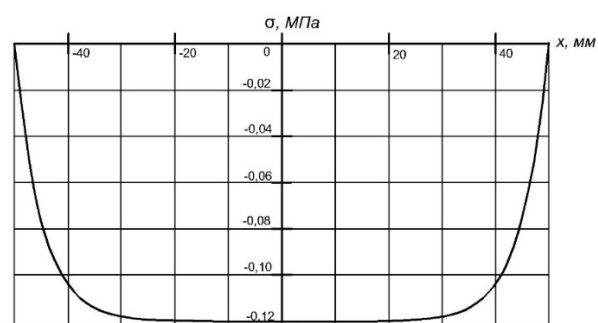
$$\tau = \frac{d\beta}{\omega} \frac{sh(\omega x)}{ch(\frac{\omega l}{2})}; \quad (3)$$

где $\omega^2 = \frac{G^*}{h^*} \left(\frac{1}{E_1 \cdot \Delta} + \frac{1}{dE_0} \right)$ и $\beta = \frac{G^*}{d \cdot h^*} \varepsilon_c$

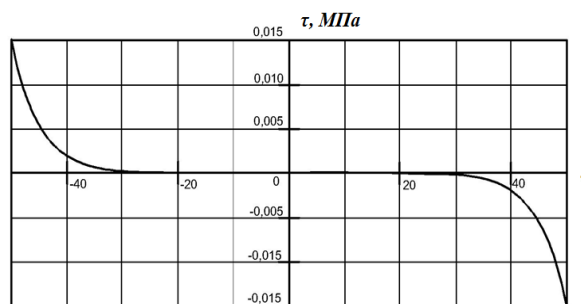
С использованием выражений (1), (2), (3) были построены графики напряжений в подложке, толще материала и контактном слое. Исходные данные для расчета взяты из экспериментальных данных: $E_1=190$ ГПа, $E_0=30$ МПа, $d=0,25$ мм, $\Delta=0,6$ мм, $\varepsilon_c=-0,01$, $G^*/h^*=0,3$ МПа/мм, $l=100$ мм. Как видно из графиков (рис. 7а) и 7б)) нормальные напряжения, возникающие в процессе уплотнения материала, напряжения в материале 1 и подложке 0 оказываются сжимающими в результате уплотнения материала и распределены неоднородно по длине заготовки. Касательные напряжения (рис. 7в)), возникающие на границе подложки и материала распределены неоднородно по длине взаимодействия. Анализ выражений показывает, что с увеличением интенсивности прошивки будет расти величина G^*/h^* , и значение касательных напряжений будет увеличиваться, а область изменения напряжений на краях взаимодействия резко сужаться.



а)



б)



в)

- Рисунок 7 – а) Распределение нормальных напряжений $\sigma_{x0}(x)$ в подложке по длине образца x, б) Распределение нормальных напряжений $\sigma_{x1}(x)$ в первом слое материала,
 в) Распределение касательных напряжений $\tau(x)$ в контактном слое в результате уплотнения материала

Глава 6. Проведение разгонных испытаний рабочего колеса центробежного компрессора малого газотурбинного двигателя

Шестая глава посвящена результатам испытаний рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) диаметром 196 мм и массой 0,52кг, элементы которого были изготовлены из ПКМ по разработанной технологии. Исследования напряженного состояния РКЦК в поле центробежных сил проводили на разгонном стенде РС-1Д при нормальной и повышенной температуре применительно к условиям эксплуатации компрессора ГТД в интервале температур от 20 до 350 °С.

Разгонные испытания РКЦК из КМ на стенде до частоты 11667 об/мин в интервале скоростей от 1000об/мин/мин до 2500об/мин/мин позволили получить зависимость распределения деформаций от частоты оборотов. Аппроксимируя опытные данные, были получены кривые, позволяющие оценивать ресурс пластичности созданного ПКМ. Установлено, что превышение уровня разрушающих деформаций при температуре 20°С наступает при частоте 57210 об/мин, а при повышенной температуре (300°С) разрушение происходит немного раньше – при частоте вращения 56275 об/мин.

Установлено, что при рабочей максимальной частоте 52000 об/мин РКЦК из созданного ПКМ для ГТД не превышает уровень предельных деформаций.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана технология изготовления объёмно-армированных преформ лопаток ГТД из ПКМ с применением автоматизированной нашивки ровингом, обеспечивающая повышение энергии разрушения и прочности на сдвиг, а также исключая влияние человеческого фактора на качество заготовок.
2. На основе результатов экспериментального исследования разработаны рациональные технологические параметры изготовления преформ из ПКМ. Установлено, что плотность укладки ровинга 50-60 у.е. с шагом стежка 7-10 мм обеспечивают наиболее энергоёмкую структуру нашивного углепластика.
3. Установлены закономерности влияния основных факторов укладки и нашивки ровинга на колебания прочности при изгибе от 420 до 690 МПа и модуля упругости от 39 до 47 ГПа. Показано, что свойства нашивных материалов сопоставимы со свойствами прессованных углепластиков с высокоориентированной структурой, прочность на изгиб которых отличается не более, чем на 25%. При этом созданные углепластики по предлагаемой технологии на основе tfr-преформ обладают более высокой (до 50%) энергией разрушения и прочностью на сдвиг (до 30%) по сравнению с прессованными.
4. Разработаны математические модели физико-механических свойств изделий из ПКМ и получены зависимости, позволяющие определить нормальные и касательные напряжения в ПКМ при взаимодействии и прошивке композиционных материалов для оценки прочностных характеристик проектируемого и заданного композита.
5. Выполненный количественный анализ способов изготовления преформ элементов ГТД из ПКМ позволил установить, что предлагаемая технология обеспечит как заданную совокупность показателей физико-механических свойств ПКМ, так и возможность изготовления серий заготовок с идентичными геометрическими, весовыми и прочностными характеристиками при безотходном производстве преформ при автоматизированной нашивке ровингом.
6. Лопатки компрессора ГТД на основе преформ, созданных по разработанной технологии, успешно прошли испытания и использованы для изготовления рабочего колеса центробежного компрессора МГТД на ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

- 1) Orlov, M.A. Effect of technological parameters of production of tfp preforms of gas turbine engine blades on their physical and mechanical properties / Orlov M.A., Kalinnikov A.N., Polikarpova I.A., Bogachev V.V., Kireinov A.V. and Solodilov V.I. // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2020. – Volume 12. – Issue 6. – pp. 1367-1376
- 2) Nelyub, V.A. TFP technology as the advanced method of manufacture of 3d reinforced preforms / Nelyub V.A., Polikarpova I.A., Borodulin A.S., Orlov M.A. and Solodilov V.I. // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2020. – Volume 12. – Issue 6. – pp. 1377-1384
- 3) Orlov, M.A. Modeling of dependencies of operational properties of three-dimensional reinforced products from composite materials on process-dependent parameters of preform production / Orlov M.A., Kalinnikov A.N., Seleznev V.A., Shatalov R.L., Kireinov A.V., Povolokin O.V., Eremenko V.A. // International Journal of Applied Engineering Research. – India. – 2018. – Volume 13. – Issue 22. – pp. 15652-15661
- 4) Михеев, П.В. Влияние прошивки преформы арамидными нитями на сдвиговые характеристики конечного изделия из углепластика / Михеев П.В., Орлов М.А., Шаталов Р.Л., Верхов Е.Ю. // Системные технологии. – 2015. – № 3 (16). – с. 37 – 42
- 5) Михеев, П.В. Использование арамидных волокон для увеличения прочности углепластика при сдвиге вдоль слоев / Михеев П.В., Орлов М.А., Малышев А.Н., Шаталов Р.Л., Верхов Е.Ю. // Известия МГТУ МАМИ. – 2015. – №1 (23). – т.2. – стр.37-40
- 6) Поликарпова, И.А. Особенности разрушения углепластиков, полученных автоматизированной нашивкой ровинга / Поликарпова И.А., Орлов М.А., Кирейнов А.В., Солодилов В.И. // В сборнике: Полимеры 2020 сборник трудов XXI Научной конференции Отдела полимеров и композиционных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук. – 2020. – стр. 70-72.
- 7) Орлов, М.А. Разработка технологии создания предварительных заготовок

элементов газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов методом автоматизированной нашивки углеродного волокна / Орлов М.А., Калинин А. Н., Поликарпова И.А. //Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием: Сборник докладов. – Казань: Изд-во Академии наук РТ. – 2018. – с. 270-275.

8) Орлов, М.А. Разработка технологии изготовления преформ элементов газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов с применением автоматизированной нашивки ровинга / Орлов М.А., Поликарпова И.А. // Высшая школа. Новые технологии науки, техники, педагогики: материалы Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2018». – Москва: Московский Политех, – 2018. – с.256-260.

9) Способ изготовления преформы на основе водорастворимой подложки для лопаток компрессора [Текст]: патент RU 2719171 С1 / Орлов М.А., Поликарпова И.А., Калинин А.Н., Нелюб В. А., Бородулин А.С., Буянов И.А. – № 2018142607; заявл. 04.12.2018; опубл. 17.04.2020, Бюл. №11.

10) Способ изготовления преформ для лопаток компрессора газотурбинного двигателя [Текст]: патент RU 2717228 С1 / Орлов М.А., Поликарпова И.А., Калинин А.Н., Нелюб В. А., Бородулин А.С., Буянов И.А. – № 2018142608; заявл. 04.12.2018; – опубл. 18.03.2020, Бюл. №8

11) Способ изготовления волокнистых заготовок плоской формы [Текст]: патент RU 2718789 С1 / Нелюб В. А., Орлов М. А., Калинин А.Н., Бородулин А. С., Поликарпова И. А., Богачев В. В. – № 2019132234; – заявл. 11.10.2019; – опубл. 14.04.2020, Бюл. №11

12) Способ нашивки объемных преформ [Текст]: патент RU 2722494 С1 / Нелюб В. А., Орлов М. А., Калинин А.Н., Бородулин А. С., Афанасьев Д. В., Жуков Р. А., Поликарпова И. А., Богачев В. В. – № 2019132237; – заявл. 11.10.2019; опубл. 01.06.2020, Бюл. №16.