

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Шаталов Роман Львович

Москва-2020

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Современные тенденции развития технологических процессов, применимых для изготовления преформ элементов ГТД из ПКМ.....	10
Глава 2. Материалы и методы.....	30
2.1 Используемые материалы.....	30
2.2 Изготовление преформ и образцов материалов элементов ГТД из ПКМ.....	32
2.3 Методы испытаний.....	36
2.3.1 Определение количества облоя (излишек материала), номинальной массы и отклонения от формы при изготовлении преформ.....	36
2.3.2 Определение трудоемкости изготовления преформ	37
2.3.2 Определение физико-механических характеристик нашивных углепластиков.....	38
2.3.4. Определение напряженного состояния рабочего колеса центробежного компрессора в поле центробежных сил	44
Глава 3. Определение эффективности метода нашивки преформ	47
Глава 4. Исследование физико-механических свойств плоских экспериментальных образцов материала для изготовления элементов ГТД из ПКМ.....	52
Глава 5. Моделирование зависимостей физико-механических свойств изделий из ПКМ от параметров процесса получения преформы	77
5.1 Определение физико-механических свойств материалов, получаемых методом автоматизированной нашивки ровинга.....	78
5.1.1 Определение упругих и тепло-физических характеристик при продольном взаимодействии двух изотропных тел	78
5.1.2 Определение упругих и тепло-физических характеристик при поперечном взаимодействии двух изотропных тел	81

5.1.3.Определение упругих и тепло-физических характеристик ортотропного тела при продольно- поперечном взаимодействии...	85
5.2 Определение напряженно-деформированного состояния в материале при послойной прошивке нитью.....	88
5.2.1 Исследование напряженно-деформированного состояния в преформе при послойной нашивке ровингом.....	89
5.2.2 Определение напряженно-деформированного состояния слоистого материала с учетом взаимодействия его с подложкой ...	93
Глава 6. Проведение разгонных испытаний рабочего колеса центробежного компрессора малого газотурбинного двигателя	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	109
ПРИЛОЖЕНИЕ	121

Введение

Развитие современного двигателестроения приводит к росту параметров рабочего процесса, снижению массы, совершенствованию конструкции газотурбинных двигателей (ГТД) и улучшению их технологических и эксплуатационных характеристик. В настоящее время наметилась тенденция в замене металлических сплавов, применяемых для изготовления элементов ГТД, на высокопрочные высокомодульные неорганические композиционные материалы (КМ) и полимерные композиционные материалы (ПКМ), в частности, которые позволяют добиться значительного снижения веса изделия и достигнуть значительного технического эффекта, направленного на повышение надежности и ресурса, уменьшение стоимости и трудоемкости изготовления элементов конструкции [1].

К неметаллическим КМ относят спектр конструкционных материалов на основе углерода, полимерных связующих и наполнителей, керамик из карбидов, нитридов, оксидов, которые все вместе могут охватить температурный диапазон применения от температур ниже 0°С до температуры сублимации графита 3300°С. Этот диапазон температур эксплуатации существенно шире, чем у металлов и сплавов. Потенциальные возможности неметаллических КМ по прочности, долговечности и работоспособности в окислительных средах, усталостной прочности подтверждены исследованием их свойств в течение последних 50 лет. К основным преимуществам ПКМ относятся высокая удельная прочность и жёсткость, стойкость к химически агрессивным средам, низкая теплопроводность, что для элементов ГТД является немаловажным фактором ввиду их эксплуатации в условиях действия статических и динамических нагрузок, высоких температур.

Актуальность работы. Постоянное совершенствование характеристик ГТД влечет за собой необходимость проведения исследований, разработок и внедрения новых технологий, материалов и конструкторских решений. 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 быстропереналаживаемых и экономически выгодных технологий для создания ГТД нового поколения.

Современные технологии изготовления изделий из ПКМ во многом зависят от структуры и формы предварительной заготовки (преформы), процесс создания которой является одним из самых трудоемких и продолжительных этапов. Перспективными способами изготовления преформ являются методы автоматизированной выкладки ленты, ручная выкладка, препреговая технология, плетение и 3D-ткачество. Все перечисленные методы обладают рядом недостатков: дороговизна оборудования, сложность процесса или влияние человеческого фактора на качество. Представленная диссертация направлена на разработку технологии создания преформ методом выкладки ровинга. Новая технология устранит недостатки других способов изготовления изделий из ПКМ и обеспечит возможность изготовления высокопрочных сложно-профильных деталей и элементов ГТД из ПКМ с повышенными технико-экономическими показателями производства.

Целью работы является разработка новой технологии создания сложно-профильных, высокопрочных элементов газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов с применением автоматизированной нашивки углеродного волокна на водорастворимую подложку.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить 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 углепластиковыми, 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.

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

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.

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в работе, используются в МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московском политехническом университете, МИЦ «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

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 доложены и обсуждены на международных и всероссийских научных конференциях, семинарах и форумах:

- 1) VI Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство» 15-17 апреля 2019 года, НПО «Сатурн», г. Рыбинск, Ярославская область.
- 2) Международная выставка и конференция JEC World 2019, 12 – 14 марта 2019 года, Париж, Франция.

- 3) Международный форум по композитам «Ключевые тренды в композитах: Наука и технологии», 5-8 декабря 2018г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия.
- 4) Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», 08–10 августа 2018 года, КНИТУ-КАИ им. Туполева, Казань.
- 5) V Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство», 16-18 апреля 2018 года, НПО «Сатурн» г. Рыбинск, Ярославская область.
- 6) Всероссийская научно-практическая конференция «Наука – Общество – Технологии – 2018», 19–20 февраля 2018 года, МПУ, г. Москва, Россия.

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

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

ГТД эксплуатируется при критических частотах вращения роторов, высокой температурной нагруженности отдельных элементов конструкции и значительных перепадах температур в различных климатических зонах. Поэтому к качеству выполнения деталей и сборочных единиц ГТД, от которых напрямую зависит эффективность работы всего двигателя, предъявляют высокие требования [2-3].

Основной тенденцией развития двигателестроения является широкое применение в конструкции узлов ГТД композиционных материалов, что позволяет уменьшить массу конструкции, затраты топлива и уровни эмиссии вредных веществ, повысить надежность и увеличить межремонтный ресурс и, соответственно, сократить прямые эксплуатационные расходы [4-6]. Любое использование КМ в элементах двигателей является скачком в развитии двигателестроения [7-9].

Сложность состава и морфологии КМ, многообразие форм наполнителей, различные технологии изготовления препрегов, преформ и формообразования изделий – все эти факторы оказывают влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства материалов, проявляющиеся на этапах изготовления полуфабрикатов, подготовки их к сборке пакетов, выкладки, формования изделий, механической обработки, хранения и транспортировки [10-12]. Механические свойства КМ определяются типом и составом матрицы, типом и природой армирующего наполнителя и их взаимодействием на разных этапах процесса изготовления изделий. Удовлетворяя предъявляемым техническим требованиям к материалам ГТД, композиционные материалы находят практическое применение в ответственных силовых конструкциях элементов ГТД (корпус, мотогондола, лопасти и др.) [13].

Наибольшее распространение получают КМ на основе углеродных волокон. Применение ПКМ на основе углеродных волокон – один из

способов снижения массы конструкции [14-18]. Снижение массы ГТД за счет использования КМ на основе углеродных волокон позволяет уменьшить габариты двигателя, что приводит к снижению расхода горючего.

Применение ПКМ в конструкциях ГТД позволяет [19]:

- снизить массу отдельных элементов от 10 до 50%,
- повысить долговечность деталей и узлов от 5 до 25%,
- уменьшить или исключить отбор воздуха на охлаждение в отдельных узлах двигателя;
- увеличить экономичность двигателей от 3 до 8%.

В настоящее время во всех современных зарубежных двигателях значительное количество деталей и узлов изготавливается из ПКМ. Это узлы звукопоглощающего контура, силовые оболочки мотогондолы, сопла и узлы реверса, а также элементы вентилятора, включая обшивку, лопасти вентилятора и лопатку спрямляющего аппарата [20].

ПКМ на основе углеродных волокон начали применяться в рабочих лопатках вентиляторов ТРД в конце 60-х годов прошлого века. Фирма Rolls-Royce поставила на двигателе RB-211-22 лопатки вентилятора из углепластика Hufil [21].

Звание общемирового лидера в применении композитов в газотурбинных двигателях прочно закрепилось за фирмой General Electric (США) [22]. В 1995 г. фирмой был создан двигатель GE90 с лопатками вентилятора из углепластика. Это первая в мире и пока единственная рабочая лопатка вентилятора из углепластика серийного турбореактивного двигателя, успешно эксплуатируемого на различных типах самолетов гражданской авиации. Аналогичная конструкция лопатки применена фирмой и для нового семейства двигателей GEnx. Так, в новом двигателе GEnx входная часть практически полностью выполнена из КМ, в том числе, рабочие лопатки вентилятора, корпус вентилятора, корпус компрессора [23-24].

В настоящее время все ведущие зарубежные двигателестроительные фирмы в своих разработках ориентируются только на ПКМ.

В СССР активные исследования по использованию ПКМ в ГТД проводились в 1970-80-х годах. Ведущими предприятиями и институтами (ЗМКБ "Прогресс", ВИАМ, ЦИАМ, НИАТ и др.) был проведен громадный объём работ по созданию рабочей лопатки вентилятора ТРДД-18 из углепластика, но работа завершилась на этапе доводочных испытаний [25]. После неудачи компании Rolls-Royce работы по внедрению углепластиков в авиадвигатели во многих странах, в том числе в СССР, были остановлены.

Тем не менее, в последнее десятилетие наметилась положительная тенденция [26]. В результате разработок новых двигателей, таких как ПД-14, ПД-35 и ПС-90А, появляется спрос на научные исследования, в том числе и по применению ПКМ в деталях и сборочных единицах ГТД.

Двигатель ПС-90А представляет собой базовую версию, устанавливаемую на Ил-96-300, Ил-96-400, и Ту-204, Ту-214. Из таблицы 1 видно, что все большую долю материалов в летательных аппаратах занимают именно полимерные композиционные материалы.

Таблица 1 – Структура применения конструкционных материалов в пассажирских самолетах

Самолёт	ПКМ	АL-сплавы	Ti-сплавы	Стали	Другие материалы
Boeing 787	50%	20%	15%	10%	5%
Airbus A350 XWB	52%	20%	14%	7%	7%
Ту-204	14%	69%	5%	8%	4%
Ту-204 СМ	29%	49%	10%	5%	7%

В настоящее время большой объём исследований по созданию композитных лопаток был проведен в ФГУП «ЦИАМ им. Баранова» [27-35].

В серийном производстве находятся обтекатель сопла, кожух сопла со звукопоглощающим контуром и задний обтекатель реверсивного устройства авиадвигателя ПС-90А. На этапе внедрения и опытной отработки находятся корпус подвесок и створок, силовой корпус, внешний обтекатель

реверсивного устройства, панель со звукопоглощающим контуром, кожух, обтекатель [36].

На стадии проектирования находятся корпус вентилятора, лопатка спрямляющая, решетка реверсивного устройства, силовая панель. Планируемый выигрыш по массе составит до 63 кг. Суммарное снижение массы двигателя ПС- 90А при использовании композитных деталей составит порядка 123 кг.

Способы изготовления преформ

Выбор технологии создания изделий из ПКМ во многом определяется формой и структурой предварительной заготовки (преформы), представляющей собой необходимое количество слоёв армирующего волокнистого наполнителя или многослойную мультиаксиальную ткань [37]. Возможность применения преформ из тканого наполнителя [38] позволяет уменьшить продолжительность и трудоемкость изготовления детали за счет сокращения цикла выкладки, упростить создание конструкций сложного профиля с криволинейной поверхностью.

На сегодняшний день существуют следующие методы изготовления текстильных преформ: ручная выкладка слоев материала, намотка, плетение, 3D-ткачество, вязание и TFP-технология (Tailored Fiber Placement).

Методом намотки возможно изготовление изделий, имеющих форму тел вращения [39].

Широко используемым способом изготовления преформ конструкций и отдельных деталей двигателей является метод ручной выкладки. Выкладка может осуществляться как из монослоёв сухого тканого наполнителя, так и из тканевых препрегов.

Раскрой монослоёв углеродного наполнителя (сухой ткани, ленты) производится в ручном или в автоматическом режиме [40].

После раскроя происходит сборка слоев преформы и их выкладка в оснастку для дальнейшей пропитки.

Метод ручной выкладки имеет следующие недостатки:

- большое количество облоя (излишек материала) за счет рассыпания ткани и непригодности оставшегося при выкройке материала;
- несоблюдение геометрии при раскрое деталей преформы;
- несоблюдение углов укладки и смещение слоев преформы относительно друг друга при выкладке в оснастку;
- использование клеевого соединения для скрепления слоев преформы между собой, ухудшающее качество будущего изделия;
- трудоемкий и длительный процесс ручного раскроя;
- большую роль играет человеческий фактор.

В настоящее время в области создания элементов ГТД из ПКМ все большее распространение получают объемно-армированные композиты с трёхмерной структурой, создание которых возможно за счет применения объемных текстильных преформ, характеризующихся высокой подвижностью нитей и способностью создавать криволинейные поверхности сложной формы [41-43].

ПКМ на основе объемно-армирующих преформ имеют такие физико-механические характеристики, как высокое сопротивление к расслаиванию, удару и повреждениям, повышенная сдвиговая прочность и прочность вблизи отверстий [44]. Преимуществами изготовления объемно-армирующих преформ являются возможность формирования 3-х и n-направлений армирования; возможность варьирования направлений и углов армирования в процессе создания преформы; получение изделий сложной геометрической формы; сокращение времени производства; применение средств автоматизированного проектирования и изготовления изделий [45, 46].

Так, современными методами получения объемно-армирующих преформ являются плетение, трехмерное ткачество [47-52], вязание и TFR-технология. Изготовление текстильных структур наполнителей методом вязания в двигателестроении не применяется вследствие сильного искривления волокон в процессе вязания. Это негативно сказывается на прочностных характеристиках будущего изделия.

На данный момент плетение и 3D-ткачество уже значительно развиты за рубежом и используются такими компаниями, как General Electric, Aircraft Engines, Rolls Royce, Snecma, Boeing, Airbus, Herzog, 3TEX Inc. и A&P Technology. В отечественном производстве широкого развития эти технологии еще не получили (ввиду отсутствия необходимого современного оборудования или невозможности его приобретения из-за достаточно высокой стоимости) [53, 54].

Преформы для ПКМ, создаваемые радиальным плетением, изготавливают в виде подвижного рукава или многослойной оплетки оправки простой цилиндрической и сложной формы (2D и 2,5D структуры). [55] Корпус плетельных машин раздвигается, что позволяет изготавливать замкнутые контуры [56- 59].

В машинах 2,5D плетения изготовление оболочки осуществляется на шаблонах различных объемных форм, а формообразование достигается изменением сетевых углов получаемой оболочки [60].

Биаксиальное плетение является основным видом радиального плетения, при котором нити располагаются в двух направлениях (Рис. 1а). Современные машины позволяют использовать в процессе плетения дополнительные неподвижные нити и включать их в направлении плетения с помощью крылаток. Получаемые плетеные структуры называются триаксиальными (Рис.1б).

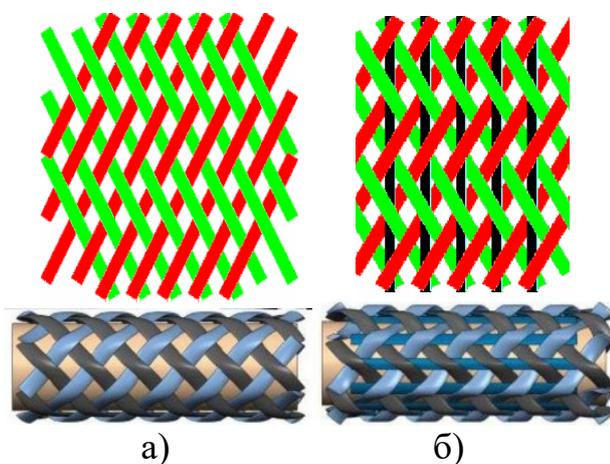


Рисунок 1 – Схема структур получаемых изделий на машинах 2D и 2,5D- плетения соответственно: а) биаксиальная и б) триаксиальная

Современное оборудование позволяет выпускать не только однослойные преформы в виде рукава или ленты, но и многослойные 3D-преформы.

Образование объемной формы происходит за счет введения дополнительных нитей, в результате чего получается трехмерное тканое изделие. В процессе переплетения катушки двигаются по запрограммированной траектории, меняются местами, образуя необходимую форму изделия с 3D-структурой (Рис. 2).

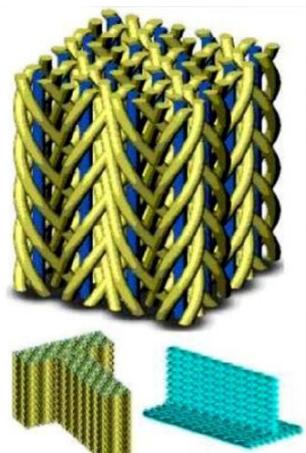


Рисунок 2 – Структура, получаемая 3D-плетением

Преимущества применения плетёных преформ [61]:

- 1) изготовление за одну технологическую операцию изделия с заданной длиной, шириной, толщиной;
- 2) получение изделий различных геометрических форм и стабильных размеров;
- 3) упрощенное создание конструкций сложного профиля;
- 4) автоматизация производства,
- 5) изготовление крупногабаритных изделий.

Область применения плетёных преформ за рубежом уже достаточно широка – иностранные компании освоили этот процесс и активно внедряют его в производство. В авиастроении на основе объемно-армированных преформ изготавливаются элементы силового набора оперения, крыла, фюзеляжа, мотогондолы и лопасти двигателей. Например, компания A&P Technology изготавливает на основе плетеных преформ лопасти

спрямляющего аппарата вентилятора авиадвигателя.

Использование плетеных объемно-армированных преформ позволяет повысить качество изготавливаемых деталей, снизить затраты на производство серийных изделий, существенно сократить трудоемкость за счет высокой степени автоматизации [62].

Основными потребителями плетёных преформ за рубежом являются такие компании-лидеры двигателестроения, как General Electric, Aircraft Engines, Snecma, Boeing, Airbus. [63] Технологии безавтоклавного изготовления ПКМ с использованием плетёных преформ в России только развиваются и широкого применения в настоящее время еще не получили [64].

Таким образом, плетение на сегодняшний день является одним из перспективных направлений развития отечественного двигателестроения при создании изделий из ПКМ.

Создание преформ методом 3D-ткачества позволяет создавать объемную структуру за счет переплетения нескольких наборов нитей основы и утка между собой в трех направлениях X, Y и Z. [65]

Композит, полученный на основе такой преформы, имеет монолитную, взаимосвязанную структуру. Благодаря цельнотканой основе преформы, полностью повторяющей геометрию изделия, ПКМ обладают высокими физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками: практически полное отсутствие расслаивания, повышенная устойчивость к урону, высокая ударопрочность и т.д. [66-72].

К примеру, в авиастроении 3D-тканые преформы могут применяться для изготовления [73, 74]:

- элементов ГТД (роторов, лопастей несущего винта, лопаток);
- Т-секций элементов фюзеляжа ЛА;
- ребер жесткости;
- ведущих краев и разъемов для крыльев самолетов;
- балок различного профиля;

- крышек люков и др.

3D-тканые преформы применения в российском двигателестроении пока не нашли, но разработки в этой области активно ведутся такими компаниями как ВИАМ, ЦИАМ, ОАО «НПО «Сатурн» и др., так как данная технология является достаточно перспективной для изготовления элементов ГТД. Лидирующее положение по производству 3D-тканых лопастей вентилятора в мире занимает компания Safran Group (Франция).

Лопать, выполненная на основе цельнотканой 3D-преформы с последующей пропиткой связующим при помощи RTM-технологии, обладает более высокими механическими свойствами, практически не подвержена расслоению и имеет высокое сопротивление удару при попадании посторонних предметов [75].

Преимущества 3D-ткачества:

- автоматизация процесса создания преформ;
- получение преформ, близких к конечной геометрии;
- проектирование материала с заданными характеристиками во всех направлениях;
- повышенная сдвиговая прочность и отсутствие расслоений;
- повышенная ударостойкость и живучесть готового изделия.

TFR-технология – это автоматизированный процесс производства объемно-армированных конструкций преформ изделий из ПКМ, представляющий собой направленную укладку волокна на несущую основу по заданной траектории. Армирующее волокно (ровинг) фиксируется (пришивается) к основе дополнительной нитью в форме зигзагообразной строчки. Нашивка преформ происходит на промышленных вышивальных машинах с ЧПУ, применяющихся в текстильной отрасли.

Процесс автоматизированной направленной нашивки волокна представлен на рисунке 3.

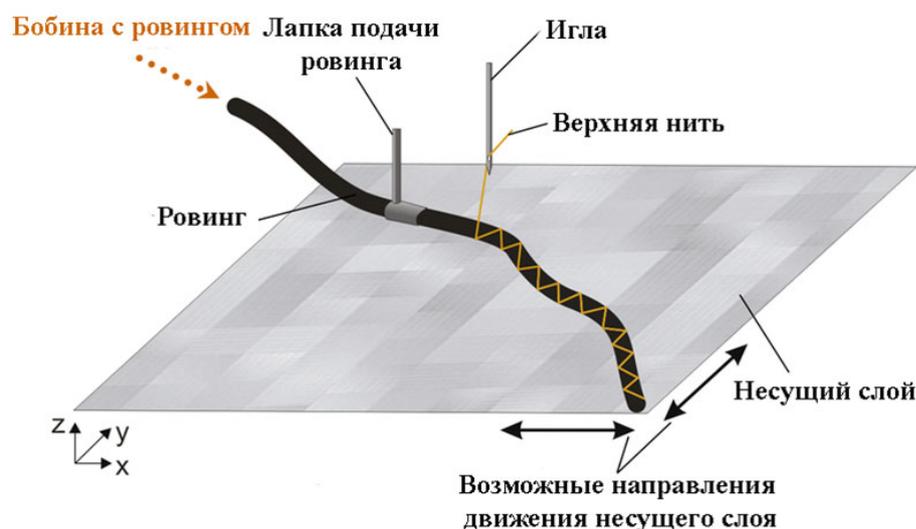


Рисунок 3 – Схематичное изображение процесса изготовления преформы из ПКМ методом TFR

Ровинг (нити утка) послойно укладывается на базовом несущем материале или подложке, перемещаемом в x- и y-направлениях, и фиксируется с двух сторон зигзагообразными строчками нитей основы. В качестве нитей утка могут выступать различные типы волокнистых наполнителей – углеродные, стеклянные и базальтовые волокна, а также их комбинации. Трехмерная структура заготовок достигается за счет введения третьего направления армирования: каждые последующие слои из армирующих волокон скрепляются друг с другом прошивными нитями (полиамидными, арамидными и др.) в процессе создания преформы. Машина автоматически перемещает несущий материал (основу) в соответствии с шаблоном программного обеспечения, разработанным специально для изготавливаемых TFR-преформ. В качестве несущей основы для нашивки ровинга используются тканые армирующие материалы и термопластичные пленки.

TFR-технология позволяет автоматизировать процесс выкладки преформы. Преформа может иметь сложную или простую форму, нашиваться друг на друга в несколько слоев до заданной толщины или ложиться одним слоем, и иметь как одинаковые, так и разные траектории укладки. К достоинствам метода следует отнести укладку волокна согласно векторам распределения нагрузки. Кроме этого, данная технология позволяет

создание зон локального армирования – путем укладки дополнительных волокнистых прядей могут быть сформированы специальные участки усиления (армирования) именно тех зон, которые подвергаются особому действию нагрузки, например, таких как места приложения силы и т.п. TFP-технология также позволяет изготовить интегральный элемент без вспомогательных операций и использовать в полной мере свойство материала. Высокоавтоматизированный процесс производства с использованием нескольких вышивальных головок делает его привлекательным для серийного производства заготовок для передовых композитных деталей [76].

Рассмотрим историю развития и опыт применения TFP-технологии за рубежом (Табл.2).

TFP-технология была разработана в Институте Полимерных Исследований им. Лейбница в г. Дрезден (Leibniz-Institut für Polymerforschung - IPF) в 1990-х годах. Для создания криволинейных преформ изделий сложной конфигурации сначала были созданы преформы, выполненные направленной укладкой ровинга вручную, а затем этот принцип был адаптирован и реализован для промышленных вышивальных машин [77]. После того, как требуемые слои с волокнистыми прядями уложены, законченная волокнистая заготовка помещается в закрываемую форму и пропитывается полимерными термореактивными связующими, а затем отверждается. Пропитка волокнистых заготовок связующим может быть выполнена, например, посредством RTM-технологии в модельной оснастке, сконструированной соответствующим образом.

Таблица 2 – Развитие TFP-технологии за рубежом и в России [78].

Год	История развития и опыт применения TFP-технологии
1992	Инженер Института Полимерных Исследований им. Лейбница в г. Дрезден (Leibniz-Institut für Polymerforschung - IPF) Hosrst Rothe запатентовал TFP-технологию
1994-	Развитие TFP-технологии в IPF

1998	
1998	На базе IPF была создана компания Hightex Verstärkungsstrukturen (Klipphausen, Германия), которая стала заниматься изготовлением TFP-преформ.
1998	Компания FilaCon (Winterlingen, Германия) начала производство вышивальных машин и оборудования для изготовления преформ по TFP-технологии
2001	<p>Hightex совместно с Eurocopter (Донауверт, Германия) начали поставку лонжеронов на основе tfr-преформ в NHIndustries (Aix-en-Provence, Франция) для вертолета NH-90</p> <p>Основные преимущества:</p> <ul style="list-style-type: none"> - малый вес; - колебание масс преформ +/- 0,3%; - диапазон разрушающей нагрузки ниже +/- 1% (по результатам четырехточечного теста на изгиб); - значительное снижение затрат по сравнению с изготовлением лонжеронов из препрегов.
2003-2007	<p>EMIR – проект: Применение TFP-технологии для производства оконных рам с Ω-образным поперечным сечением и Z-рам для фюзеляжа самолета Airbus Hamburg A350XWB. С 2010 года – в серийном производстве.</p> <p>Партнеры: IPF, Airbus, Hightex</p> <p>Финансирование проекта: Федеральное министерство образования и научных исследований Германии (нем. Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF)</p>
2005-2008	<p>BIOTECH-проект: Бионическая оптимизация композитного материала, усиленного армирующими волокнами</p> <p>Партнеры: IPF, Cetex Institute, DaimlerChrysler AG, EADS, Herzog, KIT, SAERTEX, SINTEC, Volkswagen</p>

	<p>Финансирование проекта: BMBF</p> <p>Конструкторы стали применять основы бионики. Разработчики проекта хотели имитировать создание легких конструкций из ПКМ на примере различных структур природы (например, деревья, травы и кости), чьи формы оптимально адаптированы к конкретным нагрузкам. Цель состоит в том, чтобы достичь наилучшей жесткости и прочности путем ориентации волокон в основных направлениях напряжения. Для достижения максимального результата и однородного распределения напряжений с минимальным расходом материала, были разработаны компьютеризированные программы для оптимизации свойств будущего композита.</p> <p>В легких конструкциях из армированных волокном пластмасс необходимо учитывать сильную анизотропию свойств материала. Напряженные адаптивные криволинейные волокна после предварительно рассчитанных траекторий (например, в соответствии с преобладающим направлением нагрузки) приводят к значительному увеличению удельной жесткости и прочности по удельной массе по сравнению со стандартными многоосевыми многослойными ламинированными конструкциями.</p>
2009	<p>На базе IPF была создана компания QPoint Composite GmbH (Дрезден, Германия), которая стала заниматься производством нагревательных инструментов для использования в авиационной промышленности</p>
2009-2010	<p>Centrifugal Force Loaded Rotor Project - Проект центробежного силового нагружения.</p> <p>Партнеры: IPF, Hightex</p> <p>Финансирование проекта: Zentrales Innovations programm Mittelstand (ZIM) - Центральная инновационная программа финансирования научно-исследовательских разработок проектов</p>

	малых и средних предприятий
2010	Компания LayStitch™ Technologies начинает маркетинг TFP-технологии в США
2011-2012	EMBROIDERY-проект: Разработка технологии изготовления tfr-преформ для многоразовой самонагревающейся мембраны для инфузии [79] и интегрированного нагревательного слоя в RTM-установках для более быстрого нагрева/охлаждения и снижения потребления энергии [80] Партнеры: IPF, Avana Industries, GMI AERO, IDEC, IFB, QPoint, REA, Elektronik, Tecnalía, Tajima Финансирование проекта: The 7 th Framework Programme - программа финансирования, созданная Европейским союзом для поддержки и содействия исследованиям в Европейском исследовательском районе (ERA)
2012-2015	HighSTICK-проект: нашивка датчиков деформации, нашивка световых систем, функциональные препреги, нашивка проводов с помощью TFP, разработка трехмерных структур термопластичных композитных деталей и разработка модульных вышивальных машин Партнеры: IPF + 26 партнеров текстильной и композиционной отраслей Финансирование проекта: BMBF
2013-2015	Robot Arm project: Применение TFP-технологии для роботизированной руки, армированной углеродным волокном. Партнеры: IPF, Hightex, Q Point. Финансирование: ZIM

На данный момент технология направленной нашивки волокна и способы создания tfr-преформ описываются в ряде патентов.

В патенте WO 0245932 A1 [81] указано, что армирующие волокна нашиты на подложку с использованием химически или термически легкоплавких фиксирующих нитей, которые служат первоначально для

фиксации армирующих волокон на подложке, растворяются впоследствии, тем самым не влияя на механические свойства структуры армирующего волокна.

Авторами проводились исследования влияния вида прошивной нити на содержание углерода в готовых образцах из ПКМ и их механические свойства.

Так, на швейной установке CNC были изготовлены однонаправленные TFP-заготовки с различными нитями для фиксации ровинга из углеродного волокна (Tenax HTS 5331-24K) на материале-подложке (ткань холста из стекловолокна 80 г/м²). Фиксирующими нитями являлись легкоплавкие мультифиламентные нити Grilon K85 110 dtex, которые обычно имеют температуру плавления 85°C, полиамидная мононить Transfil 56 dtex, полиамидная нить Serafil 100 dtex и полиэфирная комплексная нить, которая обычно используется для производства многоосных тканей (текстурированный PSE 76 dtex). Следует отметить, что, в отличие от первой указанной нити, последние нити не плавятся при температурах, возникающих при дальнейшей обработке. В дополнение на отрывную ткань «SuperReleaseBlue» нашивались армирующие волокна Grilon K85 110 dtex. Ровинги из углеродного волокна размещались параллельно друг другу на расстоянии 3,375 мм и фиксировались на подложке зигзагообразным швом с длиной строчки 4 мм и шириной строчки 2 мм. Заготовка состояла из 4 однонаправленных слоев, нашитых один над другим. Две из этих армирующих волоконистых структур впоследствии укладывали в модельную оснастку, пропитывали многокомпонентной смолой HexFlow RTM6 (Hexcel, USA) и отверждали. Готовые пластины разрезали на образцы по направлению волокон и подвергали испытаниям на растяжение и сжатие. Примечательно, что фактически достигнутые объемные доли углеродных волокон в многослойных ламинатах сильно отличались, несмотря на одинаковые условия производства. Самые низкие значения были получены с помощью Transfil и Serafil (около 50-52%). Более высокие значения были

достигнуты с применением текстурированной полиэфирной нити (приблизительно 58-60%). Причиной этого является, вероятно, гораздо более высокая эластичность и гибкость благодаря текстурированию, что приводит к более равномерному распределению волокон или уменьшению площадей, пропитанных смолой.. Сравнение прочности на растяжение различных образцов показывает, что значительное увеличение достигается за счет использования нити Grilon - на 10-30% по сравнению с другими тремя стандартными нитями. Прочность на сжатие образцов Grilon является средней, здесь наилучшее значение достигается с помощью Serafil. С другой стороны, образцы Grilon имеют более низкую среднюю жесткость. Таким образом, по сравнению с наиболее оптимальными значениями для стандартных нитей, прочность на растяжение увеличивается на 30%, прочность на сжатие на 23%, модуль растяжения на 8% и модуль давления на 26%.

В патенте EP 2599614 A1 [82] техническим результатом является возможность использования термопластичной матрицы с сохранением подвижности преформы и гибкости драпировки. Это достигается путем изготовления преформы композита с термопластичной матрицей, которая содержит один или более слоев армирующих волокон, пришитых на основу фиксирующей нитью по TFP-технологии. При этом способ содержит один или более этапов укладки слоя термопластичного полимера на основу или на слой армирующих волокон, а слой полимера содержит термопластичные нити или термопластичную пленку. На рисунке 4 схематично показаны разрезы такой преформы, которая состоит из основы и чередующихся слоев из волоконных прядей и термопластичных пленок.

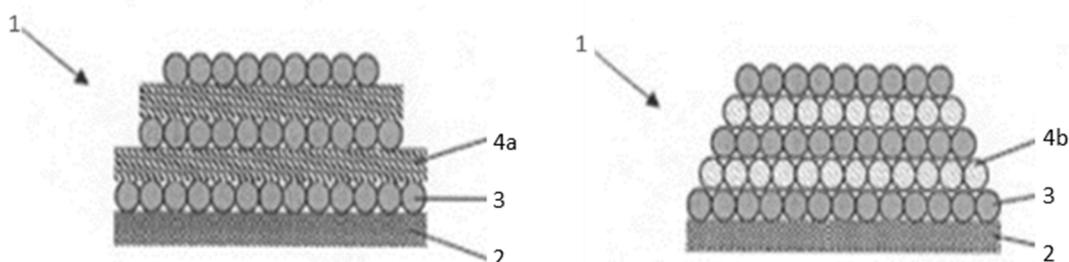


Рисунок 4 – Способ изготовления преформы для композита с термопластичной матрицей: 1 – преформа; 2 – основа; 3 – армирующее волокно; 4a – термопластичный полимер в виде пленки; 4b – термопластичный полимер в виде нитей

В вышеназванных патентах при изготовлении tfr-преформ несущим слоем (подложкой, основой), на который происходит нашивка армирующего волокна, является тканый материал. Перед выкладкой готовой преформы в оснастку материал несущего слоя, который выступает за пределы контура кромки волокнистой заготовки, отрезают либо отрывают. В первом случае подложка будет входить в состав волокнистой заготовки, не выполняя никаких функций, но при этом увеличивая вес изделия. Особенно это существенно, если несколько волокнистых заготовок помещаются друг на друга. Кроме того, в зоне опорных слоев готовой композитной детали может происходить отслаивание. Во втором случае тканую подложку нельзя оторвать от волокнистой заготовки, не повреждая отдельные армирующие волокна в волокнистых прядях.

Авторы патента EP 1907195 A1 [83] предлагают способ изготовления одно- или многослойной волокнистой заготовки согласно tfr-технологии, позволяющий легко отделить опорный слой от волокнистой заготовки, в особенности без повреждения волокнистых прядей, для получения волокнистой заготовки без проблемных опорных слоев, которая обеспечивает практически оптимальные свойства слоистости изготовленного из нее композитного компонента и в которой армированные волокна выровнены так, что они по существу ориентированы в соответствии с направлением действия нагрузки. Кроме того, уменьшается влияние на механические характеристики волокнистой заготовки фиксирующих нитей, необходимых для осуществления TFR-процесса, в особенности в отношении образования дефектов.

Способ заключается в том, что волокнистые пряди выравнивают с обеспечением их ориентации по направлению действия нагрузки и укладывают на опорный слой с разделительным слоем. Затем волокнистые пряди закрепляют фиксирующими нитями – одной верхней и одной нижней

нитью для формирования волокнистой заготовки любой требуемой толщины материала (рис. 5). Способ включает нанесение разделительного слоя в виде тонкослойной политетрафторэтиленовой пленки на опорный слой и укладывание волокнистой заготовки на разделительный слой с использованием TFR-технологии. Затем осуществляют расплавление части фиксирующих нитей посредством нагревания. После отсоединяют опорный слой от волокнистой заготовки. Достижимый при этом технический результат заключается в получении волокнистой заготовки с оптимальными механическими характеристиками.

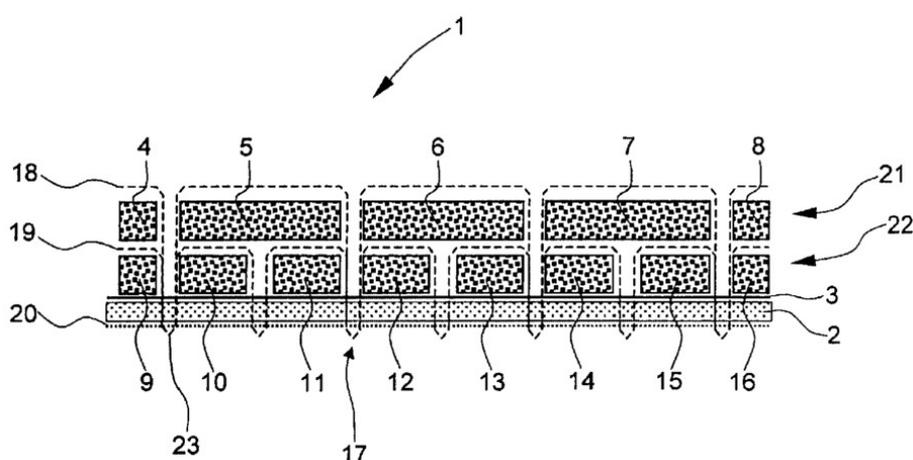


Рисунок 5 – Поперечный разрез волокнистой заготовки, изготовленной с использованием TFR-технологии, с разделительным слоем [83]: 1 – волокнистая заготовка; 2 – опорный слой; 3 – разделительный слой; 4-16 – волокнистые пряди; 17 – фиксирующие нити; 18, 19 – верхние фиксирующие нити; 20 – нижняя фиксирующая нить; 21 – верхний слой; 22 – нижний слой; 23 – петля.

Таким образом, в настоящее время TFR-технология находит все большее и большее применение за рубежом; иностранными институтами и компаниями базовых отраслей промышленности (авиа-, судо-, автомобилестроение, энергетика и др.) ведутся различные экспериментальные исследования в области изготовления преформ изделий по данному методу, что подтверждается наличием научных статей и патентов. Так, в качестве примеров изделий из ПКМ, созданных на основе tfr-преформ, можно назвать усилители тормозов велосипедов (IFB Institute of Aircraft Design, Stuttgart, Germany), руку робота-манипулятора KUKA KR 180 RA (Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH), лодочный пропеллер (Hightex

Verstärkungsstrukturen GmbH), лопастной ротор (Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden, Germany). В России данный метод создания волокнистых заготовок из ПКМ еще малоизвестен. Возможно, определенные работы в данной области ведутся, однако никаких данных, подтверждающих это, в ходе проведения аналитического обзора обнаружено не было (отсутствие публикаций, патентов, заявок на РИД и прочее).

Перспективы развития внутреннего рынка отечественных деталей и узлов ГТД позволяют говорить о необходимости теоретических и экспериментальных исследований в данной области, применении новых материалов, оборудования и технологий, в том числе поиске и разработке принципиально новых способов изготовления преформ для элементов ГТД, отвечающих требованиям научно-технического прогресса, с целью повышения технико-экономических показателей производства.

Выводы по главе 1

Мировой опыт применения TFR-технологии дает возможность назвать её самой перспективной среди других методов создания объёмно-армированных преформ. Проведенный обзор современных тенденций развития технологических процессов изготовления преформ элементов ГТД из ПКМ позволил выявить основные преимущества и недостатки технологии.

К преимуществам TFR-технологии относятся:

- изготовление преформ изделий сложной и криволинейной конфигурации;
- укладка волокна согласно векторам распределения нагрузки под любым углом от 0° до 360° ;
- возможность создания зон локального армирования;
- изготовление преформ с геометрией конечного изделия;
- автоматизация, высокая точность и воспроизводимость процесса;
- оптимальное использование несущей способности ровинга;
- возможность комбинирования волокна в рамках одной преформы;
- применение сложных схем армирования, в которых коэффициент реализации материала будет достигать более высокого значения в сравнении с классическими армирующими тканями.

К недостаткам следует отнести то, что в качестве прошивной фиксирующей нити в настоящее время применяются стеклянные и полиамидные волокна, а в качестве несущей основы – углеродные или стеклянные ткани и термопластичные пленки, которые являются вспомогательными материалами, подлежащими удалению, так как в дальнейшем они не несут функциональной нагрузки. При отделении основы от преформы велика вероятность механического повреждения и разрушения армирующих волокон. Использование автором вымываемой подложки и арамидных нитей устранит эти недостатки за счет того, что подложка легко удаляется из преформ (растворяется в воде), а прошивка арамидными нитями способствует улучшению прочностных свойств углепластиков в плоскости армирования.

Глава 2. Материалы и методы

2.1 Используемые материалы

Объектами экспериментальных исследований являлись образцы нашивных углепластиков на основе углеродного волокна HTS 45 (TohoTenax®, Япония). Для нашивки углеродного жгута использовали арамидную нить Русар-С (ООО НПП «Термотекс», г. Мытищи, Россия) и водорастворимую подложку («Auroga», Китай). Свойства волокон показаны в таблицах 3-4.

Таблица 3 – Основные характеристики углеродного волокна HTS 45 (TohoTenax®, Япония).

Плотность, г/см ³	1,77
Прочность при растяжении, МПа	4300
Линейная плотность, Текс	800
Модуль упругости, ГПа	240
Удлинение при разрыве, %, не менее	1,8
Количество филаментов	12 000
Диаметр нити, мкм	7
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	1,6 x 10 ⁻³

Таблица 4 – Основные характеристики Русар-С (ООО НПП «Термотекс», г. Мытищи) ТУ 2272-170-17277875-2014.

Плотность, г/см ³	1,45
Линейная плотность, Текс	29,4
Прочность нити, сН/Текс, не менее	290
Прочность в микропластике, ГПа	5,5-6,5
Модуль упругости, ГПа	165-175
Удлинение при разрыве, %, не менее	2,5
Кислородный индекс, %	28-30
Водопоглощение, %, 90 суток 200 ⁰ С при отн. влажности 95%	9

Композиция для пропитки материалов состояла из 100 м.ч. эпоксидной смолы Araldite LY-556 («Huntsman», Швейцария (рис. 6, табл. 5), 90 м.ч.

отвердителя изо-метилтетрагидрофталевого ангидрида (и-МТГФА) (TriuneChemicalsMaterials (TCM), Китай (рис. 7, табл. 6) и 0,2 м.ч. ускорителя 2-метилимидазола (ООО «Модификатор», г. Томск, Россия (рис. 8, табл. 7). Режим отверждения 4 ч. при 110 °С.

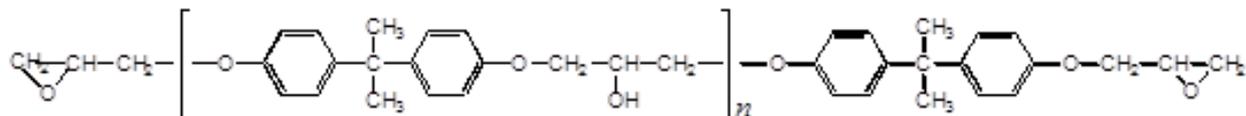


Рисунок 6 – Структурная формула эпоксидного олигомера

Таблица 5 – Свойства эпоксидной смолы Araldite LY 556 («Huntsman», Швейцария)

Наименование показателя	Характеристика
Внешний вид, цвет	Прозрачная жидкость, желтоватая
Максимальная рабочая температура	220°С
Вязкость динамическая, мПа·с	480-580
Вязкость при 25°С, мПа·с	1300 - 1800
Плотность при 25°С, г/см ³	0,93 - 0,95

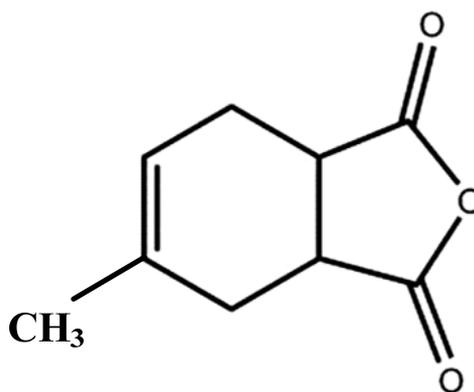


Рисунок 7 – Структурная формула отвердителя изо-метилтетрагидрофталевого ангидрида

Таблица 6 – Свойства изо-метилтетрагидрофталевого ангидрида (Triune Chemicals Materials (TCM), Китай)

Характеристика	Значение
Внешний вид	Слегка желтоватая прозрачная жидкость
Содержание ангидрида, % \geq	41,0
Летучие вещества, % \leq	1,0
Свободная кислота, % \leq	1,0
Вязкость при 25°C, мПа·с	30-60
Температура замерзания, \leq	-15°C
Плотность, г/см ³	1,16-1,26
Цветность по Гарднеру, \leq	2
Кислотное число	600-685

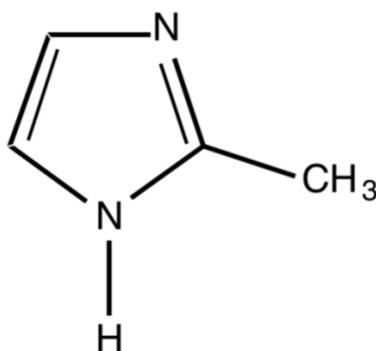


Рисунок 8 – Структурная формула ускорителя полимеризации 2-метилимидазола

Таблица 7 – Свойства 2-метилимидазола

Характеристика	Значение
Химическое название	2-метил-1,3-диазоциклопента - 2,4-диен
Молекулярная формула	C ₄ H ₆ N ₂
Массовая доля основного вещества, %	Не менее 98
Влажность, %	Не более 0,5
Температура плавления, °C	140-146

2.2 Изготовление преформ и образцов материалов элементов ГТД из ПКМ

Для сравнения методов получения преформ элементов ГТД были изготовлены образцы материалов следующими способами:

1. Послойной выкладкой слоев тканого материала без прошивки;
2. Послойной выкладкой слоев тканого материала с последующей прошивкой;
3. Нашивкой углеродного ровинга на водорастворимую подложку (разрабатываемая технология).

Для оценки технологичности методов определяли количество облоя, отклонение массы и геометрических размеров преформ, трудоемкость при их изготовлении.

Изготавливалось 5 образцов преформ по каждой из трех сравниваемых технологий размером 80x80x6 мм и номинальной массой 33 г, со схемой укладки $[0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, -45^\circ]$.

Послойная ручная выкладка слоев тканого материала без прошивки осуществлялась путем сбора пакета из углеродной ткани. Припуск лоскутов ткани при этом составлял 10мм. Для скрепления слоев преформы между собой использовался аэрозольный клей Airtac 2.

Начальный этап изготовления образцов с последующей прошивкой соответствовал изготовлению пакетов ручной выкладкой, описанной выше. Готовые преформы прошили арамидными нитями Русар-С на промышленной швейной машине JUKI Corporation LZ-391N (Япония). При этом длина стежка и его ширина составляли 4мм.

Нашивка углеродного ровинга на водорастворимую подложку осуществлялась с помощью вышивального оборудования JCW 0100-500 (ZSK Stickmaschinen, Германия) (Рис. 9). Технология нашивки состояла из следующих операций: виртуального раскроя модели изделия на слои; написания управляющей программы нашивки каждого слоя; изготовления преформы; вымывания подложки; сушки преформы.



Рисунок 9 – Направленная нашивка углеродного ровинга на водорастворимую подложку. 1 – катушка с углеродным ровингом, 2 – игла с армирующей нитью, 3 – водорастворимая подложка, 4 – нашиваемая преформа

Для виртуального раскроя модели изделия на слои, написания управляющей программы нашивки каждого слоя и изготовления преформы использовалась программа GIS BasePac. В программную среду заносились такие технологические параметры, как схема и плотность укладки углеродного волокна, длина стежка арамидной нити. Непосредственно перед нашивкой на пантограф вышивальной машины закрепляли водорастворимую подложку с помощью бордюрных рам. Далее запускалась программа нашивки. После заполнения всей рабочей поверхности подложки нашитыми образцами преформ её снимали с пантографа вышивального оборудования и вырезали образцы преформ с подложкой поштучно. После этого преформы помещали в отдельные емкости с горячей водой и тщательно вымывали подложку. После этого преформы подвергали сушке при температуре 80°C в течение 1 ч.

Для исследования влияния технологических параметров нашивки на физико-механические свойства армированных пластиков были изготовлены образцы с разным шагом нашивки и плотностью укладки жгута углеродных волокон. Плотность укладки $\rho_{y.e}$ задавалась в программе GIS BasePac 8. Данная величина в программе GIS BasePac не имеет размерности и обозначается через условные единицы (y.e.). 1 y.e. = 0,05 мм. Плотность укладки ρ_{mm} определяется расстоянием между осевыми линиями соседних

углеродных волокон и характеризуется расстоянием $S_{м.в.}$ между ними. Чем меньше расстояние, тем ближе волокна расположены друг к другу, и такая укладка считается более плотной. Технологические параметры нашивки показаны в таблице 8.

Все преформы состояли из 8 слоев со схемой укладки $[0^\circ; 90^\circ]$. На основе полученных преформ методом вакуумной инфузии были получены пластины из углепластиков, которые в зависимости от метода испытания разрезали на образцы необходимых размеров.

Таблица 8 – Технологические параметры нашивки и размеры преформ

Шаг нашивки Δ , мм	Плотность нашивки ρ , у.е.	Толщина пластины h , мм	Ширина пластины, мм	Длина пластины, мм
4	47	4,4	250	250
	57	3,9		
	60	4,2		
	70	3,2		
5	47	4,0	250	250
	57	3,6		
	60	3,5		
	70	3,1		
7	47	4,4	250	250
	57	3,6		
	60	3,6		
	70	3,2		
9	47	4,0	250	250
	57	3,25		
	60	3,3		
	70	3,1		
10	47	3,9	250	250
	57	3,3		
	60	3,2		
	70	3,0		
контрольная	–	3,6	200	200

Для подтверждения пригодности разработанной технологии были изготовлены преформы лопаток компрессора для рабочего колеса

центробежного компрессора (РКЦК) малого газотурбинного двигателя. Рабочее колесо компрессора состояло из набора силовых колец и лопаток.

Лопатки изготавливали в несколько этапов. Сначала были созданы преформы лопаток компрессора автоматизированной нашивкой углеродного волокна на водорастворимую подложку. Использовали углеродное волокно IMS 65 и арамидную нить Русар-С. Далее нашитые преформы собирали в пакеты (рис. 10а), укладывали в формы (рис 10б) и пропитывали высокотемпературным фталонитрильным связующим РН-3М. После отверждения форму разбирали и извлекали из нее лопатку компрессора (рис 10в). Всего изготавливали один комплект (20 шт.) лопаток.

Силовые кольца изготавливали из углепластика марки ВКУ-38ТР. В сборку РКЦК входило 5 колец диаметром от 25 до 120 мм и толщиной 5 мм.

Из полученных элементов производили сборку рабочего колеса центробежного компрессора диаметром 196 мм и массой 0,52кг.

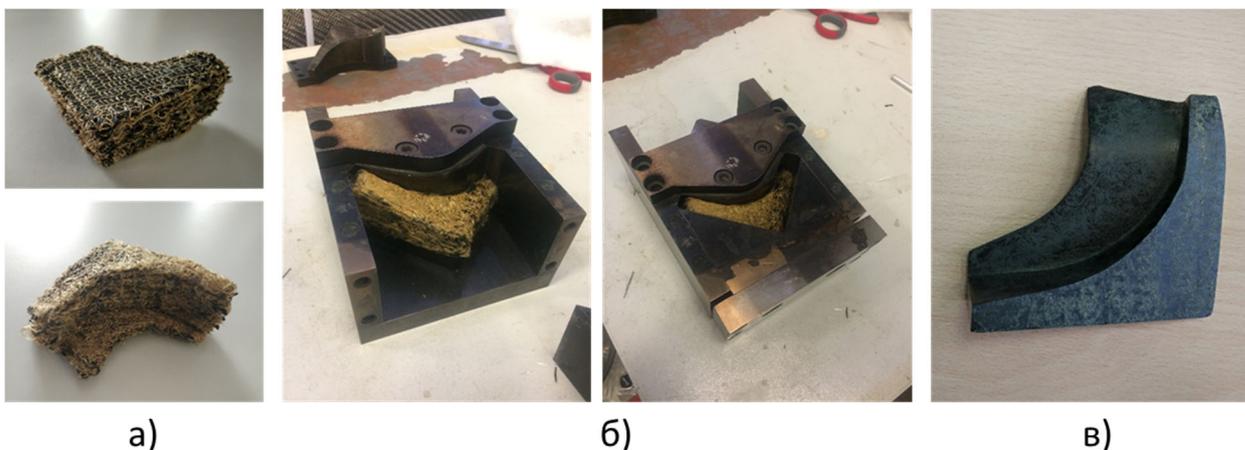


Рисунок 10 – Экспериментальная лопатка компрессора МГТД
а) TFR-преформа б) преформа в оснастке в) готовая лопатка

2.3 Методы испытаний

2.3.1 Определение количества облоя (излишек материала),

номинальной массы и отклонения от формы при изготовлении преформ

Определение среднего значения облоя образцов осуществлялось по формуле:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} (p_1 + \dots + p_n)$$

где \bar{p} - среднее значение облоя, г; n - количество образцов в исследовании. В данном случае $n = 5$.

Количество облоя в процентах вычислялось по формуле:

$$P = \frac{\bar{p}}{M} \times 100\%$$

где P - количество облоя, %;

\bar{p} - среднее значение облоя, г;

M – количество углеродной ткани в одном образце преформы, г.

Отклонение значения массы преформы $m_{\text{откл}}$ от её номинального значения рассчитывалось по формуле:

$$m_{\text{откл}} = m_{\text{max}} - m_{\text{н}}$$

где m_{max} – предельное значение массы, г; $m_{\text{н}}$ – номинальная масса преформы, г.

Расчет относительного отклонения массы преформы от её номинального значения осуществлялся по формуле:

$$m_o = \frac{m_{\text{откл}}}{m_{\text{н}}} \times 100\%$$

Расчет действительного отклонения размеров преформ $E_{\text{д}}$ от их номинального значения производился по формуле:

$$E_{\text{д}} = l_{\text{д}} - l_{\text{н}}$$

где $l_{\text{д}}$ – действительный размер, мм; $l_{\text{н}}$ – номинальный размер преформы, мм.

2.3.2 Определение трудоемкости изготовления преформ

Трудоемкость – это сумма затрат живого труда в человеко-часах рабочего времени на производство единицы продукции в натуральном или стоимостном выражении как по всей номенклатуре выпуска, так и по отдельным видам работ и операций.

Для определения данного показателя изготовление преформ осуществлялось 3 работниками одинаковой квалификации (по одному на каждый из методов) в течение двух рабочих недель.

Показатель трудоемкости T^L , отражающий прямую зависимость между объемом производства преформ и трудозатратами в человеко-часах рабочего времени, рассчитывался по формуле:

$$T^L = \frac{T}{Q}$$

где T – трудозатраты, человеко-часы; Q – количество изготовленных преформ

Показатель трудозатрат определялся по формуле:

$$T = L * t$$

где L – численность работников, выполняющих изготовление преформ; t – количество часов рабочего времени, ушедшее на изготовление преформ, в расчете на одного работника.

2.3.2 Определение физико-механических характеристик нашивных углепластиков

2.3.3.1 Определение прочности при изгибе и полной энергии разрушения при трехточечном изгибе в условиях квазистатического нагружения

Сущность метода испытания заключается в том, что образец, свободно лежащий на двух опорах, нагружают с постоянной квазистатической скоростью в середине между опорами до его разрушения при межслойном сдвиге или от изгибных нагрузок (рисунок 11). Экспериментальные образцы имеют форму прямоугольного параллелепипеда. Метод чувствителен к геометрическим размерам образца и соотношению расстояния между опорами l к толщине образца h . Во время проведения испытания записывают диаграмму нагрузка-деформация.

Образцы нашивных углепластиков были вырезаны из пластин в направлении армирования 0° и 90° . Длина образцов составляла 44 мм, ширина 8 мм и толщина около 4 мм в зависимости от режима нашивки преформы.

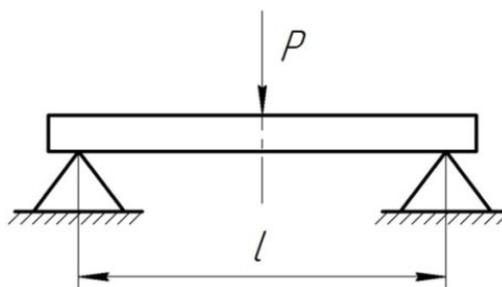


Рисунок 11 – Схема нагружения образцов нашивных углепластиков при трехточечном изгибе в условиях квазистатического нагружения

Испытание проводилось на универсальной испытательной машине Zwick Z100 (ZwickRoell, Швейцария). Скорость нагружения составляла 10 мм/мин. Расстояние между опорами равнялось 32 мм, при этом l/h равнялось 8.

Прочность σ_s при изгибе определялась по формуле

$$\sigma_s = \frac{3F_{max}l}{2bh^2},$$

где F_{max} – нагрузка, соответствующая разрушению образца, b – ширина образца, h – толщина образца, l – расстояние между опорами.

Полная энергия разрушения A_{fs} рассчитывалась по формуле

$$A_{fs} = \frac{\int_{l_0}^{l_i} P(l)dl}{bh},$$

где интегральное выражение – площадь под кривой нагрузка $P(l)$ – изменение нагрузки от начального прогиба l_0 до прогиба l_i .

За результат испытания принималось среднее значение шести измерений для любой серии образцов.

2.3.3.2 Определение прочности при изгибе и полной энергии разрушения при трехточечном изгибе в условиях низкоскоростного удара

Сущность метода описана в п. 2.3.3.1. Эксперименты в условиях низкоскоростного ударного нагружения проводили на установке, выполненной на базе пружинного копра КПС-2, представленного на рис. 12а. За счет пружинного привода удается достичь скоростей нагружения до 7,0 м/с. В данной работе скорость нагружения составляла 4 м/с (энергия удара -

13,0 Дж). Для проведения испытаний по трехточечной схеме нагружения был применен блок крепления образца, включающий тензометрический динамометр, в котором четыре тензодатчика объединены в полный мост Уинстона (рис. 12б). Сигнал с тензомоста обрабатывается широкополосным усилителем УТШ-2М, а затем записывается на экране осциллографа в виде диаграммы нагружения в координатах нагрузка-время. Фотодатчик формирует сигнал запуска развертки осциллографа, который также проходит через усилитель УТШ-2М.

Далее с экрана осциллографа через выход КОП (канал общего пользования) диаграмма нагружения передается на компьютер, где происходит окончательная обработка данных с помощью программы Microsoft Excel®.

Для испытаний применялись те же образцы, что и в условиях квазистатического нагружения.

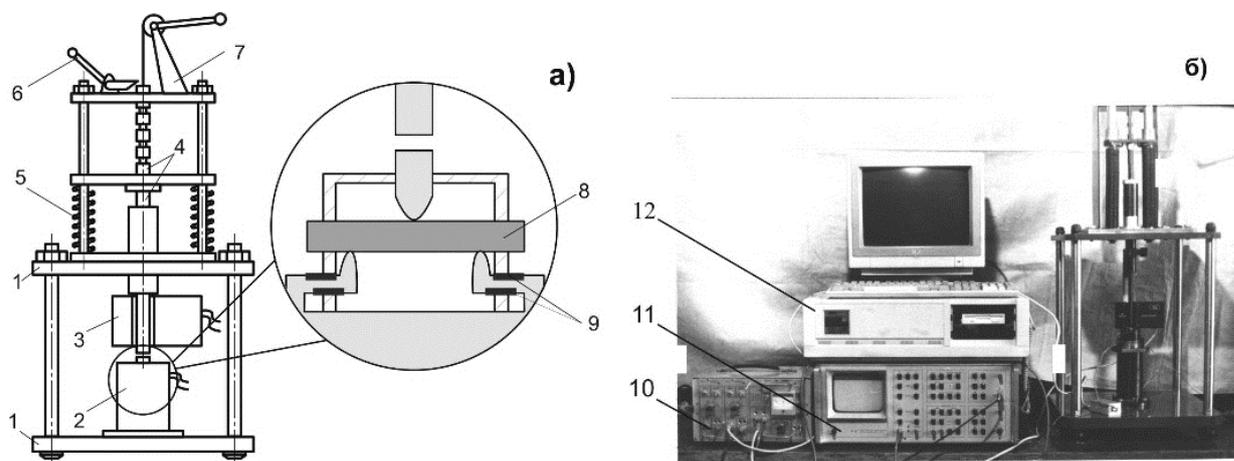


Рисунок 12 – Пружинный копёр КПС-2. Схема копра с динамометром для 3-х-точечного нагружения (а) и общий вид установки (б): 1 - рама, 2 - динамометр, 3 - фотодатчик, 4 - ударник, 5 - пружины, 6 - спусковое устройство, 7 - устройство натяжения пружин, 8 - образец, 9 - тензодатчики, 10 - усилитель УТШ-2М, 11 - запоминающий осциллограф С9-8, 12 – компьютер.

Прочность σ_s при изгибе определялась по формуле:

$$\sigma_s = \frac{3F_{max}l}{2bh^2},$$

где F_{\max} – нагрузка, соответствующая разрушению образца, b – ширина образца, h – толщина образца, l – расстояние между опорами.

Полная энергия разрушения A_{fd} рассчитывалась по формуле:

$$A_{fd} = \left[v - \frac{1}{2m} \int_{t_0}^{t_i} P(t) dt \right] \cdot \int_{t_0}^{t_i} P(t) dt ,$$

где v – скорость ударника в момент контакта с образцом, m – масса ударника, интегральное выражение – площадь под кривой нагрузка-время от начального момента нагружения t_0 до момента времени t_i .

За результат испытания принималось среднее значение шести измерений для любой серии образцов.

2.3.3.3 Определение прочности и модуля упругости при четырехточечном изгибе

Сущность метода заключается в изгибе плоского образца постоянного прямоугольного сечения, свободно лежащего на двух опорах (рис. 13), с постоянной скоростью нагружения до момента разрушения образца или до того момента, когда деформация растяжения на внешней поверхности образца достигнет предварительно заданного значения.

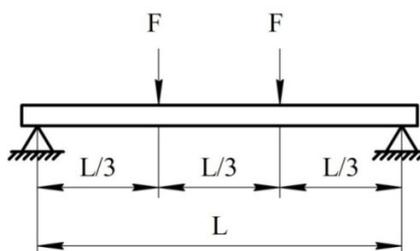


Рисунок 13 – Схема нагружения образцов нашивных углепластиков при четырехточечном изгибе

Образцы нашивных углепластиков были вырезаны из пластин в направлении армирования 0° и 90° . Длина образцов равнялась 76 мм, ширина 14 мм, толщина около 4 мм. Испытание проводилось на универсальной испытательной машине Zwick Z100 (Zwick Roell, Швейцария) при скорости нагружения 10 мм/мин. Расстояние между опорами $L = 66$ мм.

Прочность $\sigma_{и}$ при изгибе определялась по формуле:

$$\sigma_{и} = \frac{F_{\max} l}{bh^2} ,$$

где F_{\max} – нагрузка, соответствующая разрушению образца, b – ширина образца, h – толщина образца, l – расстояние между опорами.

Модуль упругости $E_{и}$ рассчитывался по формуле:

$$E_{и} = \frac{0,21 \Delta FL^3}{bh^3 \Delta \omega},$$

где $\Delta \omega$ — разность прогибов ω' и ω'' , ΔF — приращение нагрузки на упругом участке нагружения, соответствующее изменению прогиба $\Delta \omega$.

За результат испытания принималось среднее значение шести измерений для любой серии образцов.

2.3.3.4 Определение модуля сдвига методом кручения пластины

Сущность метода заключается в кручении образца в виде квадратной пластины и определения при этом модуля сдвига G . Образец для испытания имеет опору в трех точках (рисунок 14). Опоры размещают в непосредственной близости к противоположным углам по диагонали плиты. Плита испытывает упругую деформацию при постоянстве скорости нагружения с одной точки, находящейся на противоположной диагонали, до момента набора образцом для испытаний заданной деформации. Общее усилие в точке нагружения измеряют как зависимость упругой деформации от силы нагружения.

Образцы для определения модуля сдвига вырезали из нашитых пластин углепластиков. Образцы имеют длину и ширину равную 80 мм и толщину ~ 4 мм. Расстояние между опорами составляло 70 мм. Нагружение пластин осуществлялось на испытательной машине Zwick Z100 при скорости нагружения 1 мм/мин. Максимальное усилие в точке нагружения составляло 40 Н. При нагружении пластины записывали диаграмму нагружения усилие F – прогиб Δl . Нагружение каждой пластины повторяли 5 раз, при расположении образца в приспособлении в направлении - 45° и + 45°.

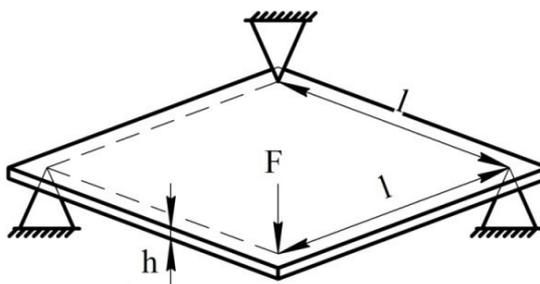


Рисунок 14 – Схема нагружения пластин нашивных углепластиков при определении модуля сдвига

Модуль упругости при сдвиге G определялся по формуле:

$$G = \frac{3Fl^2}{h^3 \cdot \Delta l}$$

где F – нагрузка, приложенная к углу образца, h – толщина образца, l – расстояние между опорами, Δl – прогиб под точкой приложения силы.

По диаграмме нагружения (рисунок 15) методом наименьших квадратов определялся коэффициент k в линейном уравнении $y=kx$, где $y=F$, $k=\Delta l$. С учетом найденного коэффициента k модуль сдвига G рассчитывался по формуле:

$$G = k \frac{3l^2}{h^3}$$

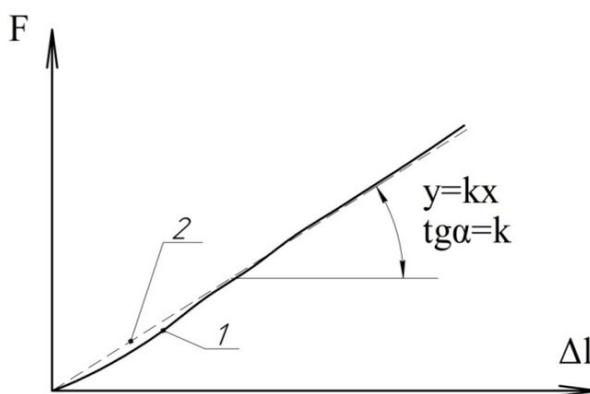


Рисунок 15 – Типичная диаграмма нагружения пластины при кручении и способ определения коэффициента k

2.3.3.5. Статистическая обработка данных

Для каждого вида испытания проводили статистическую обработку результатов измерений путем вычисления:

Среднего значения – $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

Стандартного отклонения - $S_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right]^{1/2}$, где \bar{n} – число измерений.

2.3.4. Определение напряженного состояния рабочего колеса центробежного компрессора в поле центробежных сил

Исследование напряженного состояния РКЦК в поле центробежных сил производили на разгонном стенде РС-1Д при нормальной и повышенной температуре.

Перед установкой на разгонный стенд собранного рабочего колеса на его элементы наклеивали тензорезисторы марки FSM-12-35-8X с базой 5мм в соответствии со схемой, представленной на рисунке 16. Далее тензодатчики подключали к токосъемнику, который в свою очередь соединен с регистрирующей аппаратурой. Во время испытаний производили запись показаний с тензодатчиков. Дополнительно определяли уровень вибрации в опорах во время всех циклов разгона и остановки рабочего колеса. Перед разгоном рабочего колеса камеру стенда вакуумировали. Остаточное давление в камере составляло менее 0,1 атм. Во время эксперимента записывалась температура в разгонной камере. Основные ограничивающие параметры разгонного стенда показаны в таблице 9. Критерии разрушения элементов рабочего колеса показаны в таблице 10.

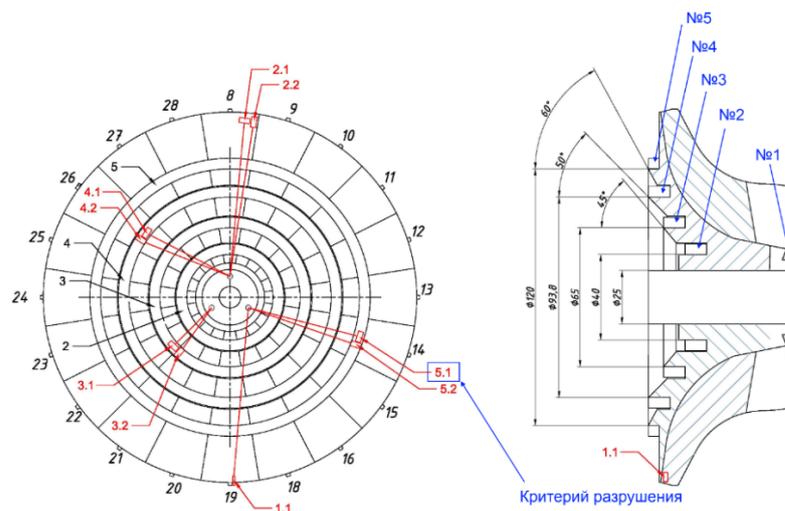


Рисунок 16 – Схема РКЦК с нумерацией колец и датчиков

Таблица 9 - Основные ограничения

№ п/п	Контролируемый параметр	Значение
1.	Максимальная частота вращения	52000 об/мин
2.	Максимальное отклонение частоты вращения	100 об/мин
3.	Максимальные виброперемещения демпферной опоры	250 мкм
4.	Максимальное остаточное давление в разгонной камере	250 мкбар
5.	Минимальное давление основного воздуха	7,5 бар

Таблица 10 - Основные ограничения по датчикам

№ п/п	Контролируемый параметр	Значение	Деформация при разрушении
1	Датчик 1.1, ϵ_{11R} ;	0,005	0,0075-0,008
2	Датчик 2.1, ϵ_{210} ,		
3	Датчик 2.2, ϵ_{22R} ;	0,005	0,0075-0,008
4	Датчик 3.1, ϵ_{310} ;	0,017	0,003
5	Датчик 3.2, ϵ_{32R} ;		
6	Датчик 4.1, ϵ_{41R} ;	0,0017	0,003
7	Датчик 4.2 ϵ_{420} ;	-1,15	-0,0009
8	Датчик 5.1 ϵ_{510} .	0,0017	0,003
9	Датчик 5.2 ϵ_{52R} .		

Разгонные испытания рабочего колеса проводили в четыре этапа

Этап 1 - разгон до 5000 об/мин:

1. Разгон рабочего колеса до 5000 об/мин со скоростью 1000 об/мин/мин и удержание данной частоты вращения в течение трех минут.
2. Снижение скорости вращения ротора до 0 об/мин со скоростью 2500 об/мин/мин.
3. Визуальный осмотр рабочего колеса.
4. Контроль показаний тензодатчиков на уровне допустимых, в случае превышения допустимых деформаций - остановка испытания.

Этап 2 - разгон до 10000 об/мин:

1. Разгон рабочего колеса до 10000 об/мин со скоростью 1000 об/мин/мин и удержание данной частоты вращения в течение трех минут.
2. Снижение скорости вращения ротора до 0 об/мин со скоростью 2500 об/мин/мин.
3. Визуальный осмотр рабочего колеса.
4. Контроль показаний тензодатчиков на уровне допустимых, в случае превышения допустимых деформаций - остановка испытания.

Этап 3 - разгон до 15000 об/мин:

1. Разгон рабочего колеса до 15000 об/мин со скоростью 1000 об/мин/мин и удержание данной частоты вращения в течение трех минут.
2. Снижение скорости вращения ротора до 0 об/мин со скоростью 2500 об/мин/мин.
3. Визуальный осмотр рабочего колеса.
4. Контроль показаний тензодатчиков на уровне допустимых, в случае превышения допустимых деформаций - остановка испытания.

Этап 4:

Повтор подготовительного этапа и этапы 1-3 при нагревании камеры для испытаний до 320°C.

Регулировка скорости набора частоты вращения на стенде осуществлялась в ручном режиме. Испытания проводились при плавном повышении частоты оборотов. В ходе испытания производилась 45 секундная выдержка (площадка) на частотах 5000 об/мин, 7500 об/мин, 10000 об/мин и т.д. с шагом 2500 об/мин. Выдержка необходима для анализа деформаций в контролируемых объектах. Увеличение деформации на этапе выдержки может означать развитие процессов, предшествующих разрушению, например, развитию трещин.

Глава 3. Определение эффективности метода нашивки преформ

Для характеристики эффективности любой технологии используется ряд частных показателей, с помощью которых измеряется результативность применения отдельных видов ресурсов. К ним можно отнести производительность, трудоемкость, материалоемкость и др. Производственный процесс изготовления изделий, при котором сырье и энергетические ресурсы расходуются рационально, считается безотходным. Однако при создании изделий из ПКМ очень сложно добиться полностью безотходного производства, когда все исходные материалы превращаются в готовую продукцию. К примеру, метод ручной выкладки тканых материалов характеризуется большим количеством обрезков дорогостоящей высокопрочной конструкционной ткани, которая неминуемо остается после раскроя. При применении сложной схемы армирования с разнообразным количеством углов в отходы может уйти до 40% листового рулонного материала, что сильно влияет на себестоимость конечного изделия. Поэтому минимизация облоя – это важная задача, решение которой позволит снизить затраты предприятия и повысить производительность.

В таблице 11 представлены массы облоя после изготовления пластин углепластиков разными методами. При изготовлении предварительных заготовок автоматизированной нашивкой ровинга излишками материала, подлежащими обрезке, являются входные нити («хвосты») в начале создаваемой преформы (как на лицевой стороне, так и на изнаночной), необходимые для закрепления верхней и нижней нитей и образования стежка. Поэтому практически все используемое сырье уходит на создание готовой продукции с минимальным облоем, в отличие от метода ручной выкладки (с прошивкой и без), при котором масса облоя составляет около 40% от массы готовой преформы. Видно, что при ручной выкладке и послойной укладке с последующей прошивкой масса облоя более чем в 10 раз выше, чем при нашивке ровинга. Этот факт свидетельствует о высокой технологичности процесса нашивки ровинга.

Отклонение массы готовых преформ, полученных ручной выкладкой, ручной выкладкой с последующей прошивкой и нашивкой ровинга, от расчетной массы показано в таблице 12. Видно, что при выкладке и при выкладке с последующей прошивкой преформы отклонение массы одинаковое и составляет около 9% от расчетной массы. В случае нашивки ровинга отклонение массы составляет около 1%. Этот факт еще раз подтверждает технологичность разрабатываемого метода.

Таблица 11 – Масса облоя образцов углепластиков, изготовленных разными методами

Послойная укладка монослоев тканого материала без прошивки						
	Образец 1.1.	Образец 1.2.	Образец 1.3.	Образец 1.4.	Образец 1.5.	Среднее значение, г
Масса облоя $m_{об}, Г$	12,84	13,55	12, 76	13, 53	12, 94	13,2
$\frac{m_{об}}{M}, \%$	40	37,7	41,2	42	37,6	39,7
Послойная укладка монослоев тканого материала с прошивкой						
	Образец 2.1.	Образец 2.2.	Образец 2.3.	Образец 2.4.	Образец 2.5.	Среднее значение, г
Масса облоя $m_{об}, Г$	14, 79	13, 86	13, 24	13, 48	13, 18г	13,7
$\frac{m_{об}}{M}, \%$	41,1	42,5	39,1	43,2	36,9	40,6
Нашивка углеродного ровинга на водорастворимую подложку						
	Образец 3.1.	Образец 3.2.	Образец 3.3.	Образец 3.4.	Образец 3.5.	Среднее значение, г
Масса облоя $m_{об}, Г$	0,115г	0,128г	0,118г	0,121г	0,113г	0,119
$\frac{m_{об}}{M}, \%$	0,34	0,38	0,36	0,36	0,34	0,36

Таблица 12 – Определение отклонения массы (М) готовой преформы от номинальной расчетной.

Послойная укладка монослоев тканого материала без прошивки						
Образец 1.1.	Образец 1.2.	Образец 1.3.	Образец 1.4.	Образец 1.5.	Номинальная масса, г	Относительное отклонение
31, 85г	35, 88г	30, 94г	32, 16г	34, 43г	33г	8,7%
Послойная укладка монослоев тканого материала с прошивкой						
Образец 2.1.	Образец 2.2.	Образец 2.3.	Образец 2.4.	Образец 2.5.	Номинальная масса, г	Относительное отклонение
35, 97г	32, 58г	33, 88г	31, 16г	35, 76г	33г	9%
Нашивка углеродного ровинга на водорастворимую подложку						
Образец 3.1.	Образец 3.2.	Образец 3.3.	Образец 3.4.	Образец 3.5.	Номинальная масса, г	Относительное отклонение
33,41г	33,24г	32, 83г	33,00г	32, 91г	33г	1,2%

Результаты геометрических измерений преформ, полученных разными методами, показаны в таблице 13. Видно, что для методов, связанных с ручной выкладкой, отклонение размеров преформ составляет около 2 мм. В случае автоматизированной нашивки отклонение геометрических размеров пакетов отсутствует.

При этом метод автоматизированной нашивки ровинга позволяет получать малогабаритные изделия ввиду того, что размеры преформ ограничены размерами рабочего поля вышивальной машины, используемой для нашивки.

Таблица 13 – Отклонения геометрических размеров готовых преформ.

Послойная укладка монослоев тканого материала без прошивки						
Полученный размер преформы, мм					Номинальный размер, мм	Действительное отклонение, мм
Образец 1.1.	Образец 1.2.	Образец 1.3.	Образец 1.4.	Образец 1.5.		
81x81x5	81x81x6	82x82x7	81x82x6	80x81x6	80x80x6	±2
Послойная укладка монослоев тканого материала с прошивкой						
Полученный размер преформы, мм					Номинальный размер, мм	Действительное отклонение, мм
Образец 2.1.	Образец 2.2.	Образец 2.3.	Образец 2.4.	Образец 2.5.		
81x81x7	81x81x6	82x81x6	81x81x6	80x81x5	80x80x6	±2

Нашивка углеродного ровинга на водорастворимую подложку						
Полученный размер преформы, мм					Номинальный размер, мм	Действительное отклонение, мм
Образец 3.1.	Образец 3.2.	Образец 3.3.	Образец 3.4.	Образец 3.5.		
80x80x6	80x80x6	80x80x6	80x80x6	80x80x6	80x80x6	Нет

В таблице 14 представлены результаты определения трудоемкости изготовления преформы по технологиям автоматизированной нашивки и ручной выкладкой с прошивкой и без. Видно, что при прочих равных условиях (время и количество работников) изготовление одной преформы разрабатываемым способом происходит в два раза быстрее. Это объясняется тем, что процесс создания предварительной заготовки осуществляется в автоматическом режиме по заранее написанной программе. Нашивка и прошивка преформ происходит одновременно, за одну технологическую операцию, оператор лишь контролирует процесс. Доработка предварительных заготовок не требуется, так как технология позволяет создавать преформы с геометрией конечного изделия. При ручной выкладке большую часть времени занимает выкройка всех слоев, каждый из которых имеет сложную геометрию и угол укладки. Часть времени уходит на доработку преформ, так как изначально слои раскраиваются с припусками (ввиду разлохмачивания среза ткани). Кроме того, большую роль играет человеческий фактор.

Таблица 14 – Определение трудоемкости изготовления преформ

Технология \ Параметр	Кол-во преформ Q (за 1 раб. нед.)	Трудозатраты T	Трудоемкость T ^L
Послойная укладка монослоев тканого материала без прошивки	5шт	40 человеко-часов	8 часов
Послойная укладка монослоев тканого материала с прошивкой	4шт	40 человеко-часов	10 часов
Нашивка углеродного ровинга на водорастворимую подложку	10шт	40 человеко-часов	4 часа

Выводы по 3 главе

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сравнить существующие технологии изготовления преформ элементов ГТД из ПКМ (послойная выкладка слоев углеродной ткани без прошивки и с прошивкой) с разрабатываемой технологией по таким характеристикам, как количество облоя, отклонение массы и размеров преформы от номинальных, трудоемкость изготовления. Данные 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 малой размерности с идентичными параметрами при их серийном производстве. Следует отметить существенное уменьшение трудоемкости.

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

На конечные прочностные характеристики готовых изделий из ПКМ влияют схема укладки и свойства применяемых при изготовлении преформы материалов. Кроме этого, введение нитей в третьем направлении с помощью прошивки сухих преформ (объединение слоев в поперечном направлении) повышает сдвиговую прочность, что доказано в ранее проводимых автором исследованиях [84, 85]. Однако при изготовлении преформ разрабатываемым способом автоматизированной нашивки углеродного ровинга на подложку на конечные свойства готовых изделий влияют не только вышеназванные факторы, но и параметры самой операции нашивки слоев преформ на вышивальном оборудовании. К таким параметрам относятся плотность укладки углеродного ровинга и длина стежка арамидной нити (шаг прошивки), задаваемые при разработке управляющей программы.

На рисунках 17 – 20 представлены фотографии с типичными видами разрушения образцов при трехточечном изгибе (рисунок 17, 18) и при четырехточечном изгибе (рисунок 19, 20), преформы которых были изготовлены с разными технологическими параметрами. Видно, что разрушение образцов локализовано в центральной части. Такой тип растрескивания характерен для образцов, разрушающихся при изгибе от нормальных напряжений. С другой стороны, в центральной части образцов видны продольные трещины, которые образуются при разрушении от сдвиговых (касательных) напряжений. В данном случае движение трещин от касательных напряжений завершается вблизи арамидных волокон, обладающих большей устойчивостью к росту трещин. Такой тип разрушения характерен для всех шагов и плотностей нашивки углеродного жгута и типа нагружения. Направление, в котором были вырезаны образцы для испытаний, не влияет на характер разрушения. Как и ожидалось для равнопрочного материала (пластина содержала равное количество слоев,

ориентированных перпендикулярно друг другу), тип разрушения не должен существенно отличаться от направления армирования. Оценить размеры трещин в зависимости от плотности и шага нашивки не удастся из-за случайности процесса разрушения, вызванного попаданием разного количества прошивок в конкретный образец. Причем каждая прошивка может быть рассмотрена как дефект материала – начальная трещина, ориентированная поперек образца. В случае контрольных образцов, полученных классическим методом, наблюдаются типичные разрушения. Так, для образцов, испытанных на короткобалочный сдвиг, наблюдается расслоение образцов в центральной части (рисунок 17(д) и 18 (д)). Такой тип разрушения вызван преобладанием касательных напряжений над нормальными, вследствие выбранного отношения толщины образца h к расстоянию между опорами l . В нашем случае это соотношение равно 8 – 11, в зависимости от плотности нашивки. Для четырехточечного изгиба наблюдается смешанный механизм разрушения. Из рисунка 19(д) и 20(д) видно, что образцы разрушились как от нормальных, так и от касательных напряжений. Об этом свидетельствуют трещины, распространившиеся как поперек образца, так и вдоль него.

Подытоживая вышесказанное, следует отметить, что плотность и шаг нашивки и направление, в котором были вырезаны образцы углепластика из пластины, мало влияют на характер разрушения и носят случайный характер. При этом образцы разрушаются в основном от нормальных напряжений, так как развитие трещин от касательных напряжений тормозятся прошивками арамидных волокон. В ненашитых же углепластиках наблюдается типичный для таких материалов тип разрушения: для короткобалочного сдвига от касательных напряжений, для четырехточечного изгиба – от нормальных. Переход к типу разрушения, характерному для нашивных материалов, предположительно должен способствовать увеличению прочности готовых изделий в трансверсальном направлении.

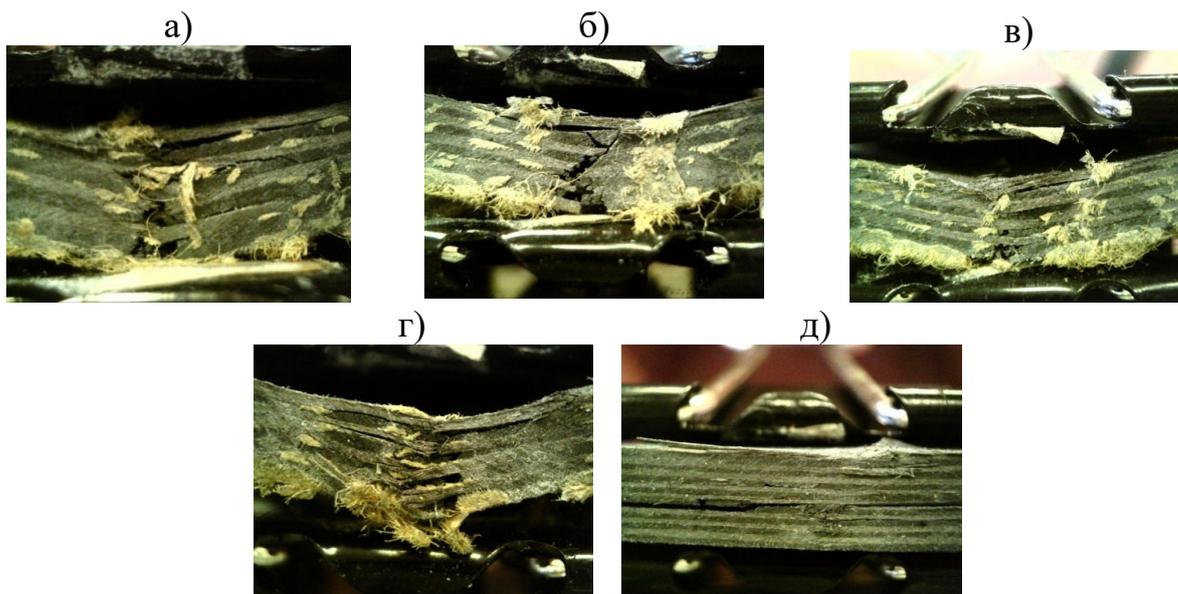


Рисунок 17 – Внешний вид разрушенных образцов нашивных углепластиков, испытанных по схеме трехточечного изгиба. Образцы, выпилены из пластины в направлении 0° . Шаг нашивки углеродного жгута 7 мм, плотность нашивки: а – 47, б – 57, в – 60, г – 70

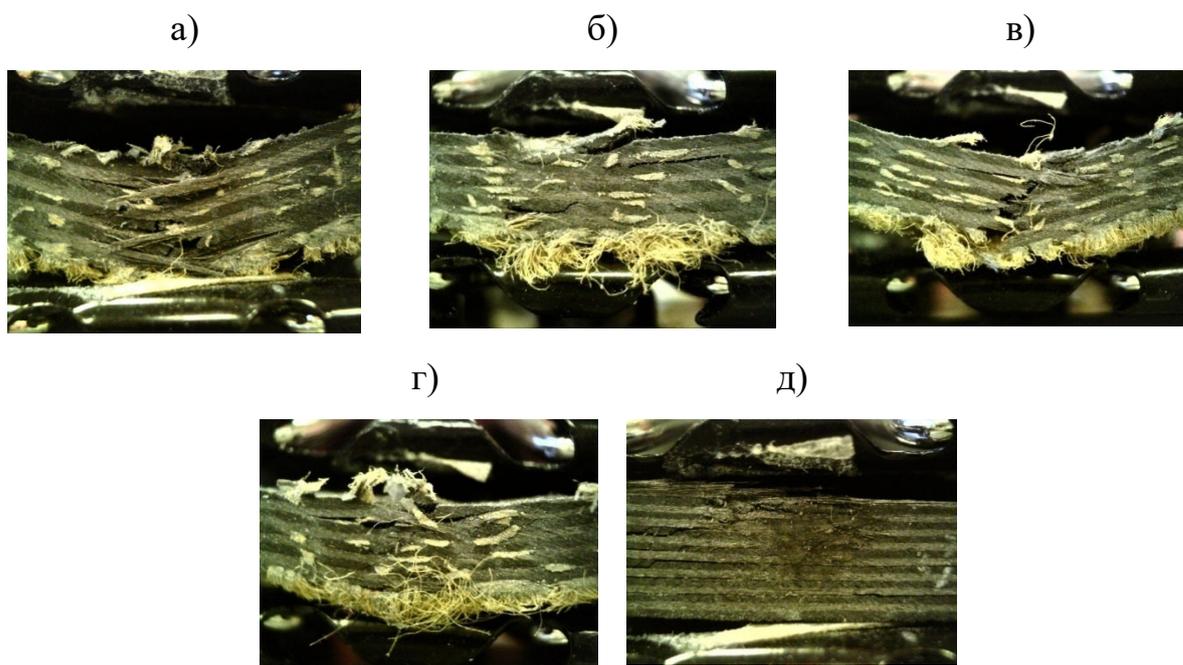


Рисунок 18 – Внешний вид разрушенных образцов нашивных углепластиков, испытанных по схеме трехточечного изгиба. Образцы, выпилены из пластины в направлении 90° . Шаг нашивки углеродного жгута 7 мм, плотность нашивки: а – 47, б – 57, в – 60, г – 70.

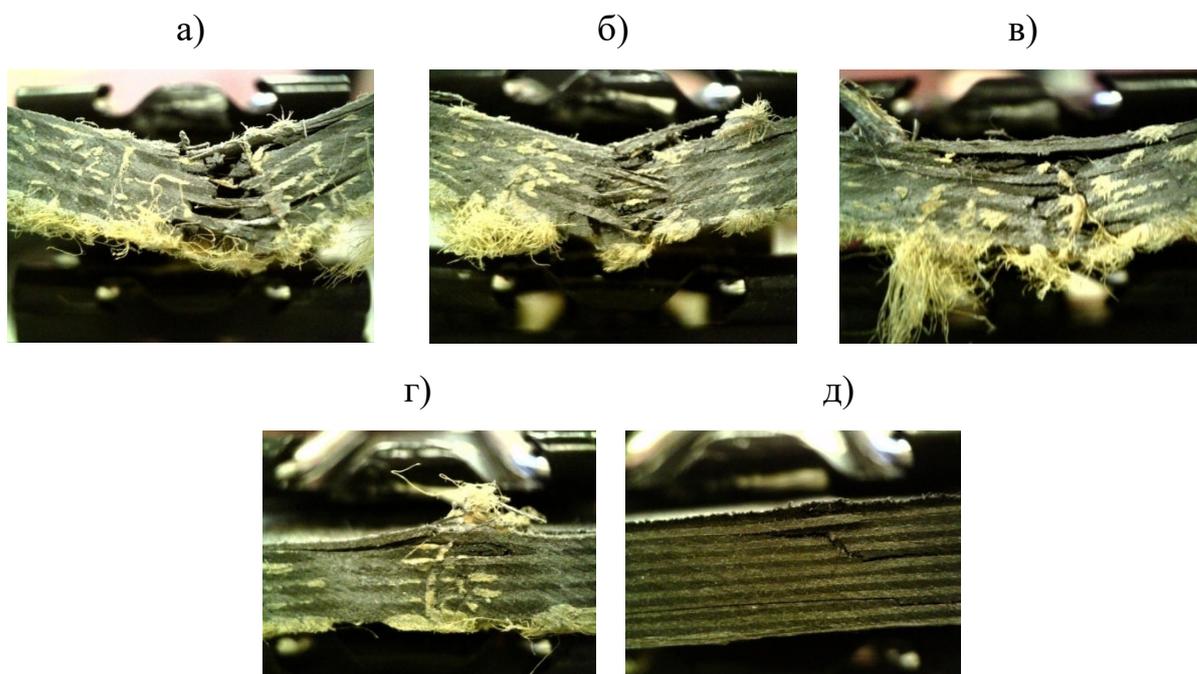


Рисунок 19 – Внешний вид разрушенных образцов нашивных углепластиков, испытанных на четырехточечный изгиб. Образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов. Шаг нашивки углеродного жгута 7 мм, плотность нашивки: а – 47, б – 57, в – 60, г – 70.

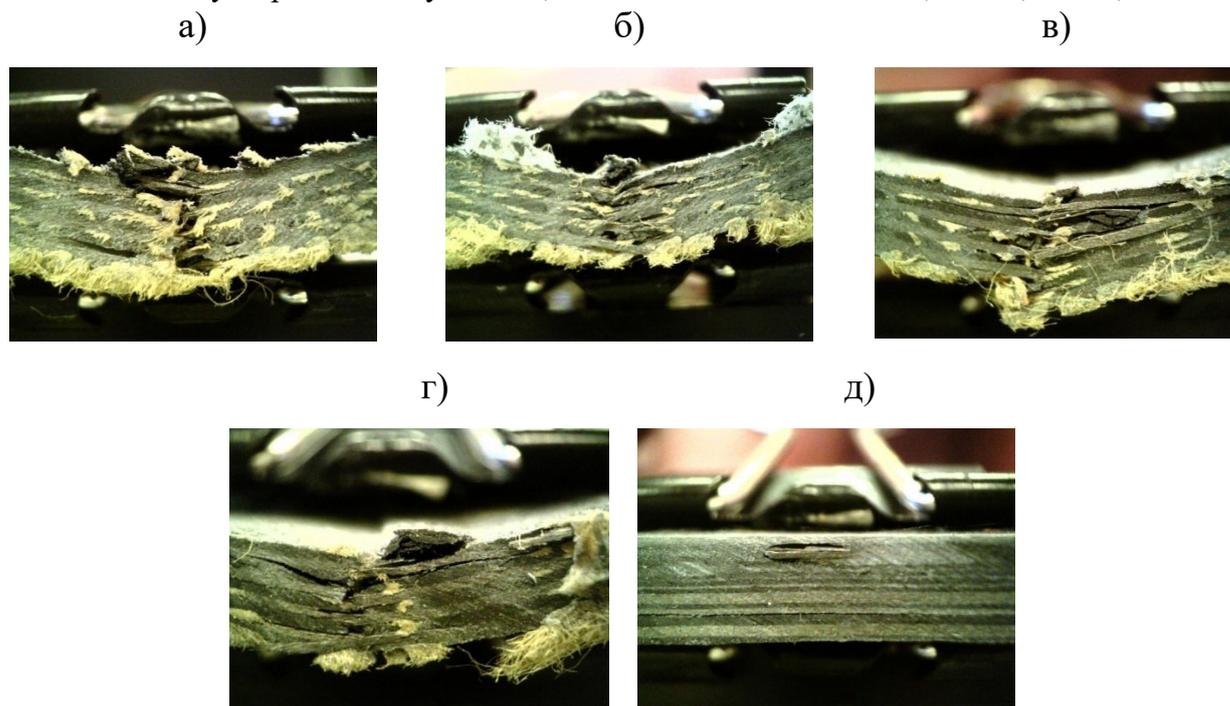


Рисунок 20 – Внешний вид разрушенных образцов нашивных углепластиков, испытанных на четырехточечный изгиб. Образцы, выпилены из пластины в направлении 90 градусов. Шаг нашивки углеродного жгута 7 мм, плотность нашивки: а – 47, б – 57, в – 60, г – 70.

На рисунках 21 – 26 показаны типичные диаграммы нагружения нашивных углепластиков и контрольных образцов. При нагружении нашивных углепластиков по трехточечной или четырехточечной схеме на начальном участке диаграммы нагружения наблюдается линейный участок,

соответствующий упругому поведению образца. Линейный характер изменения нагрузки сохраняется практически до момента достижения предела прочности образца. Такая начальная стадия разрушения не зависит от шага и плотности нашивки, а также характерна для контрольных образцов углепластиков. После достижения предела прочности на диаграммах наблюдается ряд пиков, характеризующих дальнейшее разрушение образца.

Для углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при квазистатической скорости нагружения (рисунки 21 и 22), характерен достаточно высокий уровень пиков на диаграммах, соответствующих вторичному разрушению. Для нашивных материалов колебание нагрузки при росте деформации значительно меньше, чем для непрошивных углепластиков. Это может свидетельствовать о том, что трещина в таких материалах распространяется плавно, без существенных скачков. Напротив, для ненашивных углепластиков трещина распространяется рывками, о чем свидетельствуют высокие вторичные пики нагрузки. При этом воспринимаемая вторичная нагрузка практически сопоставима с пределом прочности. Следует отметить хрупкий характер доразрушения ненашивных материалов. Можно предположить, что вторичное разрушение нашивных углепластиков более пластичное, трещина не распространяется скачкообразно. Такой механизм разрушения связан, в первую очередь, с наличием арамидного волокна в структуре углепластика. Арамидная нить в этом случае замедляет движение трещин, а также их развитие. Следует отметить, что вид диаграмм нагружения практически не меняется при изменении шага или плотности нашивки углеродной нити.

Аналогичная тенденция сохраняется при испытании нашивных материалов в условиях низкоскоростного удара (рисунки 23 и 24). Как и в условиях квазистатического нагружения, на осциллограммах ударного импульса наблюдается зона вторичных разрушений для нашивных материалов. Эта область на осциллограммах даже в случае очень быстрого процесса разрушения характеризуется менее амплитудными скачками

нагрузки по сравнению с ненашивными углепластиковыми. Можно предположить, что даже при ударных нагрузках рост трещины не столь катастрофичен по сравнению с ненашивными материалами. Также, как и для квазистатического нагружения, характер изменения нагрузки при нагружении практически не зависит от шага, плотности нашивки и направления армирования.

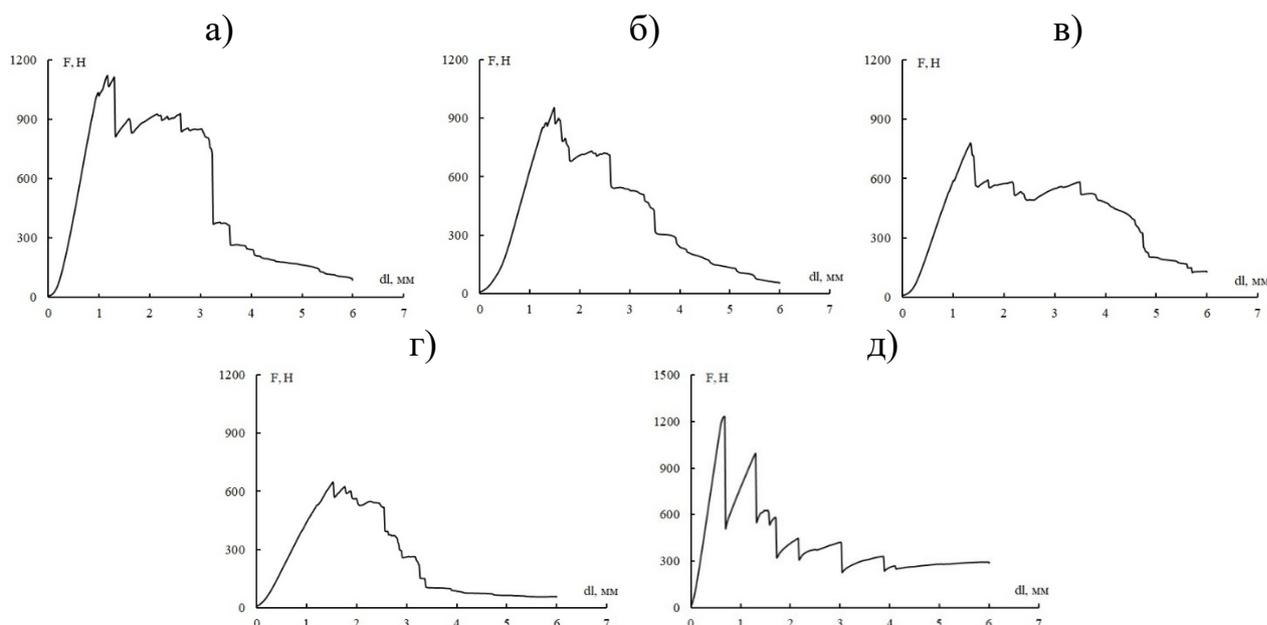
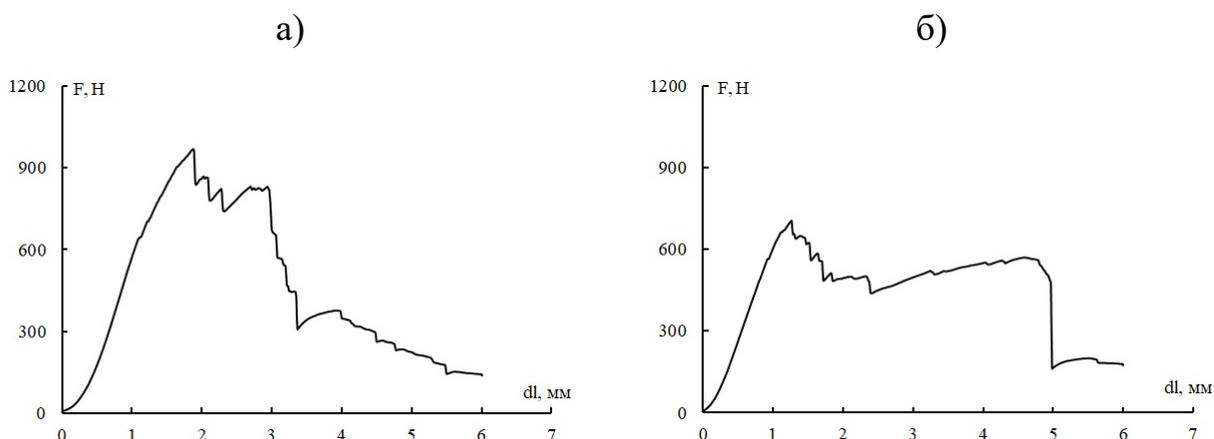


Рисунок 21 – Типичные диаграммы нагружения нашивных углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при квазистатической скорости нагружения. Образцы выпилены из пластины в направлении 0° . Шаг нашивки углеродного жгута 7 мм, плотность нашивки: а – 47, б – 57, в – 60, г – 70; д – контрольные.



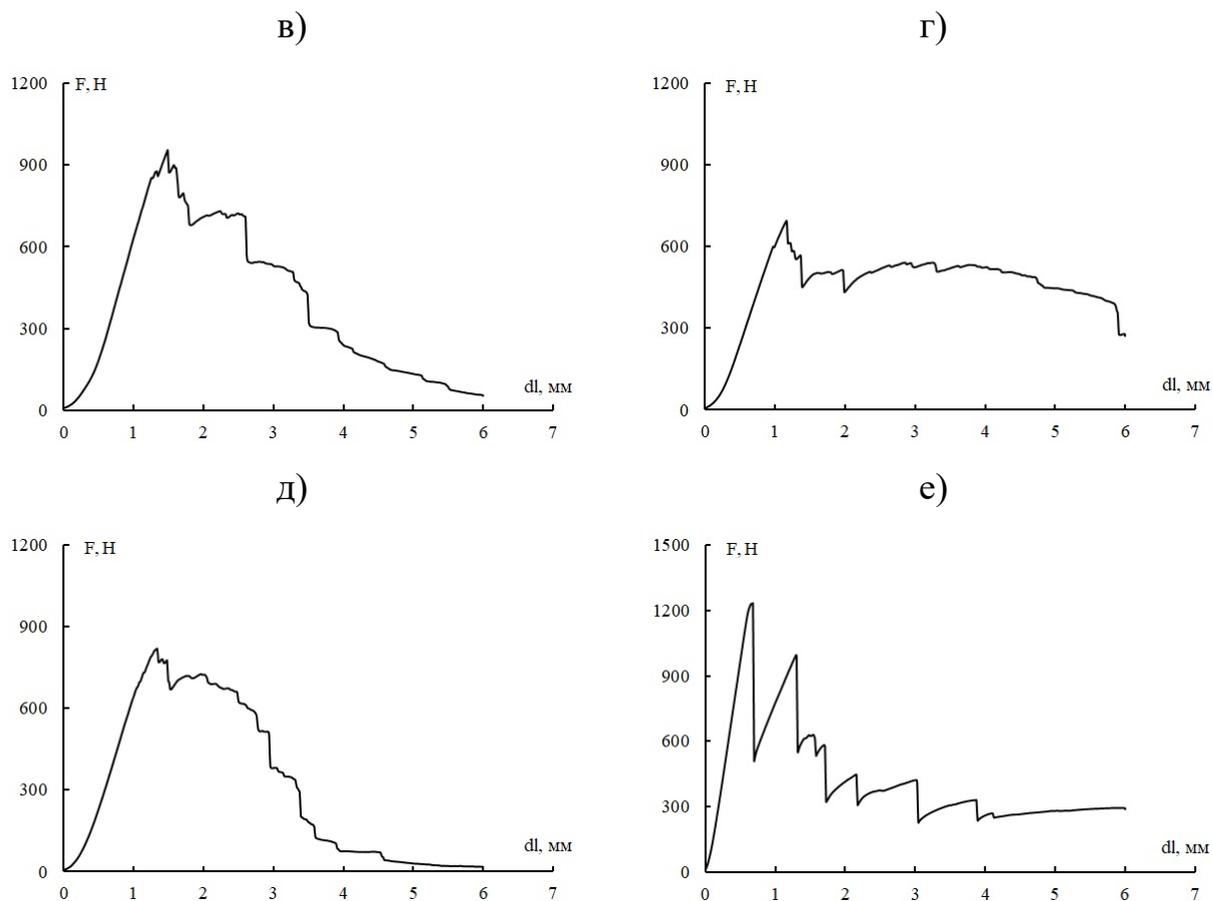
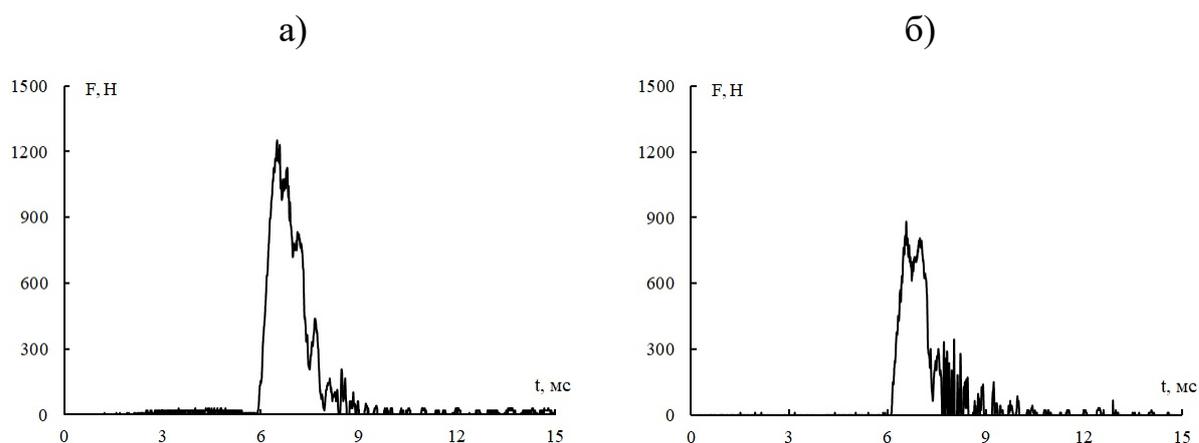


Рисунок 22 – Типичные диаграммы нагружения нашивных углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при квазистатической скорости нагружения. Образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов. Плотность нашивки 57, шаг нашивки углеродного жгута: а – 4, б – 5, в – 7, г – 9, д – 10 мм; е – контрольные.



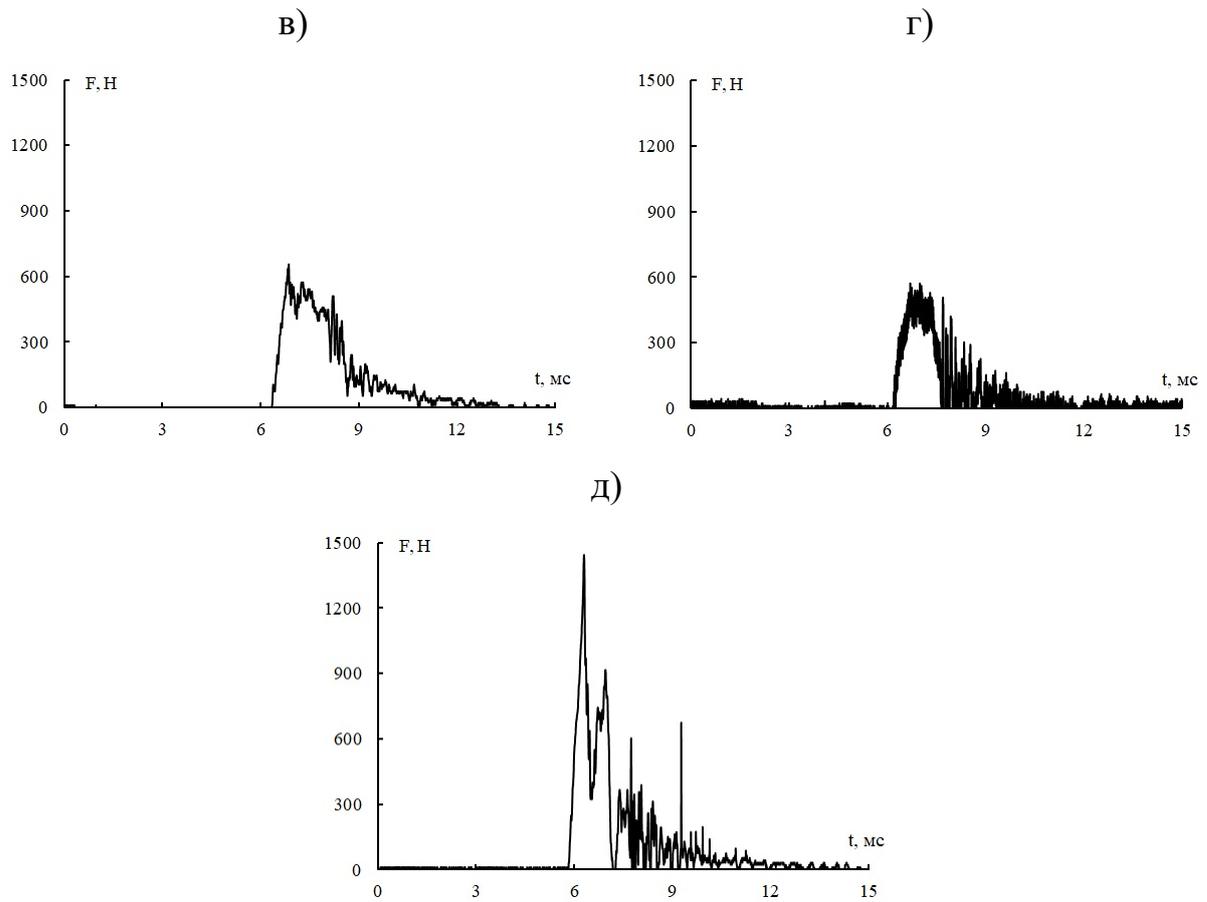
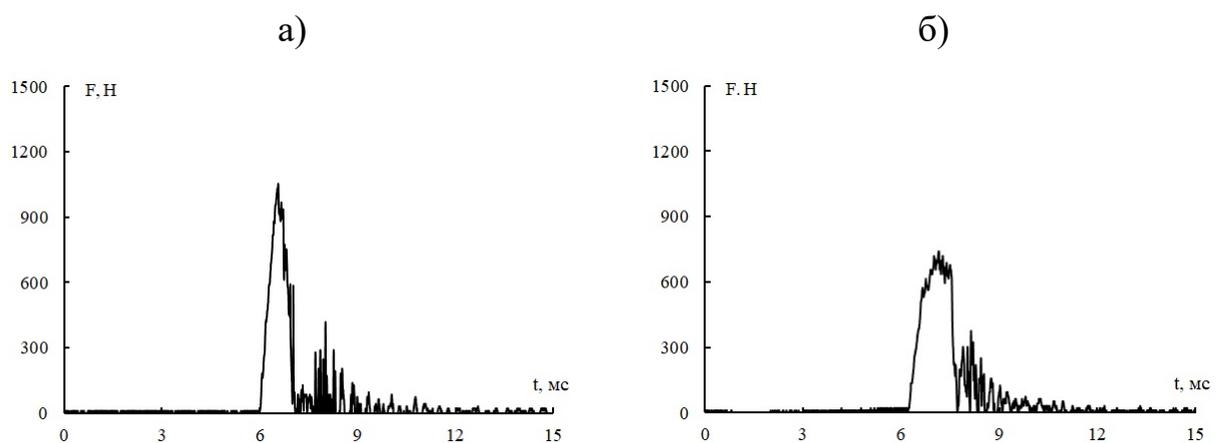


Рисунок 23 – Типичные диаграммы нагружения нашивных углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при динамической скорости нагружения. Образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов. Шаг нашивки углеродного жгута 7 мм, плотность нашивки: а – 47, б – 57, в – 60, г – 70; д – контрольные.



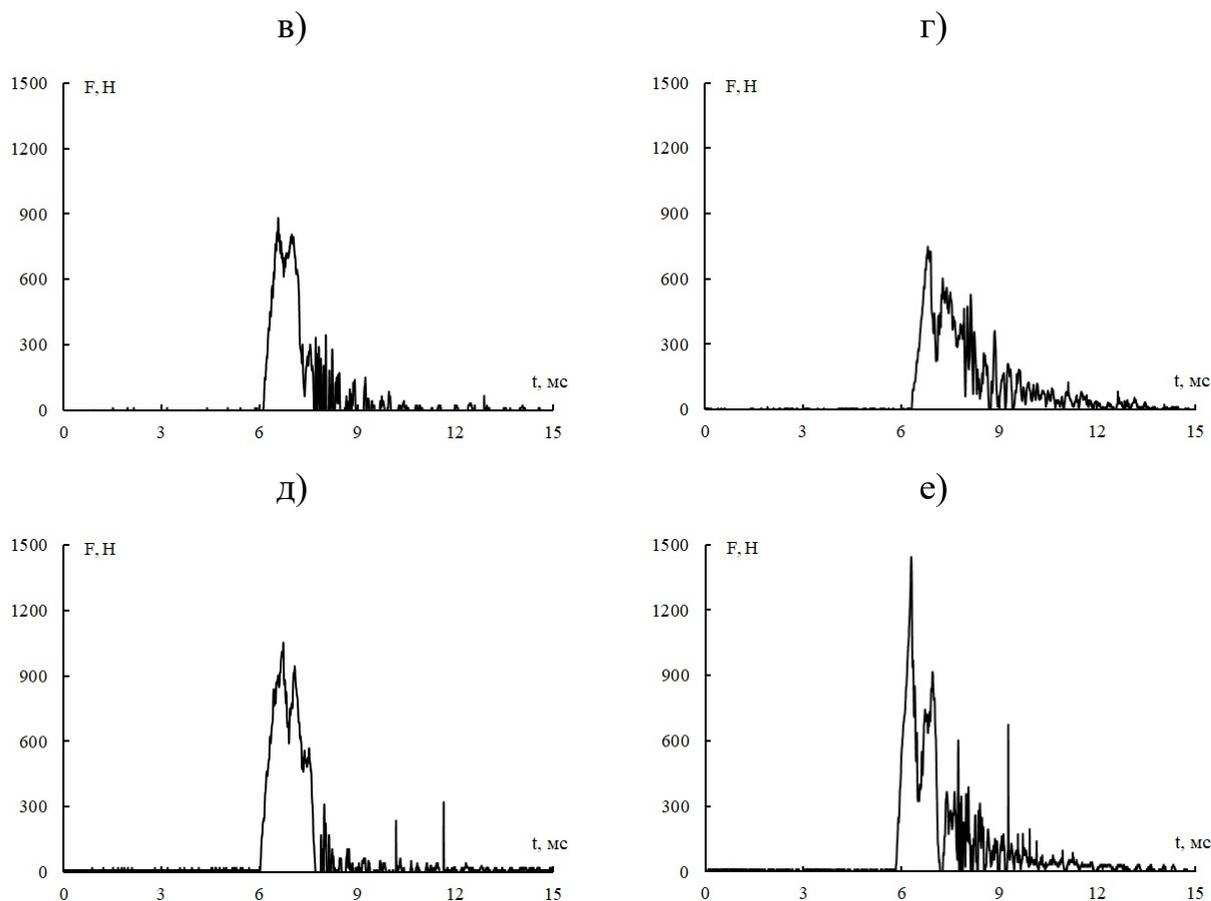


Рисунок 24 – Типичные диаграммы нагружения нашивных углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при динамической скорости нагружения. Образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов. Плотность нашивки 57, плотность нашивки: а – 4, б – 5, в – 7, г – 9, д – 10 мм; е – контрольные.

В случае четырехточечного изгиба (рисунки 25 и 26) поведение нашивных и контрольных углепластиков аналогичны трехточечному изгибу. Также, как и в предыдущих случаях, после достижения предела прочности происходит этап вторичных разрушений. При этом в нашивных материалах распространение трещин происходит менее скачкообразно, чем для ненашивных углепластиков. На характер распространения трещины плотность, шаг нашивки и направление армирования практически не влияют.

Таким образом, диаграммы нагружения нашивных углепластиков показывают, что этап достижения предела прочности не зависит от шага и плотности нашивки и мало отличается от контрольных образцов

углепластиков. Однако, вторичные разрушения нашивных углепластиков происходят менее скачкообразно по сравнению с материалами, полученными по классической технологии. Различие в механизме разрушения связано с тем, что в структуру углепластика включена арамидная нить, которая выполняет функцию стоппера трещины. С другой стороны, эту нить можно рассматривать как концентратор напряжения или дефект, созданный в поперечном сечении образца. Возможно, слишком частая прошивка может значительно ухудшить свойства материала и внести критические дефекты в его структуру.

Из полученных диаграмм нагружения были рассчитаны энергии разрушения и прочности при трехточечном изгибе в условиях квазистатического или динамического нагружения, прочность и модуль упругости при четырехточечном изгибе.

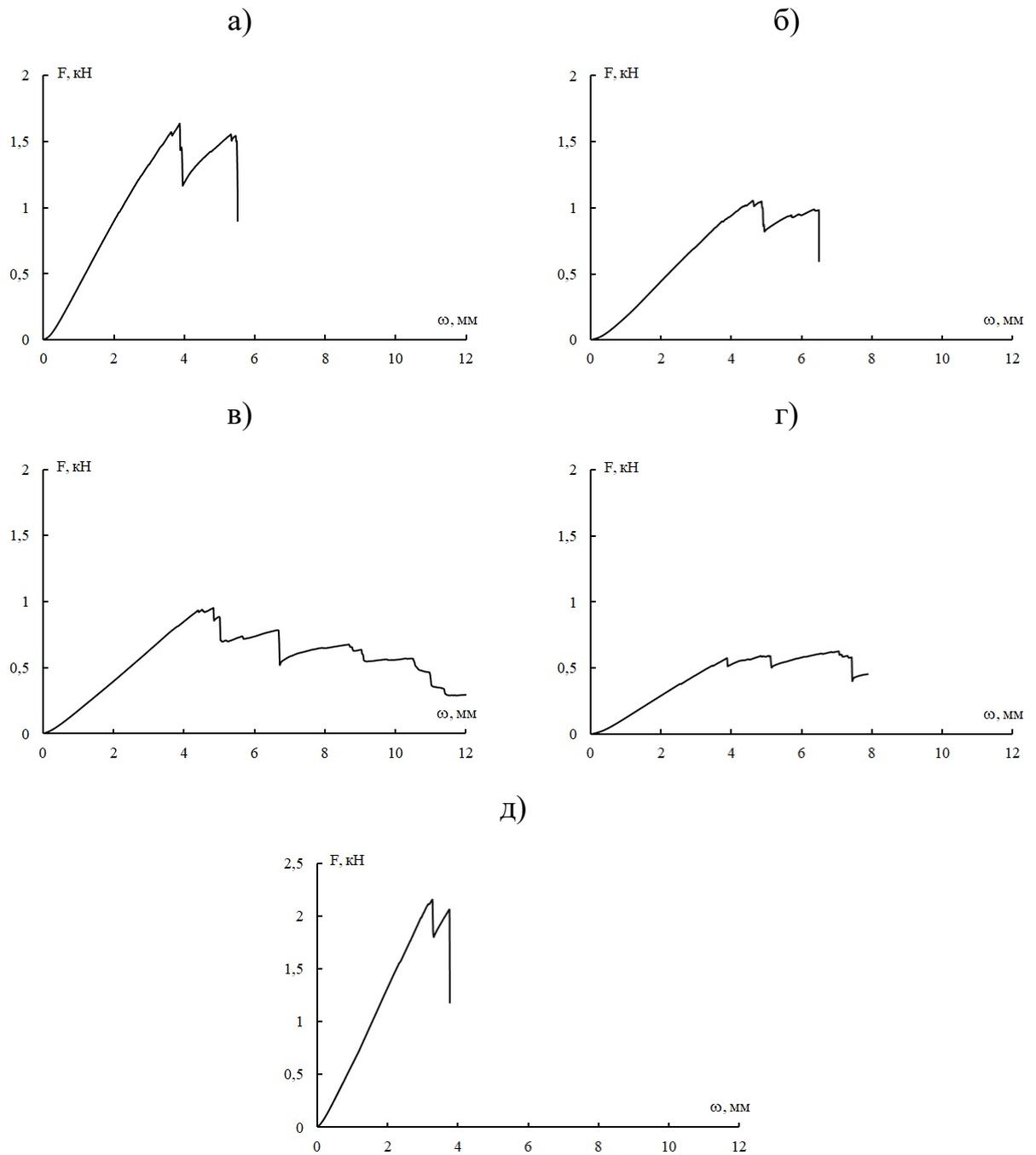


Рисунок 25 – Типичные диаграммы нагружения нашивных углепластиков, испытанных на четырехточечный изгиб. Образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов. Шаг нашивки углеродного жгута 7 мм, плотность нашивки: а – 47, б – 57, в – 60, г – 70, д – контрольные.

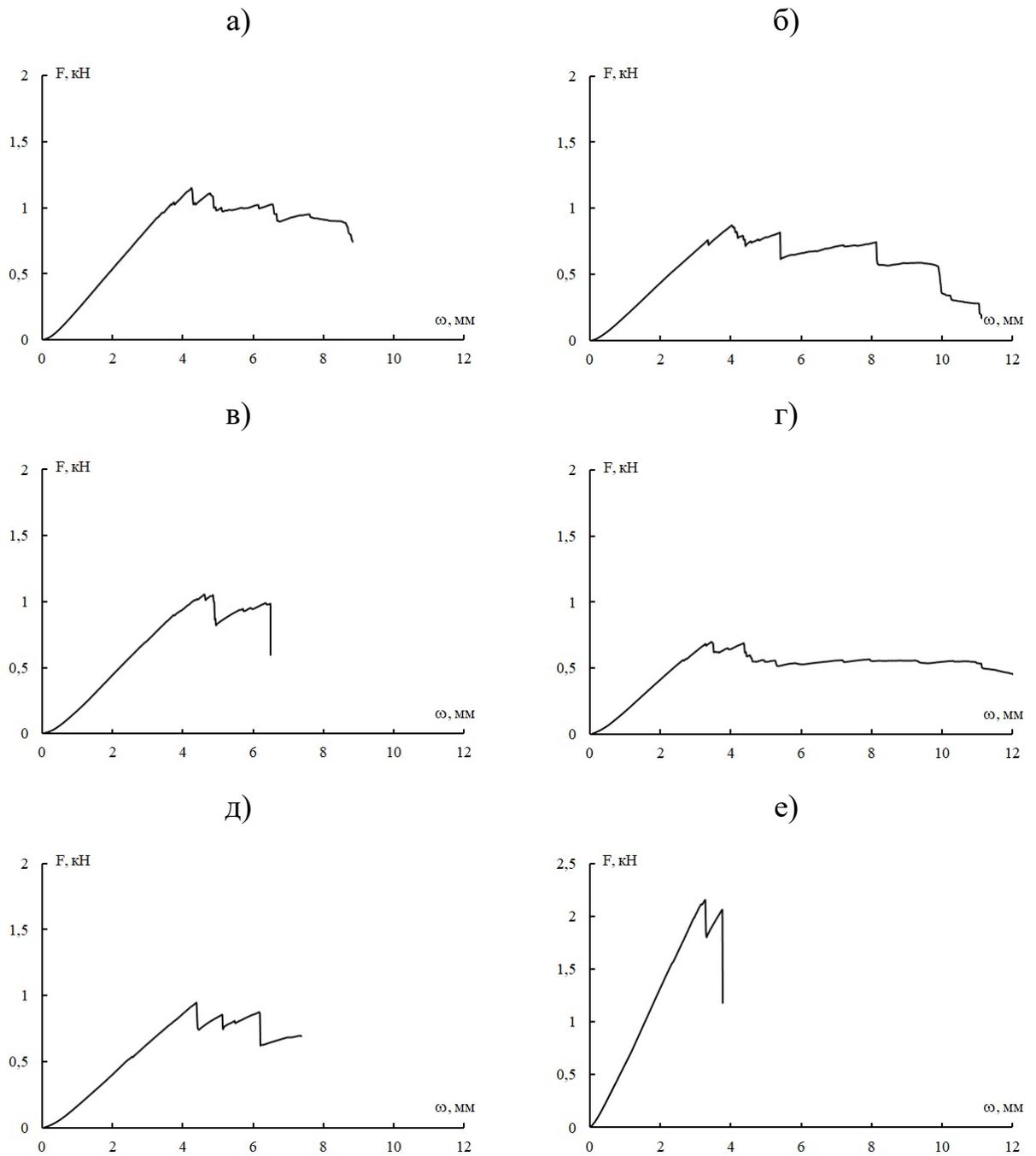
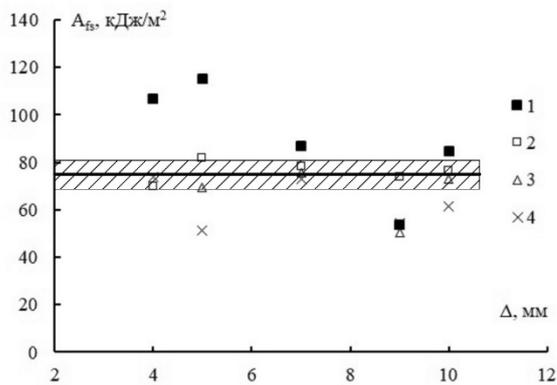


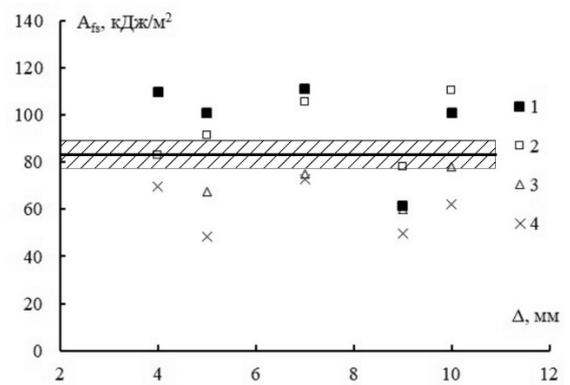
Рисунок 26 – Типичные диаграммы нагружения нашивных углепластиков, испытанных на четырехточечный изгиб. Образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов. Плотность нашивки 57, шаг нашивки углеродного жгута: а – 4, б – 5, в – 7, г – 9, д – 10 мм; е – контрольные.

На рисунках 27 и 28 показаны результаты расчета полной энергии разрушения нашивных и контрольных углепластиков при квазистатическом и динамическом нагружении по трехточечной схеме нагружения в зависимости от шага нашивки. Из рисунков видно, что однозначной зависимости энергии разрушения от исследованного параметра не наблюдается. Однако видно, что уровень энергии разрушения для углепластиков с плотностью нашивки 47 ед. несколько выше (5 – 20%) энергии разрушения контрольного углепластика, уровень энергии A_{fs} которого показан на рисунке горизонтальной линией, а разброс значений этого параметра заштрихованной областью. В случае уменьшения плотности нашивки уровень воспринимаемой энергии разрушения имеет тенденцию к снижению. Так, для материала с плотностью нашивки 57 и 60 ед. энергия разрушения сопоставима с энергией для контрольных образцов. В случае редкой нашивки значения A_{fs} ниже уровня контрольного материала в среднем на 10%. Такое поведение углепластиков вероятно связано с меньшим содержанием арамидной нити в армирующей структуре материала. Таким образом, следует предположить, что в условиях квазистатического нагружения наиболее энергоёмкая структура углепластика достигается в диапазоне плотности прошивки 50-60 ед.

В случае динамического нагружения (рисунок 28) энергия разрушения также не зависит от шага прошивки. Однако в этом случае также сохраняется тенденция уменьшения энергии разрушения с увеличением значения плотности нашивки. Однако следует отметить, что в условиях низкоскоростного удара за счет армирования арамидной нитью энергии разрушения нашивных углепластиков могут быть в среднем выше до 50 % по сравнению с контрольными образцами. Однако, как и в случае квазистатического нагружения, оптимальные параметры нашивки соответствуют плотности 50-60 ед. Следует отметить, что тенденция изменения полной энергии разрушения сохраняется для образцов вырезанных как в направлении 0° , так и в направлении 90° .

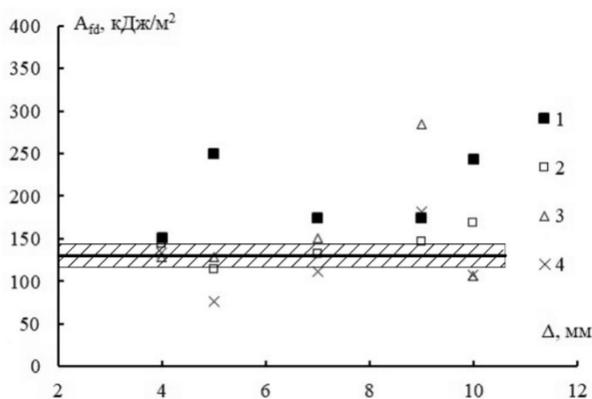


а)

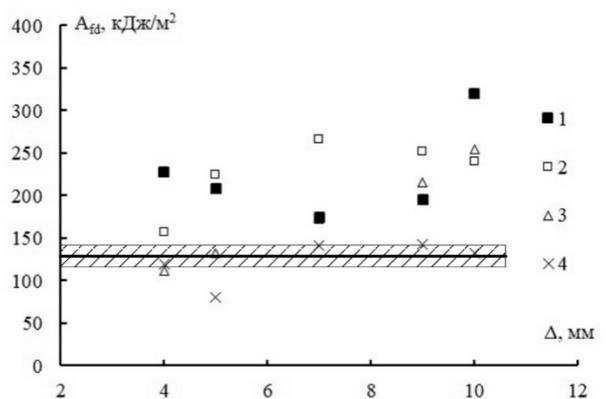


б)

Рисунок 27 – Зависимость энергии A_{fs} разрушения нашивных углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при квазистатической скорости нагружения, от шага нашивки Δ . а – образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов, б – образцы, выпилены из пластины в направлении 90 градусов. Плотность нашивки: 1 – 47, 2 – 57, 3 – 60, 4 – 70



а)



б)

Рисунок 28 – Зависимость энергии A_{fd} разрушения нашивных углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при динамической скорости нагружения, от шага нашивки Δ . а – образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов, б – образцы, выпилены из пластины в направлении 90 градусов. Плотность нашивки: 1 – 47, 2 – 57, 3 – 60, 4 – 70.

На рисунках 29 и 30 показано, как изменяется полная энергия разрушения при изменении плотности нашивки углеродной нити. Также, как и на зависимостях, показанных выше для условий квазистатического нагружения, определенной тенденции изменения исследуемой величины получить не удалось. Однако видно, что материалы с плотностью нашивки более 60 ед. имеют уровень энергии A_{fs} ниже, чем для контрольных образцов углепластиков. В остальном диапазоне энергия разрушения углепластиков сопоставима с контрольными образцами. Следует отметить, что шаг нашивки существенно не влияет на энергию разрушения материала.

В случае динамического нагружения (рисунок 30) энергия разрушения всех исследованных нашивных углепластиков выше, чем для контрольного материала, и также мало зависит от шага и плотности нашивки. Следует отметить, что в диапазоне плотности 50 – 60 ед. и шаге 7 – 10 мм значения энергии разрушения превосходят контрольные значения на 50 %. Такое поведение материалов можно связать с меньшей повреждаемостью углеродного волокна во время нашивки и меньшим количеством прошивок, перпендикулярных плоскости образца. В результате количество создаваемых дефектов не влечет катастрофическое изменение энергии разрушения нашивных материалов.

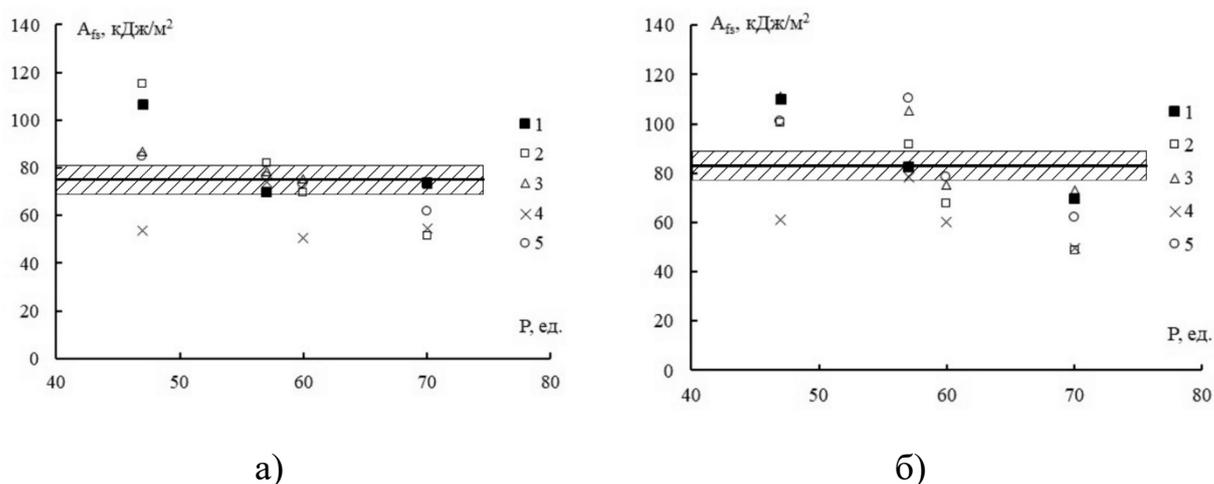


Рисунок 29 – Зависимость энергии A_{f3} разрушения нашивных углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при квазистатической скорости нагружения, от плотности нашивки P . а – образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов, б – образцы, выпилены из пластины в направлении 90 градусов. Шаг нашивки: 1 – 4, 2 – 5, 3 – 7, 4 – 9, 5 – 10 мм.

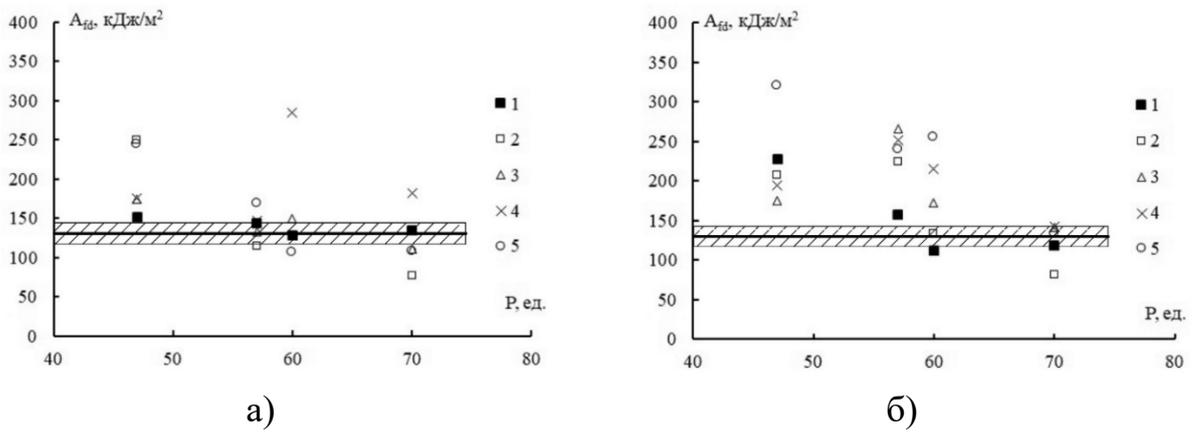


Рисунок 30 – Зависимость энергии A_{fd} разрушения нашивных углепластиков, испытанных на трехточечный изгиб при динамической скорости нагружения, от плотности нашивки P .

а – образцы выпилены из пластины в направлении 0° , б – образцы выпилены в направлении 90° . Шаг нашивки: 1 – 4, 2 – 5, 3 – 7, 4 – 9, 5 – 10 мм.

На рисунках 31 – 34 показаны значения прочности при изгибе для динамического и квазистатического нагружения от параметров нашивки углеродного жгута. Также, как и для энергии разрушения, явных зависимостей прочности при изгибе от шага или плотности нашивки установить не удалось. Однако также, как и для энергии разрушения, можно видеть, что наиболее оптимальные параметры нашивки для шага лежат в диапазоне 7-10 мм для плотности – в диапазоне 50-60 ед. При этом на полученный оптимум не влияет то, в каком направлении были вырезаны образцы из исходной пластины.

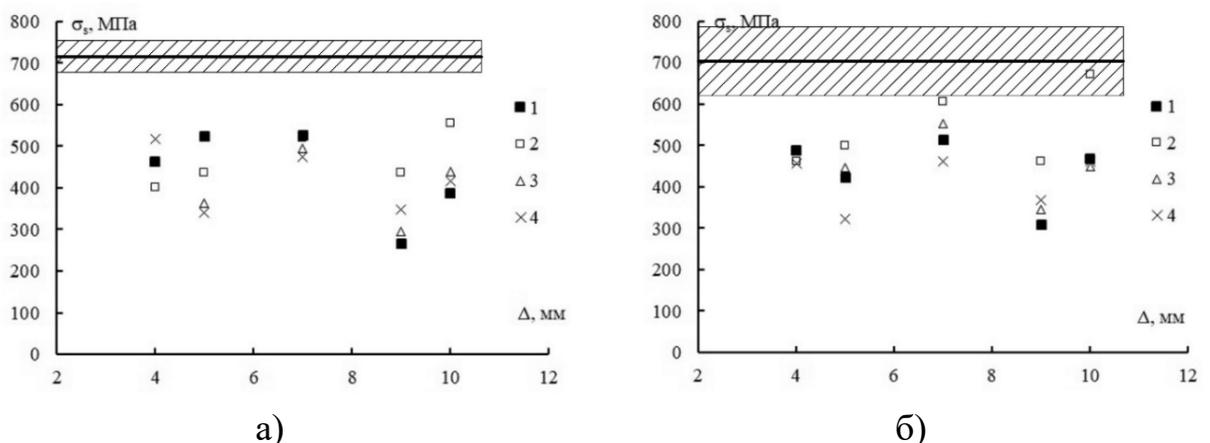
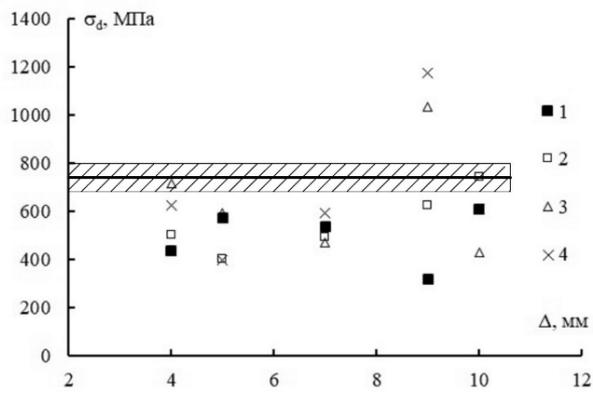
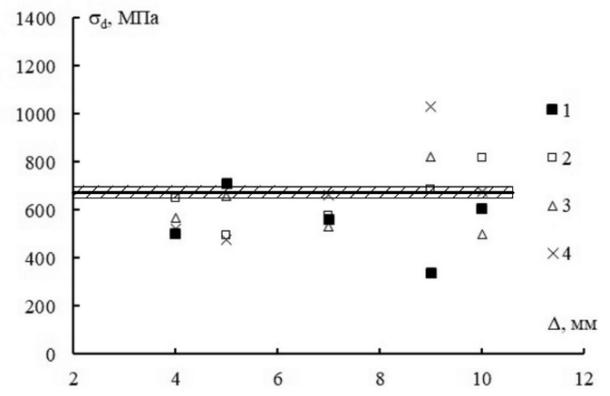


Рисунок 31 – Изменение прочности σ_s при изгибе в условиях квазистатического нагружения при разном шаге нашивки Δ углеродного жгута. а – образцы выпилены из пластины в направлении 0° , б – образцы выпилены в направлении 90° . Плотность нашивки: 1 – 47, 2 – 57, 3 – 60, 4 – 70.

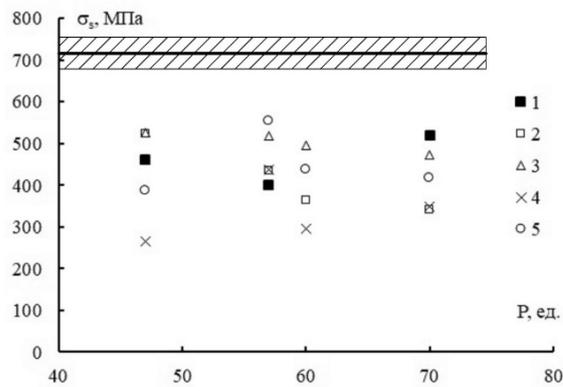


а)

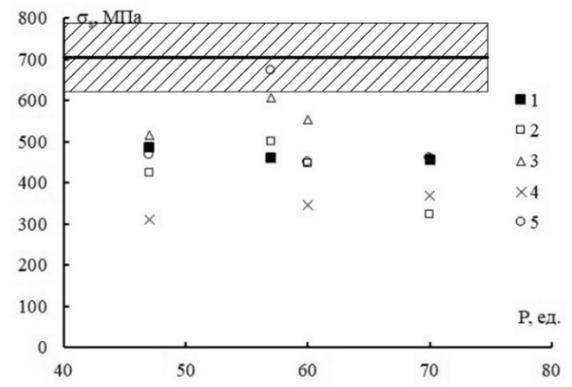


б)

Рисунок 32 – Изменение прочности σ_d при изгибе в условиях низкоскоростного удара при разном шаге нашивки Δ углеродного жгута. а – образцы выпилены из пластины в направлении 0° , б – образцы выпилены в направлении 90° . Плотность нашивки: 1 – 47, 2 – 57, 3 – 60, 4 – 70.



а)



б)

Рисунок 33 – Изменение прочности σ_s при изгибе в условиях квазистатического нагружения при разной плотности нашивки P углеродного жгута. а – образцы, выпилены из пластины в направлении 0 градусов, б – образцы, выпилены из пластины в направлении 90 градусов. Шаг нашивки: 1 – 4, 2 – 5, 3 – 7, 4 – 9, 5 – 10 мм.

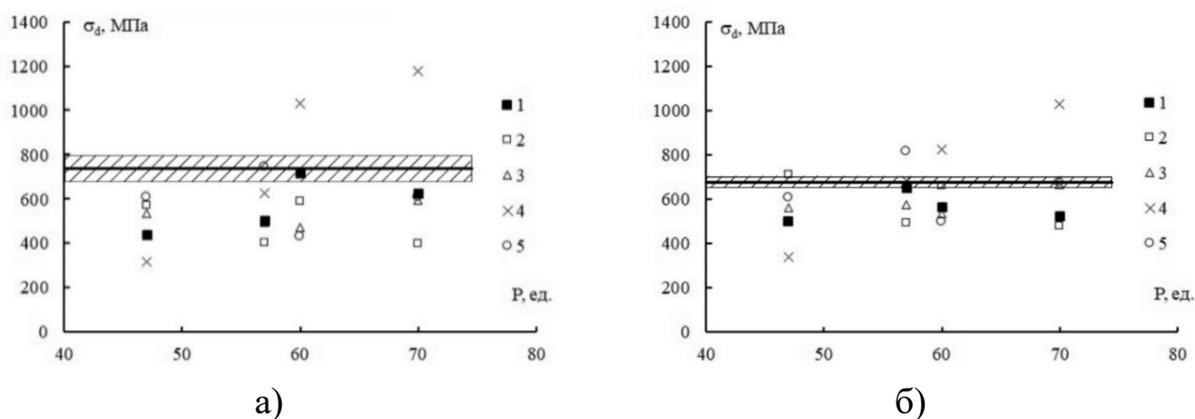


Рисунок 34 – Изменение прочности σ_d при изгибе в условиях низкоскоростного удара при разной плотности нашивки P углеродного жгута. а – образцы выпилены из пластины в направлении 0° , б – образцы выпилены в направлении 90° . Шаг нашивки: 1 – 4, 2 – 5, 3 – 7, 4 – 9, 5 – 10 мм

На рисунках 35 и 36 показано изменение прочности при четырехточечном изгибе при варьировании шага нашивки и плотности нашивки углеродного жгута. Оказалось, что при четырехточечном изгибе прочность малочувствительна к изменениям технологических параметров. При этом абсолютные значения прочности почти в два раза ниже прочности, соответствующей ненашивным (контрольным) образцам углепластиков. Разница в прочности при изгибе для нашивных материалов составляет 30–40 % в зависимости от шага или плотности прошивки. Следует отметить, что материалы с плотностью нашивки более 60 ед. имеют меньшую прочность, чем материалы с плотностью нашивки 50–60 ед. Также необходимо обратить внимание на то, что довольно большой разброс значений прочности снижает полученные эффекты.

Аналогичная ситуация сохраняется и для модуля упругости при четырехточечном изгибе (рис. 37 и 38). В этом случае независимость модуля упругости проявляется более выражено вследствие меньшего разброса данных. Однако видно, что при частом шаге нашивки (4мм) модуль упругости меньше на 10–15 %, чем для более редкого шага. Тенденция сохраняется для материалов, испытанных в обоих направлениях. Можно предположить, что модуль упругости достаточно чувствителен к дефектной структуре материала, создаваемой при армировании в перпендикулярном

направлении. Во всех случаях модуль упругости при четырехточечном изгибе нашивных углепластиков ниже, чем для контрольного материала, в два раза. Также, как и в случае трехточечного нагружения, удастся выделить оптимальный диапазон нашивки углеродного жгута. Оптимальный диапазон плотности нашивки лежит в пределах 50–60 ед., шаг нашивки в пределах 7–10 мм. При этом прочность и модуль упругости при чистом изгибе имеют значительную чувствительность к дефектам структуры материала, создаваемых при нашивке. Об этом свидетельствуют низкие значения прочности и модуля по сравнению с контрольными образцами.

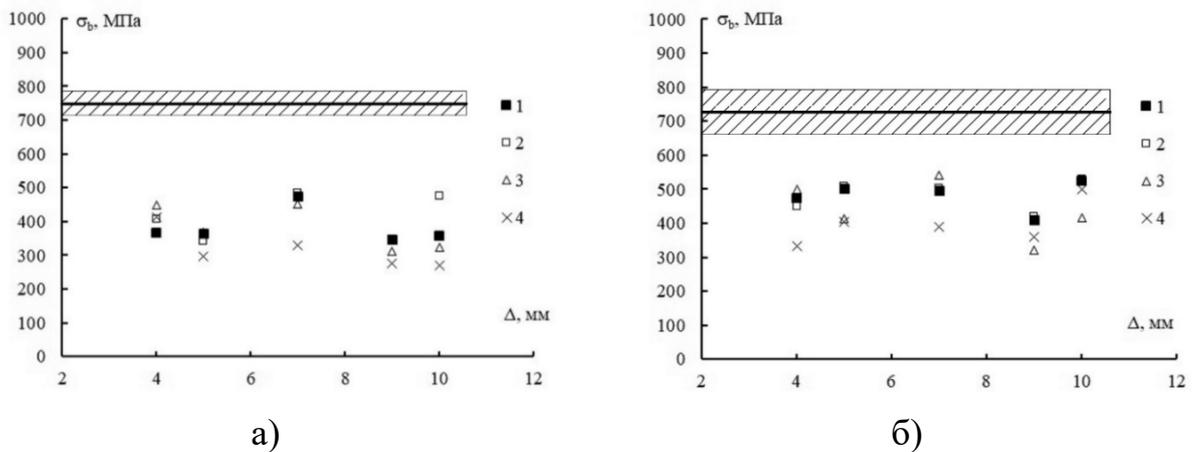


Рисунок 35 – Прочность σ_b при четырехточечном изгибе нашивных углепластиков при разном шаге стежка Δ . а – образцы выпилены из пластины в направлении 0° , б – образцы выпилены в направлении 90° . Плотность нашивки: 1 – 47, 2 – 57, 3 – 60, 4 – 70

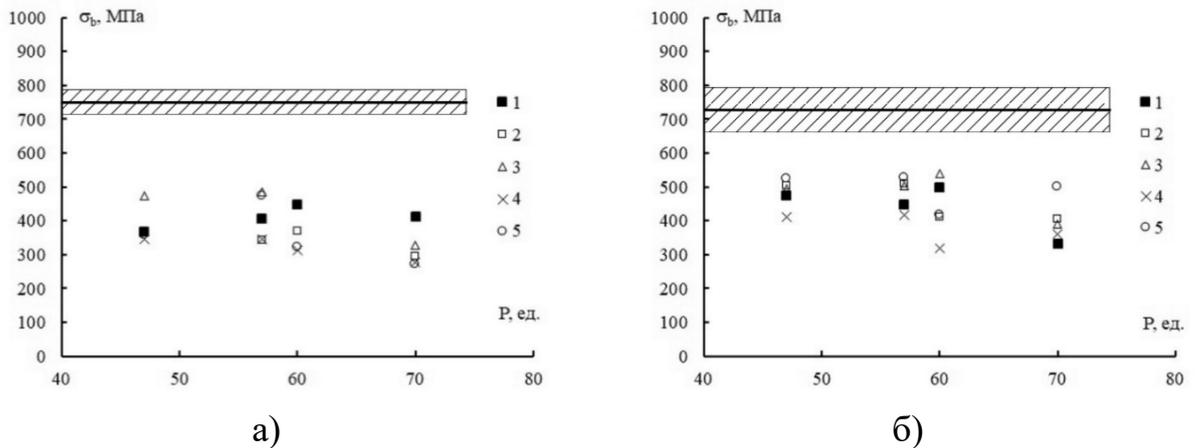


Рисунок 36 – Прочность σ_b при четырехточечном изгибе нашивных углепластиков при разной плотности нашивки P углеродного жгута. а – образцы выпилены из пластины в направлении 0° , б – образцы выпилены в направлении 90° . Шаг нашивки: 1 – 4, 2 – 5, 3 – 7, 4 – 9, 5 – 10 мм

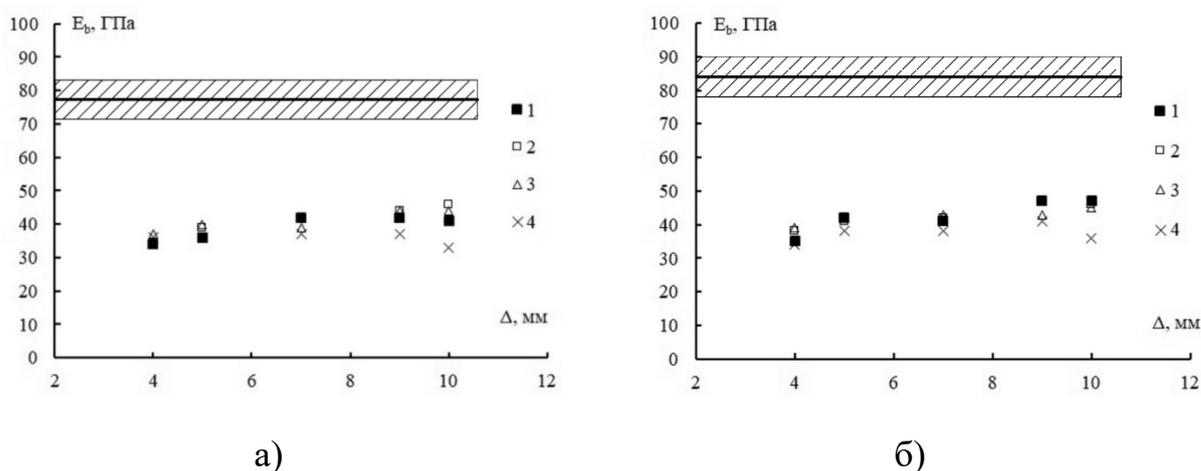


Рисунок 37 – Модуль упругости E_b при четырехточечном изгибе нашивных углепластиков при разном шаге стежка Δ . а – образцы выпилены из пластины в направлении 0° , б – образцы выпилены в направлении 90° . Плотность нашивки: 1 – 47, 2 – 57, 3 – 60, 4 – 70.

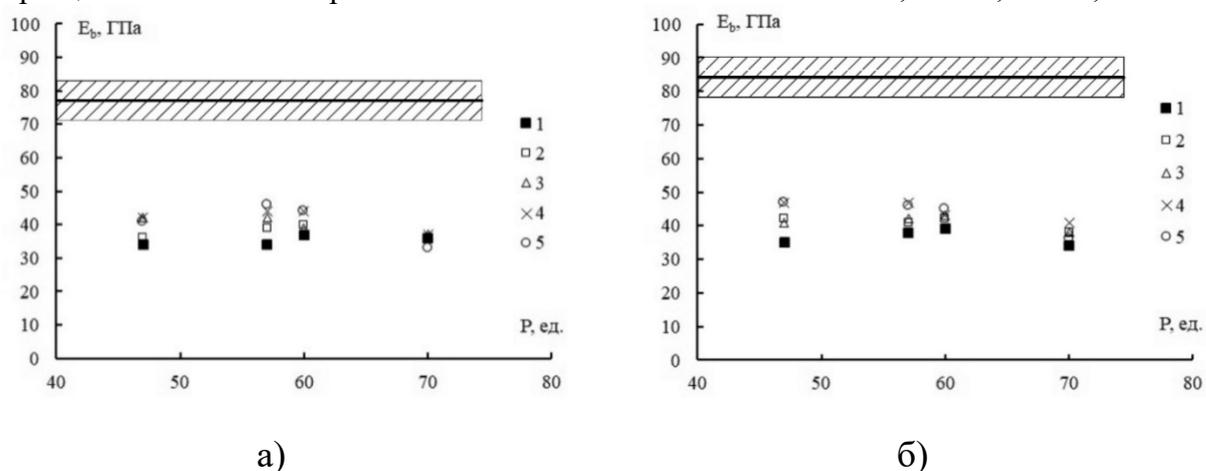


Рисунок 38 – Модуль упругости E_b при четырехточечном изгибе нашивных углепластиков при разной плотности нашивки P углеродного жгута. а – образцы выпилены из пластины в направлении 0° , б – образцы, выпилены из пластины в направлении 90° . Шаг нашивки: 1 – 4, 2 – 5, 3 – 7, 4 – 9, 5 – 10 мм.

На рисунках 39 и 40 приведено сравнение полученных значений модуля сдвига нашивных углепластиков с модулем сдвига контрольного материала в направлении армирования $+45^\circ$ и -45° . Как и в случае модуля упругости при изгибе, модуль сдвига нашивных материалов почти в два раза ниже, чем для углепластика, полученного прессованием. Четко выраженных зависимостей модуля G от шага или плотности нашивки получить не удастся. Однако можно заметить тенденцию увеличения модуля сдвига при шаге нашивки 7 – 10 мм для любой плотности нашивки. Следует отметить довольно большой разброс данных, который непосредственно связан с

дефектной структурой материала, вызванной перпендикулярными прошивками.

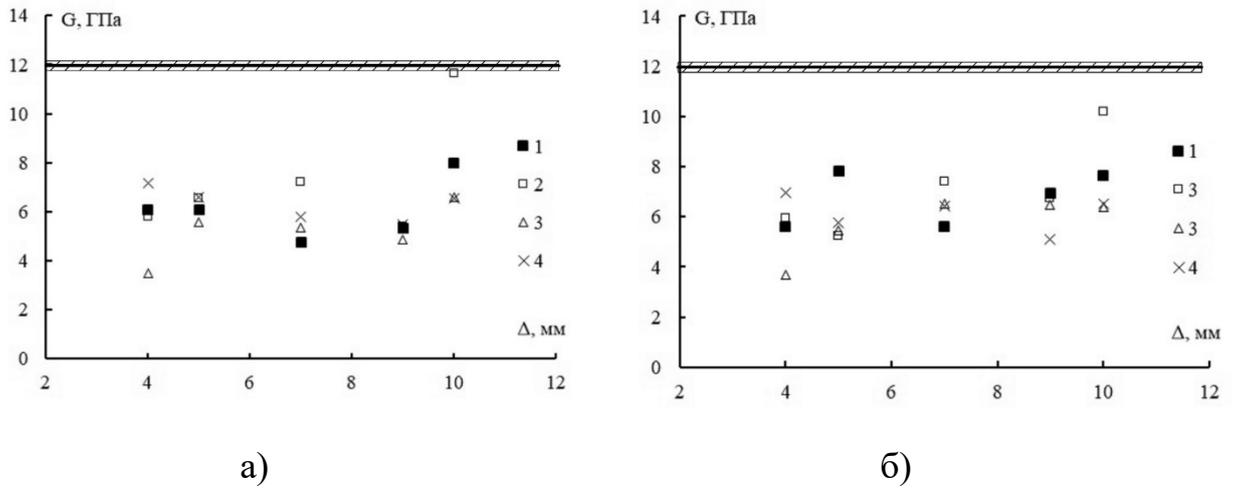


Рисунок 39 – Модуль сдвига G нашивных углепластиков при разном шаге стежка Δ .
 а – образцы испытаны в направлении $+45$ градусов,
 б – образцы испытаны в направлении -45 градусов.
 Плотность нашивки: 1 – 47, 2 – 57, 3 – 60, 4 – 70.

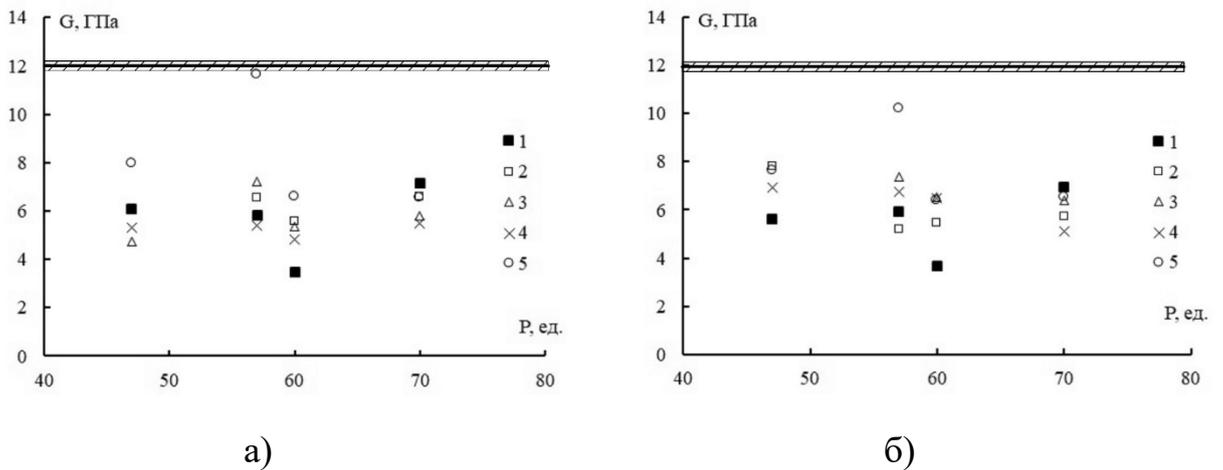


Рисунок 40 – Модуль сдвига G нашивных углепластиков при разной плотности нашивки P
 а – образцы испытаны в направлении $+45$ градусов,
 б – образцы испытаны в направлении -45 градусов.
 Шаг нашивки: 1 – 4, 2 – 5, 3 – 7, 4 – 9, 5 – 10 мм.

Обобщая результаты экспериментов, можно заметить, что, несмотря на отсутствие четких зависимостей физико-механических свойств от технологических параметров нашивки, удастся выделить оптимальный диапазон значений шага и плотности нашивки углеродного жгута. Основываясь на результатах трехточечного изгиба можно утверждать, что максимального результата можно достичь при плотности нашивки 50 – 60 ед. и шаге 7 – 10 мм. При этом энергия разрушения нашивных материалов при квазистатическом нагружении сопоставима с энергией для контрольных

образцов, в случае низкоскоростного удара – выше на 50%. Прочности при трех- и четырехточечном изгибе оказались менее чувствительны к изменениям технологических параметров. Однако и в этом случае сохраняется тенденция увеличения прочности при изгибе в диапазоне плотностей нашивки 50 – 60 ед. При этом заметно явное снижение прочности при плотности нашивки более 60 ед. на 10 – 15 %. Исследования модуля при изгибе и модуля сдвига говорят о том, что при частом шаге пошивки (4 мм) значения E_b и G несколько (до 20 %) ниже, чем для материалов с шагом нашивки 7 – 10 мм. Таким образом, оптимальным представляется режим нашивки с плотностью 50 – 60 ед. и шагом нашивки более 7 ед. Вероятно, увеличение шага нашивки повлечет создание менее дефектной структуры с более высокими прочностными характеристиками. С другой стороны, снижение количества арамидного волокна может заметно сказаться на ударостойкости материала. Также следует отметить, что при короткобалочном изгибе нашивных материалов нормальные напряжения преобладают над трансверсальными. Это дает надежду на то, что готовое изделие будет обладать высокими сдвиговыми свойствами. В качестве заключения в таблице 16 приведены свойства нашивных углепластиков, полученных в оптимальном диапазоне технологических параметров и контрольного материала, полученного прессованием.

Таблица 16 – Сравнение физико-механических свойств углепластиков, полученных при оптимальных технологических параметрах нашивки (шаг нашивки 7 – 10 мм, плотность нашивки 50 -60 ед.) углеродного жгута, с ненашивными углепластиками.

Материал Параметр	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

На основании полученных результатов испытаний плоских образцов были изготовлены образцы лопаток рабочего колеса центрального компрессора МГТД с плотностью укладки углеродного ровинга $\rho=57$ у.е. и шагом прошивки (длиной стежка) $\Delta=7$ мм. После чего были проведены сравнительные испытания лопаток компрессора из ПКМ, преформы которых созданы по непрошивной и нашивной технологиям (таблица 17):

- выкладкой углеродной ткани на основе углеродного волокна T700;
- выкладкой углеродной ткани на основе углеродного волокна IMS 65;
- направленной нашивкой углеродного ровинга IMS 65.

Сравнение характеристик образцов лопаток компрессора показывает, что прочность на изгиб нашивных материалов, полученных в оптимальной области нашивки в среднем на 25-30% ниже, чем для непрошивных испытываемых углепластиков. Тем не менее, учитывая, что в нашивных преформах реализовать ориентированную волокнистую структуру крайне сложно, снижение прочности при изгибе на указанную величину вполне приемлемо, поскольку в этом случае, при том что сохраняется достаточная прочность на изгиб и упругость изготавливаемых на основе разработанного способа конструктивных элементов, готовое изделие значительно выигрывает в прочности на сдвиг.

Увеличение предела прочности на сдвиг даже на 10% позволяет сохранять в большей степени (по сравнению с непрошивными материалами) целостность конечного изделия, не давая ему даже в случае режимов эксплуатации, близких к разрушению, распадаться на осколки. Для элементов ГТД эта характеристика очень важна, поскольку образовавшиеся даже в незначительном количестве осколки зачастую обладают очень высокой кинетической энергией, и способны повредить остальные детали двигателя. Таким образом, увеличение предела прочности на сдвиг также

дополнительно обеспечивает безопасность обслуживающего персонала.

Таблица 17 – Сравнение свойств лопаток компрессора

Характеристика	Обозначение, размерность	T700	IMS 65	IMS 65
		[0; 90]	[0; +45; 0; -45]	[0; +45; 90; -45]
		Значение без нашивки ровинга	Значение без нашивки ровинга	Значение с нашивкой ровинга (ширина укладки 57, шаг стежка 7)
Модуль продольной упругости при растяжении	E_{11} , ГПа	88,75	77,86	59,23
Коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении утка при растяжении в направлении основы	ν_{12}	0,042	0,324	0,430
Коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении толщины при растяжении в направлении основы	ν_{13}	0,481	0,038	0,259
Модуль сдвига в плоскости армирования	G_{12} , ГПа	6,24	18,86	18,020
Модуль сдвига в межслоевой плоскости при 4-х точечном несимметричном изгибе	G_{13} , ГПа	1,87	3,07	3,400
Предел прочности при растяжении и нормальной температуре	σ_{11} , МПа	656	1258	503,62
Предел прочности на сдвиг в плоскости армирования	τ , МПа	83,7	110,76	142,54
Предел прочности на межслоевой сдвиг методом 4-х точечного несимметричного изгиба	τ_{13} , МПа	33,4	47,37	53,34

Выводы по главе 4

1. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сравнить технологические параметры изготовления преформ элементов ГТД из ПКМ. Данные параметры (плотность укладки и шаг прошивки) существенно влияют на прочностные характеристики преформ и углепластиков на основе преформ, изготовленных методом нашивки углеродного ровинга на вымываемую подложку.

2. Результаты испытаний получаемых образцов углепластиков на основе преформ, изготовленных с разной плотностью укладки ρ и шагом прошивки Δ , показали, что предпочтительными параметрами являются $\rho = 2,85-3,00$ мм (или 57-60 у.е.) с $\Delta = 7-10$ мм, которые позволяют достичь наиболее высоких показателей прочности на изгиб и модуля упругости готовых изделий.

3. Для нашивных материалов на основе углеродного волокна со схемой армирования $[0;90]$ максимальных физико-механических свойств удалось достичь в диапазоне шага нашивки от 7 до 10 мм при плотности нашивки 57 - 60 у.е., где 1 у.е. равен 0,05 мм. При этом прочность при изгибе составляет порядка от 420 до 690 МПа, модуль упругости 39 - 47 ГПа (без учета погрешности измерений).

В неоптимальном диапазоне нашивки значения прочности при изгибе тестируемых образцов оказались ниже (от 10 до 20 %), а модули упругости: на 10-15%. Например, при более плотной нашивке (шаг 4 - 5 мм, плотность от 47 до 70 мм) значения прочности составили от 380 до 610 МПа, модули упругости – 35- 40 ГПа.

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

Как было отмечено ранее (в главе 1), технология автоматизированной нашивки ровинга позволяет производить укладку армирующего материала в строгом соответствии с направлением действующей нагрузки. Это приводит к возможности значительно повысить физико-механические свойства изделий, снизить их массу и габариты. Однако ряд особенностей сдерживает широкое применение такой технологии при изготовлении различных деталей и конструкций и не позволяет в полной мере реализовать их высокие физико-механические свойства. Одной из ключевых проблем для технологии автоматизированной нашивки ровинга является наличие волнистости, возникающей в результате прошивки ровинга. В технологии композитных материалов известно, что искривление волокон в некоторой степени снижает несущую способность в направлении укладки. Решить эту проблему возможно за счет исследования влияния различных технологических параметров, шага прошивки, расстояния между соседними проходами, траектории проходов и т.д. на прочность (степень волнистости). Подбором технологических параметров можно добиться оптимальной структуры материала.

Другой важнейшей проблемой является уплотнение и изменение свойств слоя материала в результате прошивки нитью. Более частое ортогональное армирование позволяет увеличить межслоевую прочность материала, но в то же время приводит к получению более плотной структуры материала и к неоднородности свойств по высоте преформы. Более плотная структура преформы хуже пропитывается связующим. Еще одной проблемой является появление напряжений в структуре преформы в процессе послойного нанесения слоев ровинга. Накапливаемые сжимающие остаточные напряжения в слоях приводят к усложнению, а в ряде случаев и невозможности процесса пропитки преформы связующим, образованию зон, обедненных и обогащенных связующим. Сжимающие напряжения

наследуются готовым изделием и могут приводить к появлению расслоений и трещин в нем.

Таким образом, определение физико-механических свойств, степени армирования, однородности армирования, напряженно-деформированное состояние являются важными факторами с целью повышения физико-механических свойств изделий, получаемых методом автоматизированной нашивки ровинга.

5.1 Определение физико-механических свойств материалов, получаемых методом автоматизированной нашивки ровинга

Рассмотрим модель простейшего композита, состоящего из связующего и наполнителя (рисунок 41). Модель нагружена силой P , действующей параллельно оси y . Для упрощения расчетов примем ряд допущений:

1. Компоненты композиционного материала являются однородными и линейно-упругими материалами.
2. Связующее является изотропным, а волокна могут быть изотропными или трансверсально-изотропными.
3. Армирующие волокна являются прямыми и параллельными.
4. Армирующие волокна распределены равномерно и имеют одинаковое сечение.

Сама модель совместной их работы предполагает, что между арматурой и связующим существует жесткое сцепление, т. е. отсутствует скольжение. Поры как в арматуре, связующем, так и на поверхности их раздела отсутствуют.

5.1.1 Определение упругих и тепло-физических характеристик при продольном взаимодействии двух изотропных тел

На рисунке 41 представлена модель композита для расчета упругих и тепло-физических характеристик при продольном взаимодействии двух изотропных тел.

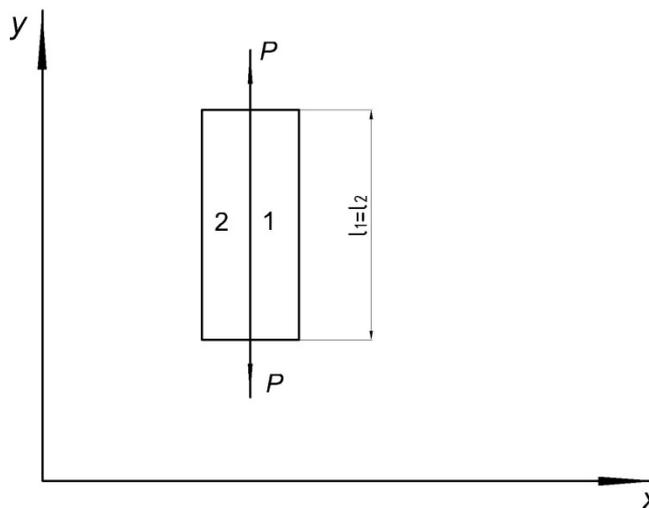


Рисунок 41 – Схема к расчету упругих и тепло-физических характеристик при продольном взаимодействии двух изотропных тел

Введем следующие обозначения:

$E_с$ $E_м$ -модули упругости волокна и матрицы соответственно

$\nu_с$ $\nu_м$ -коэффициенты Пуассона волокна и матрицы соответственно

$\alpha_с$ $\alpha_м$ -коэффициенты линейного расширения волокна и матрицы соответственно

Определение продольного модуля упругости композита

Из условия задачи следует:

$$\left. \begin{aligned} S_1 + S_2 &= S \\ l_1 = l_2 &= l \\ \varepsilon_y &= \varepsilon^с_y = \varepsilon^м_y \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Выражения для деформаций запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_с &= e_с + \alpha_с \Delta T = \frac{\sigma}{E_с} + \alpha_с \Delta T \\ \varepsilon_м &= e_м + \alpha_м \Delta T = \frac{\sigma}{E_м} + \alpha_м \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

В рассматриваемой задаче введем допущение $\Delta T=0$, тогда

$$e_y = e^с_y = e^м_y \quad (5.3)$$

Уравнение равновесия для композита имеет вид:

$$\sigma_y \cdot S = \sigma_{сy} S_1 + \sigma_{мы} S_2$$

Далее будем рассматривать взаимодействия вдоль оси y , поэтому индекс « y » в дальнейшем опустим.

Разделим обе части уравнения на S и получим:

$$\sigma = \sigma_6 \psi_6 + \sigma_M \psi_M \quad (5.4)$$

Где ψ -относительное объемное содержание компонента в композите

$$\psi_6 + \psi_M = 1$$

$$e = \frac{\sigma}{E}; e_6 = \frac{\sigma_6}{E_6}; e_M = \frac{\sigma_M}{E_M}; \quad (5.5)$$

Подставляя (5.5) в (5.4) с учетом (5.3) получим выражение для продольного модуля упругости композита:

$$E = E_6 \psi_6 + E_M \psi_M$$

Определение коэффициента Пуассона композита:

$$\nu_{xy} = \frac{e_x}{e_y}$$

где e_x , e_y – относительные поперечная и продольная деформации соответственно при действии некоторого напряжения σ

Выражение для объемных деформаций:

$$e_x V = e_x^6 V_6 + e_x^M V_M$$

Разделим обе части уравнения на объем композита V получим:

$$e_x = e_x^6 \psi_6 + e_x^M \psi_M \quad (5.6)$$

где

$$\psi = \frac{V_6}{V_6 + V_M}$$

Выразим поперечные и продольные деформации через коэффициенты Пуассона:

$$\begin{aligned} e_x &= e_y \cdot \nu_{xy}; \\ e_x^6 &= e_y^6 \cdot \nu_{xy}^6; \\ e_x^M &= e_y^M \cdot \nu_{xy}^M \end{aligned} \quad (5.7)$$

где ν_{xy} - коэффициент Пуассона композита (первый индекс показывает направление деформации, второй – направление силы вызывающей эту деформацию)

Подставим (5.7) в (5.6) и учитывая (5.3) получим:

$$\nu_{xy} = \nu_{xy}^6 \psi_6 + \nu_{xy}^m \psi_m \quad (5.8)$$

Определение коэффициента линейного расширения:

Из (5.1) и (5.2) получим:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_6}{E_6} + \alpha_6 \Delta T = \frac{\sigma_m}{E_m} + \alpha_m \Delta T = \frac{\sigma}{E} + \alpha \Delta T \quad (5.9)$$

Из (5.4) имеем:

$$\sigma_6 = \frac{\sigma - \psi_m \sigma_m}{\psi_6} \quad (5.10)$$

Подставим (5.10) в (5.9) и получим:

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \psi_m \sigma_m}{\psi_6 E_6} + \alpha_6 \Delta T = \frac{\sigma_m}{E_m} + \alpha_m \Delta T \quad (5.11)$$

После преобразований (5.11) имеем:

$$\sigma_m = \frac{\sigma E_m}{\psi_6 E_6 + E_m \psi_m} + \frac{\Delta T (\alpha_6 - \alpha_m) E_m \psi_6 E_6}{\psi_6 E_6 + E_m \psi_m} \quad (5.12)$$

Подстановка (5.12) в (5.9) дает:

$$\frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma}{\psi_6 E_6 + E_m \psi_m} = \frac{\Delta T (\alpha_6 - \alpha_m) \psi_6 E_6}{\psi_6 E_6 + E_m \psi_m} - \Delta T (\alpha - \alpha_m) \quad (5.13)$$

Заметим, что слева в (5.13) находится упругая составляющая, а справа температурная, теперь приравняем правую часть к нулю и находим α :

$$\alpha = \frac{\alpha_6 \psi_6 E_6 - \alpha_m \psi_6 E_6}{\psi_6 E_6 + E_m \psi_m} + \alpha_m$$

5.1.2 Определение упругих и тепло-физических характеристик при поперечном взаимодействии двух изотропных тел

На рисунке 42 представлена модель композита для расчета упругих и тепло-физических характеристик при поперечном взаимодействии двух изотропных тел.

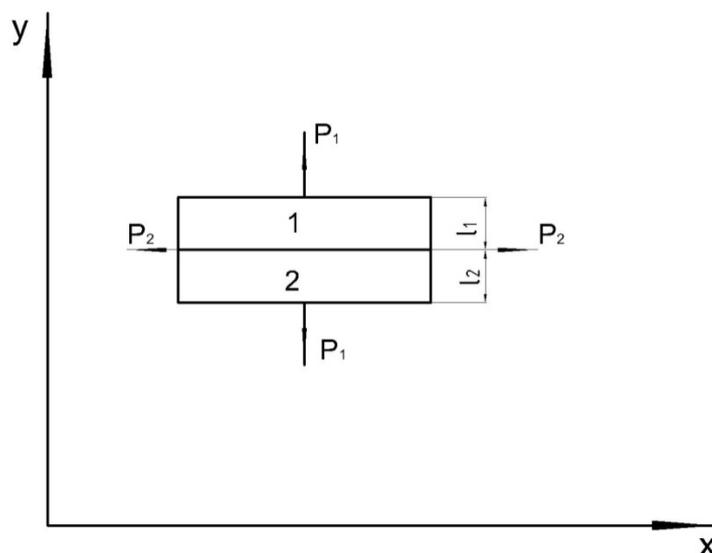


Рисунок 42 – Схема к расчету упругих и тепло-физических характеристик при поперечном взаимодействии двух изотропных тел

Определение поперечного модуля упругости композита:

Из условия задачи следует:

$$\left. \begin{aligned} S_{\sigma} = S_M = S \\ \sigma_{\sigma} = \sigma_M = \sigma \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

Полные деформации равны:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 = e_1 + \alpha_1 \Delta T = \frac{\sigma}{E_1} + \alpha_1 \Delta T \\ \varepsilon_2 = e_2 + \alpha_2 \Delta T = \frac{\sigma}{E_2} + \alpha_2 \Delta T \end{aligned} \right\}$$

Введем допущение $\Delta T=0$ тогда

$$e_y = e_y^{\sigma} + e_y^M$$

Деформация в направлении y:

$$e_y \cdot V = e_y^{\sigma} V_{\sigma} + e_y^M V_M$$

Разделим обе части уравнения на V:

$$e_y = e_{\sigma} \psi_{\sigma} + e_M \psi_M \quad (5.15)$$

$$\psi = \frac{V_1}{V_1 + V_2}$$

При поперечном растяжении модели справедливы равенства:

$$\begin{aligned}
e_y &= \frac{\sigma}{E_y}; \\
e_y^g &= \frac{\sigma_1}{E_1}; \\
e_y^m &= \frac{\sigma_2}{E_2};
\end{aligned}
\tag{5.16}$$

Подставляя (5.16) в (5.15) с учетом (5.14) получим:

$$\frac{1}{E_y} = \frac{\psi_g}{E_g} + \frac{\psi_m}{E_m}
\tag{5.17}$$

Окончательно имеем:

$$E_y = \frac{E_g E_m}{E_g \psi_m + E_m \psi_g}$$

Определение коэффициента Пуассона:

Подставим (5.17) в (5.16) и с учетом (5.14) получим:

$$e_y = \psi_g e_y^g + \psi_m e_y^m$$

Выражение для коэффициента Пуассона запишем в виде:

$$\nu_{xy} = \frac{e_x}{e_y} = \frac{e_x}{e_y^g \psi + e_y^m \psi_m}
\tag{5.18}$$

где e_x - деформация композита в направлении x от единичной силы P_1 ; e_y - деформация в направлении y от единичной силы P_1

Приложим вдоль оси x силу P_2 равную по модулю силе P_1 (рис. 44).

$$|\bar{P}_1| = |\bar{P}_2|$$

Тогда по теореме Бетти о равенстве работ получим:

$$P_1 \cdot \delta_{1x} = P_2 \cdot \delta_{2y}$$

где δ_{1x} - перемещение вызванное силой P_1 в направлении x; δ_{2y} - перемещение вызванное силой P_2 в направлении y;

Так как по условию силы P_1 и P_2 равны можно записать:

$$\delta_{1x} = \delta_{2y}$$

Запишем выражение общей деформации вдоль оси у вызванной совместным действием 2х сил:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\sigma_x}{E_x} \nu_{yx} = e_y - e_x \quad (5.19)$$

где $\frac{\sigma_x}{E_x} \nu_{yx}$ -перемещение (деформация) композита по оси у вызванное силой P₂;

Преобразуем (5.18) с учетом (5.19):

$$\nu_{xy} = \frac{\frac{\sigma_x}{E_x} \nu_{yx}}{e^e_y \psi_e + e^m_y \psi_m} = \sigma_x \frac{\frac{\nu_{yx}}{E_x}}{\frac{\sigma_y}{E_e} \psi_e + \frac{\sigma_y}{E_m} \psi_m} = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot \frac{\nu_{yx}}{E_x \left(\frac{\psi_e}{E_e} + \frac{\psi_m}{E_m} \right)}$$

Учитывая, что в силу допущений $\sigma_x = \sigma_y$, и с учетом выражения (5.17) окончательно получим:

$$\nu_{xy} = \frac{\nu_{yx} E_y}{E_x}$$

Определение коэффициента линейного расширения композита при поперечном взаимодействии изотропных тел:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_e \psi_e + \varepsilon_m \psi_m \quad (5.20)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{\sigma_y}{E_e} + \alpha_e \Delta T \\ \varepsilon_m &= \frac{\sigma_y}{E_m} + \alpha_m \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

Из (5.20) и (5.21) имеем:

$$\frac{\sigma}{E_y} + \alpha \Delta T = \psi_e \left(\frac{\sigma}{E_e} + \alpha_e \Delta T \right) + \psi_m \left(\frac{\sigma}{E_m} + \alpha_m \Delta T \right)$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{\Delta T} \left[\frac{\psi_e}{E_e} + \frac{\psi_m}{E_m} - \left(\frac{\psi_e}{E_e} + \frac{\psi_m}{E_m} \right) \right] + \alpha_e \psi_e + \alpha_m \psi_m$$

При $\sigma=0$ получим:

$$\alpha = \alpha_e \psi_e + \alpha_m \psi_m$$

5.1.3. Определение упругих и тепло-физических характеристик ортотропного тела при продольно-поперечном взаимодействии

На рисунке 43 представлена модель композита для расчета упругих и тепло-физических характеристик ортотропного тела при продольно-поперечном взаимодействии.

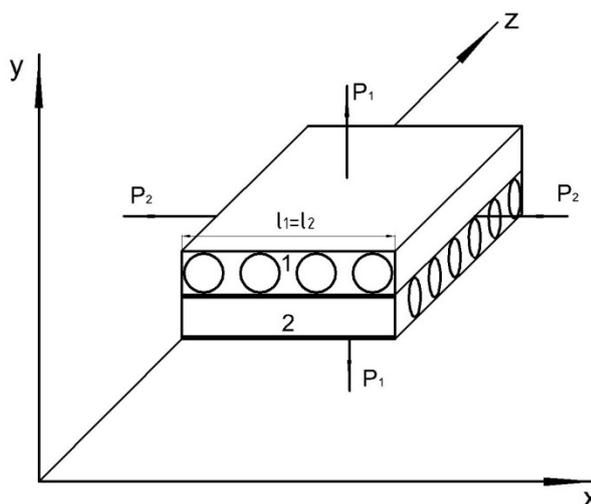


Рисунок 43 – Схема к расчету упругих и тепло-физических характеристик ортотропного тела при продольно-поперечном взаимодействии

Зададим следующие данные:

E_m, E_f -модули упругости матрицы и волокна соответственно

ν_m, ν_f -коэффициенты Пуассона матрицы и волокна соответственно

α_m, α_f -коэффициенты линейного расширения матрицы и волокна соответственно

$\psi_m + \psi_f = 1$ -где ψ_m, ψ_f 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

Определение модулей упругости:

Запишем выражения справедливые при приложении только силы P_2 :

$$e_{x1} = e_{x2} = e_{\text{общ}}$$

$$e_x E_x = \psi_1^* e_{x1} E_{x1} + (1 - \psi_1^*) e_{x2} E_{x2}$$

$$E_x = \psi_1^* E_{x1} + (1 - \psi_1^*) E_{x2}$$

$$E_x = \psi_1^* \frac{E_m E_f}{E_m (1 - \psi) + E_f \psi} + (1 - \psi_1^*) \cdot ((E_m \psi) + E_f (1 - \psi))$$

Для равных объемов слоев имеем:

$$E_x = \frac{1}{2} \left[\frac{E_M E_\epsilon}{E_M (1-\psi) + E_\epsilon \psi} + (E_M \psi + E_\epsilon (1-\psi)) \right]$$

При приложении только силы P_1 :

$$a) S_1 = S_2 = S_{\text{общ}} \quad \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{\text{общ}}$$

$$\psi_1^* e_1 + (1-\psi_1^*) e_2 = e_{\text{общ}}$$

$$\psi_1^* \frac{\sigma_{1y}}{E_{1y}} + (1-\psi_1^*) \frac{\sigma_{2y}}{E_{2y}} = \frac{\sigma_{\text{общ}}}{E_y}$$

$$\frac{\psi_1^*}{E_{1y}} + \frac{1-\psi_1^*}{E_{2y}} = \frac{1}{E_y}$$

$$\frac{\psi_1^*}{E_M \psi + E_\epsilon (1-\psi)} + \frac{1-\psi_1^*}{E_M \psi + E_\epsilon (1-\psi)} = \frac{1}{E_y}$$

$$\frac{1}{E_M \psi + E_\epsilon (1-\psi)} = \frac{1}{E_y}$$

$$E_y = E_M \psi + E_\epsilon (1-\psi)$$

Определение коэффициента Пуассона:

$$\nu_{yx} = \frac{e_y}{e_x}$$

$$e_{x1} = e_{x2} = e_{\text{общ}}$$

$$\nu_{yx} = \nu_{yx1} \cdot \psi_1^* + (1-\psi_1^*) \cdot \nu_{yx2}$$

$$\nu_{yx1} = \frac{\nu_{xy1} E_{x1}}{E_{y1}}$$

$$\nu_{xy} = \nu_{xym} \cdot \psi + (1-\psi) \cdot \nu_{xy\epsilon} = \nu_M \cdot \psi + (1-\psi) \cdot \nu_\epsilon \quad \nu_{yx1} = \frac{[\nu_M \cdot \psi + \nu_\epsilon \cdot (1-\psi)] E_M E_\epsilon}{[E_M \psi + E_\epsilon (1-\psi)] \cdot [E_M (1-\psi) + E_\epsilon \psi]}$$

$$\nu_{yx2} = \nu_{xym} \psi + \nu_{xy\epsilon} (1-\psi) = \nu_M \psi + \nu_\epsilon (1-\psi)$$

$$\nu_{yx} = \frac{[\nu_M \cdot \psi + \nu_\epsilon \cdot (1-\psi)] E_M E_\epsilon}{[E_M \psi + E_\epsilon (1-\psi)] \cdot [E_M (1-\psi) + E_\epsilon \psi]} \cdot \psi_1^* + (1-\psi_1^*) \cdot [\nu_M \psi + \nu_\epsilon (1-\psi)]$$

$$\nu_{xy} = \frac{\nu_{yx} E_y}{E_x}$$

$$v_{xy} = \left(\frac{[v_m \cdot \psi + v_e \cdot (1-\psi)] E_m E_e \psi_1^*}{E_y \cdot [E_m(1-\psi) + E_e \psi]} + (1-\psi_1^*) \cdot [v_m \psi + v_e(1-\psi)] \right) \frac{E_y}{E_x}$$

где

$$E_y = E_m \psi + E_e (1-\psi)$$

$$E_x = \psi_1^* \frac{E_m E_e}{E_m(1-\psi) + E_e \psi} + (1-\psi_1^*) \cdot (E_m \psi + E_e (1-\psi))$$

Зададим условия: объемные доли обоих тел равны т.е. $\psi_1^* = \psi_2^* = 0,5$ тогда

$$v_{yx} = \frac{v_m \cdot \psi + v_e \cdot (1-\psi)}{2} \cdot \left(\frac{E_m E_e}{[E_m \psi + E_e (1-\psi)] \cdot [E_m(1-\psi) + E_e \psi]} + 1 \right)$$

$$v_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{[v_m \cdot \psi + v_e \cdot (1-\psi)] E_m E_e}{E_x \cdot [E_m(1-\psi) + E_e \psi]} + \frac{E_y}{E_x} [v_m \psi + v_e(1-\psi)] \right)$$

Окончательно:

$$v_{xy} = \frac{v_m \psi + v_e (1-\psi)}{2} \cdot \frac{E_m E_e + E_y \cdot [E_m(1-\psi) + E_e \psi]}{E_x [E_m(1-\psi) + E_e \psi]}$$

где

$$E_y = E_m \psi + E_e (1-\psi)$$

$$E_x = \frac{1}{2} \left[\frac{E_m E_e}{E_m(1-\psi) + E_e \psi} + (E_m \psi + E_e (1-\psi)) \right]$$

Определение коэффициента линейного расширения:

От силы P₁:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_1 \psi + \varepsilon_2 (1-\psi)$$

$$\varepsilon_y = e + \alpha \Delta T = \frac{\sigma_y}{E_y} + \alpha \Delta T$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_y}{E_1} + \alpha_1 \Delta T$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_y}{E_2} + \alpha_2 \Delta T$$

$$\frac{\sigma}{E_y} + \alpha \Delta T = \psi \left(\frac{\sigma}{E_1} + \alpha_1 \Delta T \right) + (1-\psi) \left(\frac{\sigma}{E_2} + \alpha_2 \Delta T \right)$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{\Delta T} \left[\frac{\psi}{E_1} + \frac{(1-\psi)}{E_2} - \left(\frac{\psi}{E_1} + \frac{(1-\psi)}{E_2} \right) \right] + \alpha_1 \psi + \alpha_2 (1-\psi)$$

$$\alpha = \alpha_1 \psi_1^* + \alpha_2 (1 - \psi_1^*)$$

Так как для обоих тел имеем продольное нагружение (случай 1), то справедливо выражение:

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

Для $\psi_1^* = 0,5$

Следовательно $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$

$$\text{Где } \alpha_1 = \alpha = \frac{E_M \psi \Delta T (\alpha_M - \alpha_6)}{E_M \psi + E_6 (1 - \psi)} + \alpha_6$$

От силы P_2 :

$$\alpha = \frac{E_1 \psi_1^* \Delta T (\alpha_1 - \alpha_2)}{E_1 \psi_1^* + E_2 (1 - \psi_1^*)} + \alpha_2$$

$$\text{где } E_1 = \frac{E_M E_6}{E_M (1 - \psi) + E_6 \psi}$$

$$E_2 = E_M \psi + E_6 (1 - \psi)$$

$$\alpha_1 = \alpha_M \psi + \alpha_6 (1 - \psi)$$

$$\alpha_2 = \frac{E_M \psi \Delta T (\alpha_M - \alpha_6)}{E_M \psi + E_6 (1 - \psi)} + \alpha_6$$

Зададим граничные условия: объемные доли обоих тел равны т.е. $\psi_1 = \psi_2 = 0,5$

Тогда:

$$\alpha = \frac{E_1 \Delta T (\alpha_1 - \alpha_2)}{E_1 + E_2} + \alpha_2$$

5.2 Определение напряженно-деформированного состояния в материале при послойной прошивке нитью

Особенностью процесса автоматизированной нашивки ровингом является изменение свойств, прежде всего, плотности материала в результате прошивки. Игла с нитью пришивает ровинг сначала к подложке в направлении, перпендикулярном к подложке, затем каждый слой к предыдущему. Экспериментально отмечено, что в процессе нашивки ровинг претерпевает изменение плотности, это приводит к неоднородности свойств по высоте преформы. В итоге слои, наиболее близкие к подложке, могут

получить настолько высокое уплотнение, что игла, прошивающая i -ый слой, будет значительно разрушать цельность волокон в слое. Таким образом, исследование процесса послойной нашивки ровингом приобретает важнейшее значение с точки зрения технологии получения изделий с высокими физико-механическими свойствами.

5.2.1 Исследование напряженно-деформированного состояния в преформе при послойной нашивке ровингом

Пусть на упругую подложку 0 с модулем упругости E_0 , толщиной d слой за слоем нашивается ровинг с одновременной прошивкой его сначала к подложке, затем каждый последующий слой нашивается на предыдущий слой (рис. 44). Таким образом, иглы, прошивая каждый слой, уплотняют его, в результате чего он претерпевает относительную деформацию $\varepsilon_c < 0$ (отрицательная деформация означает уменьшение объема, а, следовательно, увеличение плотности слоя). В настоящей задаче под усадкой будем полагать изменение габаритных размеров слоя материала в плоскости. Модуль Юнга наращиваемого материала – E , толщина слоя – Δ , номер наращиваемого слоя – j .

Рассмотрим случай, когда иглы, пробивая верхний слой, не уплотняют остальную толщину, а уплотнение происходит лишь в наращиваемом (укладываемом) слое. Слой для простоты расчетов считаем изотропным.

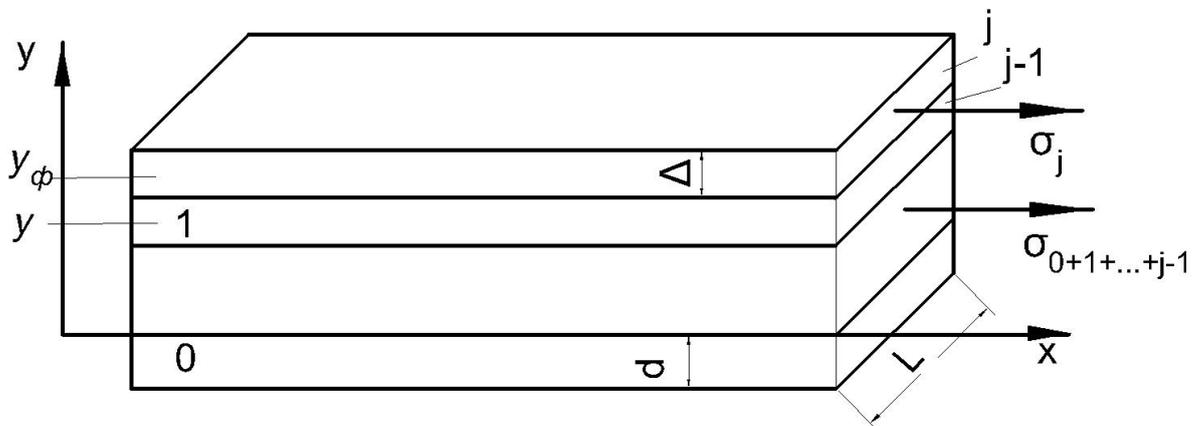


Рисунок 44 – Схема сил, действующих на элементарное тело, 0 –подложка, 1–массив нашитого материала

Примем следующие обозначения: 0 – упругая подложка, [1, ..., j, j+1, j_n] – наращиваемые слои материала, толщиной Δ. E₀ и E – модули Юнга подложки и адгезива, y_{фр} – координата высоты полученного образца, d – толщина подложки, L – длина модели по оси x. По оси z длина равна L. Пусть нарастили уже (j-1) слоёв, каждый из которых имеет толщину Δ, и наращивается слой j. Запишем уравнение равновесия:

$$\sigma_j \cdot \Delta \cdot L + \sigma_{0+1+\dots+j-1} \cdot [\Delta(j-1) + d] L = 0 \quad (5.22)$$

Условия совместности деформаций:

$$\varepsilon_j = \varepsilon_{0+1+\dots+(j-1)} \quad (5.23)$$

При этом:

$$\varepsilon_j = \frac{\sigma_j}{E} + \varepsilon_c; \quad (5.24)$$

$$\varepsilon_{0+1+\dots+(j-1)} = \frac{\sigma_{0+1+\dots+(j-1)}}{E_{0+1+\dots+(j-1)}}$$

Подставляя (5.24) в (5.23) имеем:

$$\frac{\sigma_j}{E} + \varepsilon_c = \frac{\sigma_{0+1+\dots+j-1}}{E_{0+1+\dots+j-1}}; \quad (5.25)$$

Модуль всей толщи (включая прошитые слои и подложку) выразим через формулы смеси (см раздел 5.1.):

$$\begin{aligned} \text{где: } E_{0+1+\dots+j-1} &= E \cdot \psi_{1+\dots+j-1} + E_0 \cdot \psi_0 = \\ &= E_{1+\dots+j-1} \frac{(j-1) \cdot \Delta}{(j-1) \cdot \Delta + d} + \frac{E_0 \cdot d}{(j-1) \cdot \Delta + d} = \frac{1}{(j-1) \cdot \Delta + d} [E \cdot (j-1) \cdot \Delta + E_0 \cdot d] \end{aligned} \quad (5.26)$$

Из уравнения (5.22) получим:

$$\sigma_{0+1+\dots+j-1} = - \frac{\sigma_j \cdot \Delta}{[\Delta(j-1) + d]} \quad (5.27)$$

Подставим (5.26 и 5.27) в (5.25) и после преобразований получим:

$$\sigma_j = -E\varepsilon_c \left(1 - \frac{\Delta \cdot E}{j \cdot E \cdot \Delta + d \cdot E_0}\right); \quad (5.28)$$

Введем обозначения:

Для того чтобы найти напряжения в толще, необходимо просуммировать σ_j в (5.28) от 1 до j . Для этого введем обозначения:

$$\lim(E \cdot \Delta) = d\xi,$$

$$\lim(E_0 \cdot d + E \cdot \Delta \cdot j) = \xi \quad (5.29)$$

$$\Delta \cdot j = y$$

Тогда:

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_j \frac{E \cdot \Delta}{E_0 \cdot d + E \cdot \Delta \cdot j} = \int_y^{y_{фр}} \frac{d\xi}{\xi} = \ln \frac{E_0 \cdot d + E \cdot y_{фр}}{E_0 \cdot d + E \cdot y} \quad (5.30)$$

Подстановка (5.30) в (5.28) (с учетом 5.29) дает:

$$\sigma(y, y_{фр}) = -E\varepsilon_c \left(1 - \ln \frac{E_0 \cdot d + E \cdot y_{фр}}{E_0 \cdot d + E \cdot y}\right); \quad (5.31)$$

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

Для определения параметров, входящих в выражение (5.31), был проведен ряд экспериментов. Для определения модуля упругости подложки E_0 , из материала подложки на основе поливинилового полимера были вырезаны образцы в виде полосок размером 15x155 мм. Всего исследовали две схемы укладки волокон в подложке – $[0^\circ; 90^\circ]$ и $[+45^\circ; -45^\circ]$. Образцы растягивали в захватах разрывной машины при постоянной скорости деформации. Деформацию регистрировали с помощью экстензометра. По диаграмме напряжения–деформации определяли модуль упругости. В результате экспериментов было установлено, что средний модуль при растяжении подложки E_0 при схеме $[0^\circ; 90^\circ]$ составил $E_{0,90}=30$ МПа, при

схеме $[+45^\circ; -45^\circ]$ – 53 МПа. Для определения модуля упругости материала исследовали модуль упругости углеродного ровинга при растяжении в результате серии испытаний получили среднее значение 190 ГПа. В расчетах будем считать, что укладывается квазиизотропный слой материала $[0^\circ; 90^\circ]$. Тогда модуль в направлении плоскости от укладки двух слоев будем считать равным 95 ГПа. Толщину слоя подложки и материала мерили микрометром с точностью до 0,01 мм. В результате толщина подложки во всех случаях была равна 0,25 мм. А толщину материала измеряли по мере наращивания слоев: 1 слой составил 0,85 мм, 2 слоя – 1,45 мм, 8 слоев – 3,70 мм. Точное измерение усадки в плоскости слоя является весьма сложной задачей. Поэтому при оценочных расчетах примем допущение, что усадка материала в плоскости слоя равна 1 %. С использованием выражения (5.31) и полученных экспериментальных данных были произведены расчеты. Исходные данные для расчета: $E_{0;90}=30$ 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 45.

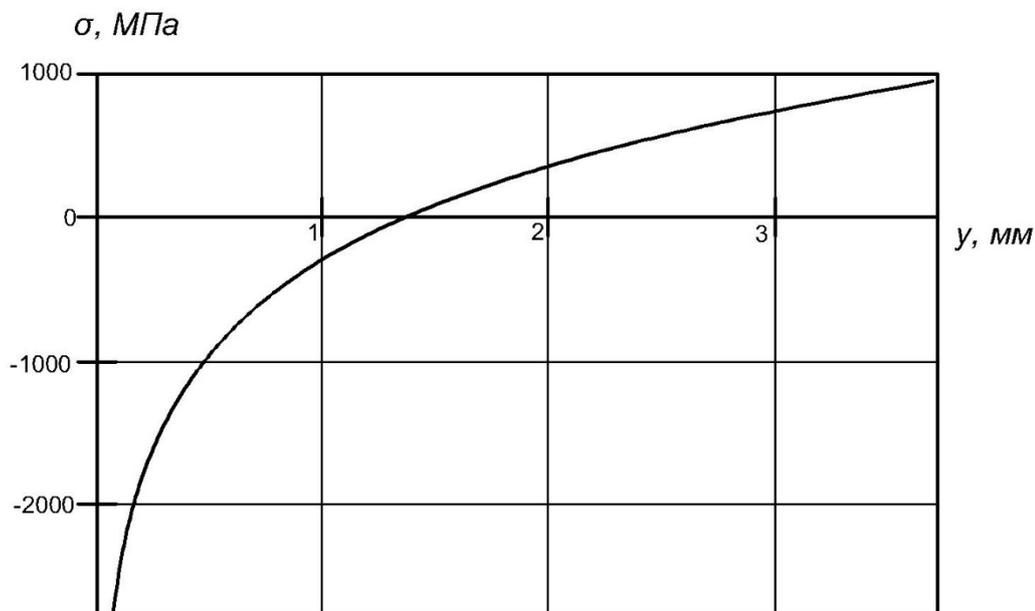


Рисунок 45 – Изменение напряжений $\sigma(y)$ в процессе послойной нашивки ровингом

Из рисунка 45 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. Таким образом, если напряжения в преформе наследуются готовым изделием, то эти зоны будут наиболее опасны при нагружении изделия растягивающими силами. Далее интерес представляет исследование напряженно-деформированного состояния преформы с учетом частоты прошивки и расстояния между соседними проходами.

5.2.2 Определение напряженно-деформированного состояния слоистого материала с учетом взаимодействия его с подложкой

Как было отмечено ранее, важнейшими параметрами при получении изделий методом автоматизированной нашивки ровинга являются шаг прошивки ровинга, расстояние между соседними проходами и натяжение нити при прошивке. Здесь примем допущение, что совокупность стежков на некоторой площади (n , шт/см²) можно заменить средой, состоящей из малых стерженьков, расположенных перпендикулярно укладываемому слою, которые способны передавать усилия, от подложки к слою и от одного слоя к другому последующему слою. Такую среду, находящуюся между подложкой и первым слоем материала, будем называть контактными слоями. Контактный слой ввиду принятых допущений может передавать лишь касательные напряжения, образующиеся на границе взаимодействия слоев материала. Анизотропный контактный слой характеризуется толщиной h^* , модулем Юнга E^* и модулем сдвига G^* . Примем допущение, что в слое материала или в подложке возникают только нормальные напряжения.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние в направлении оси x . Будет полагать, что из-за усадки материала в толще возникают напряжения сдвига. Выделим элементарное тело и обозначим все силы, действующие на него. Рассмотрим взаимодействие первого и пока единственного слоя прошивного материала с подложкой. Перемещения

частиц слоёв вдоль направления x : u_0 – перемещение подложки, u_1 – перемещение в слое 1.

На рисунке 46 представлена модель композита для расчета напряженно-деформированного состояния слоистого материала с учетом взаимодействия его с подложкой.

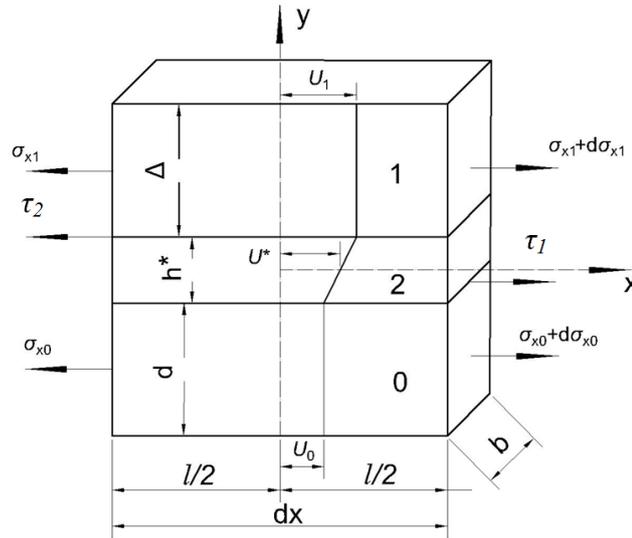


Рисунок 46 – Расчетная схема: 0 – подложка, 1 – первый слой материала, 2- контактный слой.

Запишем уравнение равновесия для подложки 0 в соответствии с рисунком 46:

$$-\sigma_{x0} \cdot d \cdot b + \left(\sigma_{x0} + \frac{d\sigma_{x0}}{dx} dx \right) db + \tau_1 \cdot dx \cdot b = 0; \quad (5.32)$$

Уравнение для слоя 1:

$$-\sigma_{x1} \cdot \Delta \cdot b + \left(\sigma_{x1} + \frac{d\sigma_{x1}}{dx} dx \right) \Delta \cdot b - \tau_2 \cdot dx \cdot b = 0; \quad (5.33)$$

Для контактного слоя 2

$$-\tau(y) \cdot dx \cdot b + (\tau + d\tau) \cdot dx \cdot b = 0 \quad (5.34)$$

Из (5.34) следует, что

$$\tau(y) = \tau_1 = \tau_2 = \tau = const$$

Тогда после преобразований (5.32), (5.33) получим:

$$\begin{aligned} d \frac{d\sigma_{x0}}{dx} &= -\tau; \\ \Delta \frac{d\sigma_{x1}}{dx} &= \tau; \end{aligned} \quad (5.35)$$

Приравнявая уравнения в (5.35), получаем:

$$\frac{d\sigma_{x1}}{dx} = -\frac{d}{\Delta} \frac{d\sigma_{x0}}{dx};$$

Или, после интегрирования по dx , окончательно имеем: (5.36)

$$\sigma_{x1} = -\frac{d}{\Delta} \sigma_{x0};$$

Перемещения в контактном слое в силу его малой толщины будем считать линейно зависящими от y :

$$u^* = a \cdot y + b$$

Из граничных условий непрерывности перемещений имеем:

$$u^*(y=0) = u_0; u^*(y=h^*) = u_1$$

Тогда перемещения в контактном слое запишутся в виде

$$u^*(x,y) = \frac{u_1 - u_0}{h^*} \cdot y + u_0$$

Полные деформации подложки 0 и слоя 1:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_{x0}}{E_0}; \varepsilon_1 = \frac{\sigma_{x1}}{E_1} + \varepsilon_c \quad (5.37)$$

Соотношения Коши между перемещениями и деформациями:

$$\varepsilon_0 = \frac{du_0}{dx}; \varepsilon_1 = \frac{du_1}{dx} \quad (5.38)$$

Для сдвиговых деформаций в контактном слое имеем:

$$\gamma^* = \frac{\partial u^*}{\partial y} = \frac{u_1 - u_0}{h^*} \quad (5.39)$$

Закон Гука для сдвиговых деформаций:

$$\gamma^* = \frac{\tau^*}{G^*} \quad (5.40)$$

Из уравнений (5.37), (5.38), (5.39), (5.40) получаем:

$$\tau^* = \frac{G^*}{h^*}(u_1 - u_0) \quad (5.41)$$

Дифференцирование (5.41) и подстановка (5.37), (5.38) дает:

$$\frac{\partial \tau^*}{\partial x} = \frac{G^*}{h^*} \left(\frac{\sigma_{x1}}{E_1} + \varepsilon_c - \frac{\sigma_{x0}}{E_0} \right) \quad (5.42)$$

Подстановка (5.35) и (5.36) в (5.42) дает:

$$\frac{d\sigma_{x1}}{dx} = -\frac{d}{\Delta} \frac{d\sigma_{x0}}{dx};$$

$$\frac{\partial \tau^*}{\partial x} = -\frac{G^*}{h^*} \left[\sigma_{x0} \left(\frac{d}{\Delta E_1} + \frac{1}{E_0} \right) - \varepsilon_c \right] \quad (5.43)$$

После подстановки (5.35), получаем дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 \sigma_{x0}}{dx^2} - \sigma_{x0} \frac{G^*}{d \cdot h^*} \left(\frac{d}{\Delta E_1} + \frac{1}{E_0} \right) + \frac{G^*}{dh^*} \varepsilon_c = 0$$

Введем обозначения:

$$\omega^2 = \frac{G^*}{d \cdot h^*} \left(\frac{d}{E_1 \Delta} + \frac{1}{E_0} \right)$$

$$\beta = \frac{G^*}{dh^*} \varepsilon_c$$

Тогда выражение запишется в виде:

$$\frac{d^2 \sigma_{x0}}{dx^2} - \omega^2 \sigma_{x0} + \beta = 0 \quad (5.44)$$

Решение уравнения (5.44) запишется в виде:

$$\sigma_{x0}(x) = A \cdot \exp(\omega x) + B \cdot \exp(-\omega x) + \frac{\beta}{\omega^2} \quad (5.45)$$

Или с использованием гиперболических функций:

$$\sigma_{x0}(x) = A_1 \cdot sh \omega x + B_1 \cdot ch \omega x + \frac{\beta}{\omega^2} \quad (5.46)$$

Так как в рассматриваемой модели отсутствуют внешние нагрузки, а напряжения в плоскости склейки обусловлены усадками материала, то запишем граничные условия – напряжения на концах отсутствуют:

$$\sigma_0(-l/2) = \sigma_0(l/2) = 0 \quad (5.47)$$

Задача симметричная, поэтому начало координат располагаем в середине длины модели, равной $2l$. Из (5.46) и (5.47) получаем решение для нормального напряжения в подложке:

$$A_1 = 0; B_1 = -\frac{\beta}{\omega^2 \operatorname{ch}(\frac{\omega l}{2})} \quad (5.48)$$

После подстановки (5.48) в (5.46) получаем решение для нормального напряжения в подложке:

$$\sigma_{x0}(x) = \frac{\beta}{\omega^2} \left(1 - \frac{\operatorname{ch}(\omega x)}{\operatorname{ch}(\frac{\omega l}{2})}\right) \quad (5.49)$$

Подставим (5.49) в (5.36):

$$\sigma_{x1} = \frac{d}{\Delta} \frac{\beta}{\omega^2} \left(\frac{\operatorname{ch}(\omega x)}{\operatorname{ch}(\frac{\omega l}{2})} - 1\right); \quad (5.50)$$

Касательные напряжения в контактном слое с учетом (5.35) запишутся в виде:

$$\tau = \frac{d\beta}{\omega} \frac{\operatorname{sh}(\omega x)}{\operatorname{ch}(\frac{\omega l}{2})}; \quad (5.51)$$

где

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

$$\beta = \frac{G^*}{d \cdot h^*} \varepsilon_c$$

С использованием выражений (5.49), (5.50), (5.51) построены графики напряжений в толще материала, подложке 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. 47-48) нормальные напряжений, 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. 49), 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.

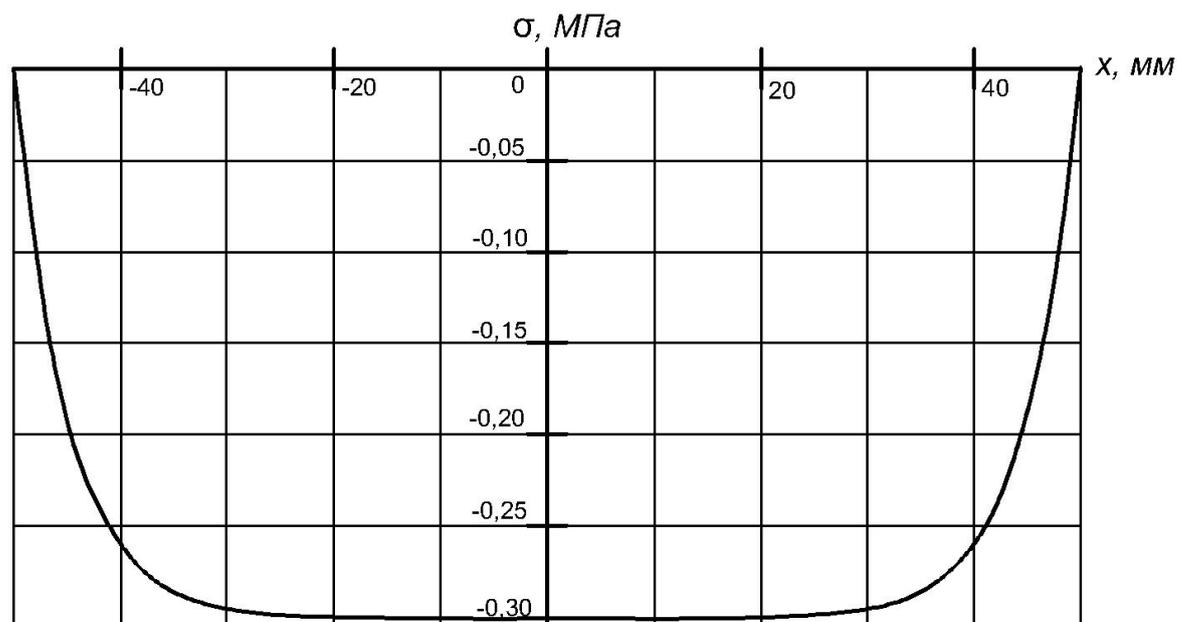


Рисунок 47–Распределение нормальных напряжений $\sigma_{x0}(x)$ в подложке по длине образца x

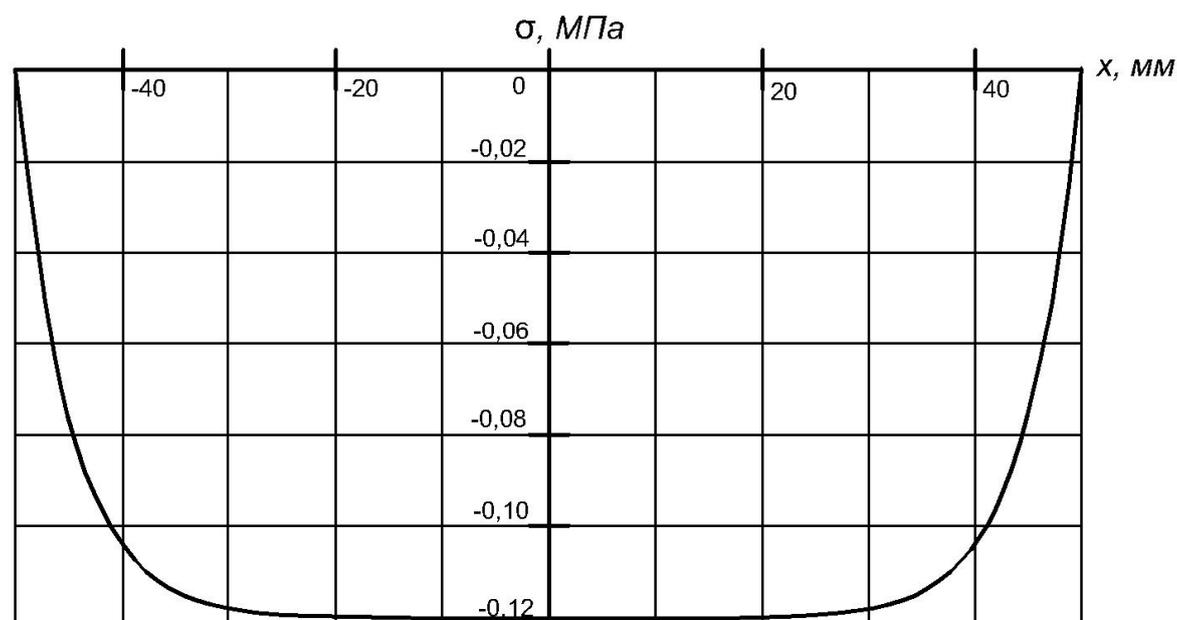


Рисунок 48 – Распределение нормальных напряжений $\sigma_{x1}(x)$ в первом слое материала

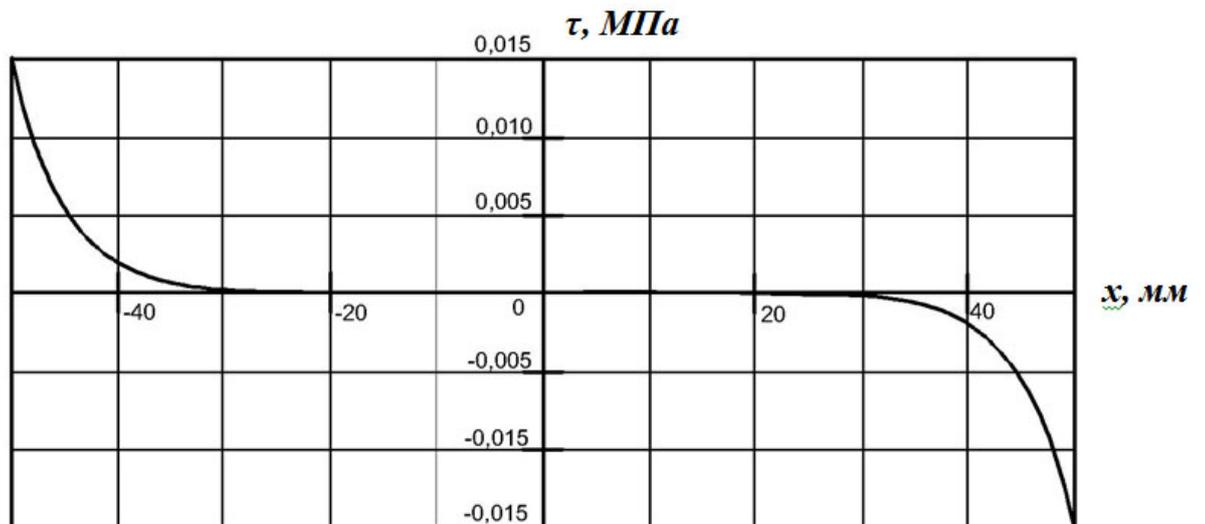


Рисунок 49 – Распределение касательных напряжений $\tau(x)$ в контактном слое в результате уплотнения материала

Выводы по главе 5

На основании проведенных аналитических исследований и расчетов можно заключить следующее:

1. Установлено, что расчет физико-механических и теплофизических свойств материалов, получаемых методом автоматизированной нашивки ровинга, можно производить с использованием формул смеси.
2. Установлено, что при послойной нашивке в структуре материала появляются напряжения, которые зависят от свойств подложки и материала, толщины подложки и материала, а также уплотнения материала в результате нашивки слоя ровинга.

3. Установлено, что при послойной нашивке ровингом в структуре материала появляются напряжения, которые распределены неоднородно по толщине преформы. В слоях, близких к подложке, появляются сжимающие напряжения, а в слоях, наиболее отдаленных от подложки – растягивающие. Сжимающие напряжения приводят к усложнению, а в ряде случаев невозможности пропитки их связующим. Растягивающие напряжения снижают несущую способность материала при приложении растягивающей нагрузки.

4. Установлено, что на границе взаимодействия слоев материала и первого слоя с подложкой появляются касательные напряжения, которые зависят от технологических параметров процесса нашивки – шага прошивки и расстояния между соседними проходами. Увеличение интенсивности прошивки приводит к увеличению значения касательных напряжений, а область их изменения по длине взаимодействия резко сужается.

Глава 6. Проведение разгонных испытаний рабочего колеса центробежного компрессора

На графике (рис. 50) показаны деформации датчиков 1.1, 2.2, 3.2, 4.2, 5.2. На графике (рис. 51) показаны деформации датчиков 2.1, 4.1, 5.1. Необходимо сказать, что датчик 3.1 вышел из строя и показывал некорректные данные, на рис. 52 приведены сравнения показаний датчиков 2.1, 4.1, 5.1 и 3.1.

Из графиков видно, что наибольшие деформации возникают на датчиках 2.1 (находится на периферии дисковой части и измеряет окружные

деформации) и 5.1 (находится на кольце №5 и измеряет окружную деформацию). Значение деформации по датчику 2.1 зависит от того, как кольцо №5 раскрывается; видно, что значения деформации близки и имеют идентичную зависимость. Максимальное значение деформации на датчике 5.1 при частоте оборотов 11667 об/мин составляет 0,000165 (0,0165%).

На графике (рис. 53) показана аппроксимация результатов испытаний и проведен расчетный анализ прогноза разрушения РКЦК при нормальной и повышенной температуре (до 300°C). Анализ результатов показывает, что при выбранном критерии разрушения (табл. 10) предельные деформации для кольца №5 при нормальной температуре составляют 0,003, а при повышенной (300°C) составляют 0,0032, исходя из результатов испытаний лопаток и силовых колец при нормальной и повышенной температуре.

Анализ деформаций позволил спрогнозировать, что превышение уровня разрушающих деформаций в конструкции РКЦК при нормальной температуре достигнет при частоте вращения 57210 об/мин, при повышенной температуре (до 300°C) – при частоте вращения 56275 об/мин. В ходе испытаний на стенде выявлены большие вибрации и перемещения до 160 мкм в опоре (рис. 54), что не позволило выйти на частоту до 52000 об/мин. Поэтому максимальная частота вращения РКЦК из КМ для МГТД должна составлять 52000 об/мин.

В результате проведенных испытаний установлено, что коэффициент запаса РКЦК по оборотам составляет 1.1, а коэффициент запаса по напряжениям 1.2.

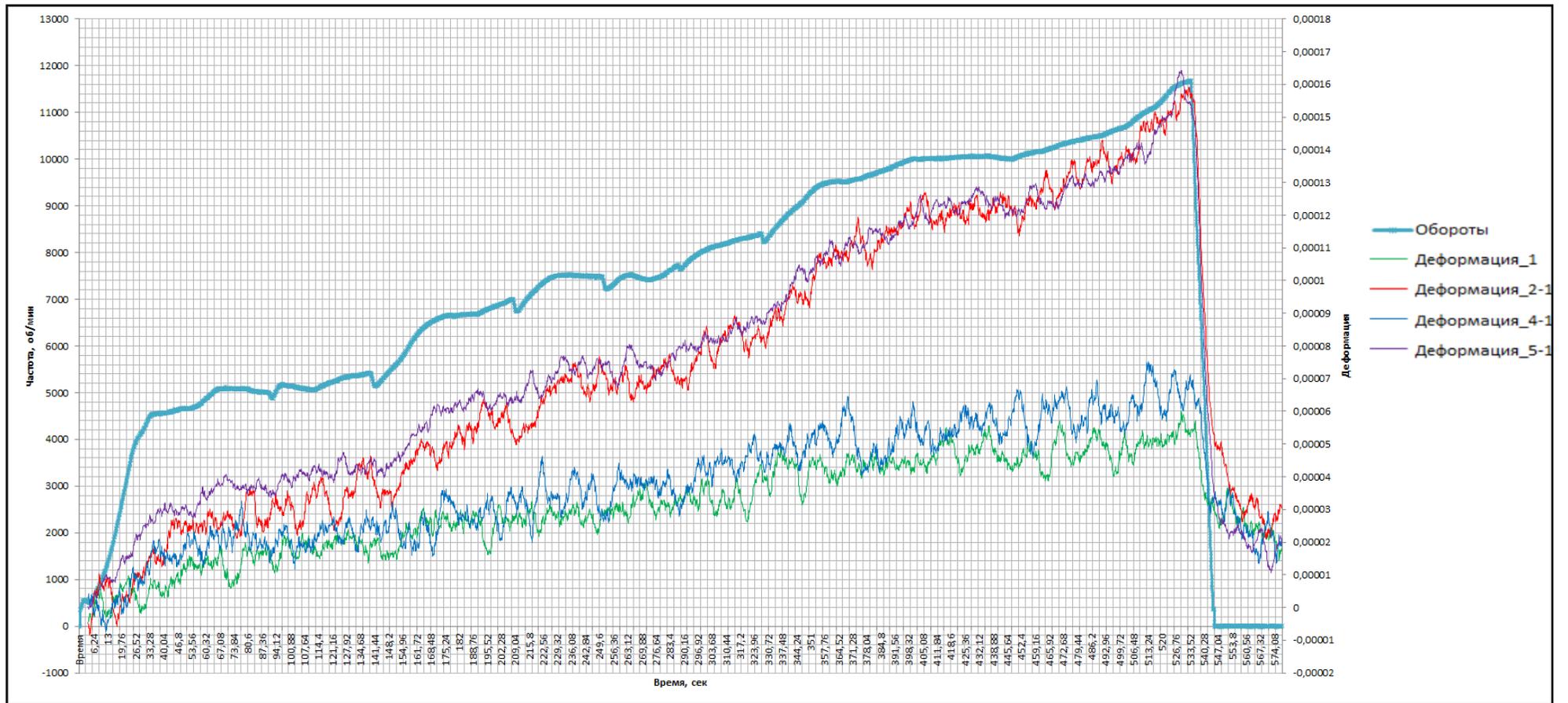


Рисунок 50– График зависимостей датчиков деформации (1.1, 2.1, 4.1, 5.1) от частоты вращения ротора.

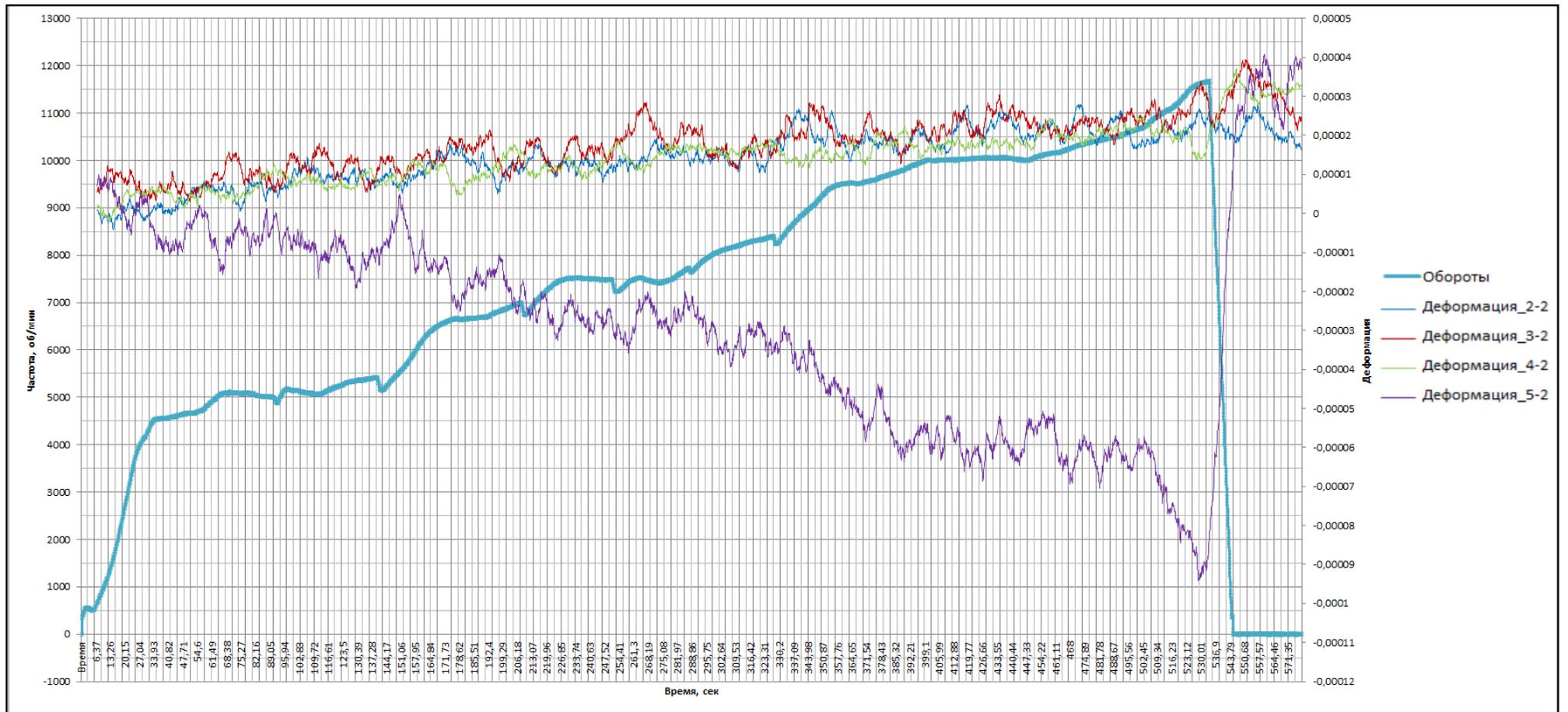


Рисунок 51 – График зависимостей датчиков деформации (2.2, 3.2, 4.2, 5.2) от частоты вращения ротора.

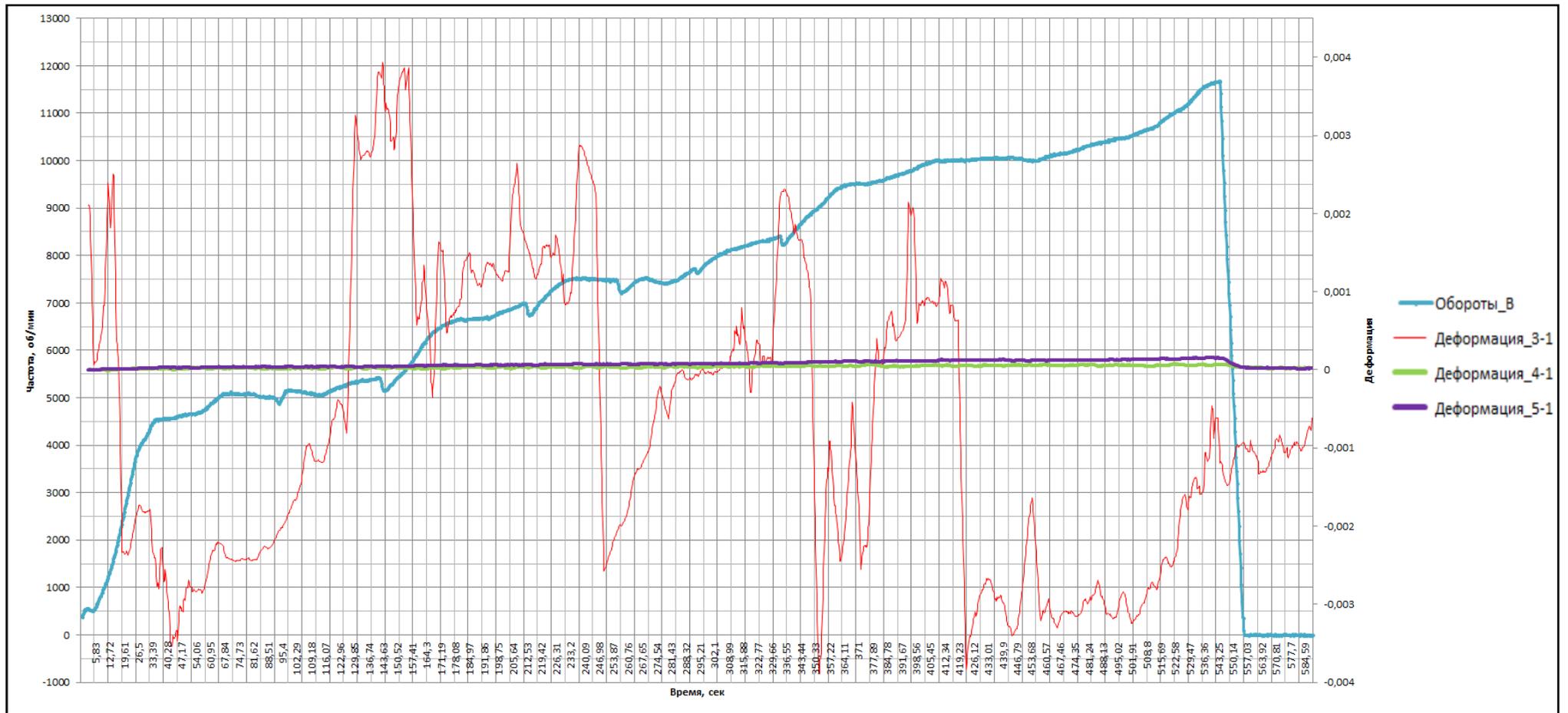


Рисунок 52 – График зависимостей датчиков деформации (3.1, 4.1, 5.1) от частоты вращения ротора.

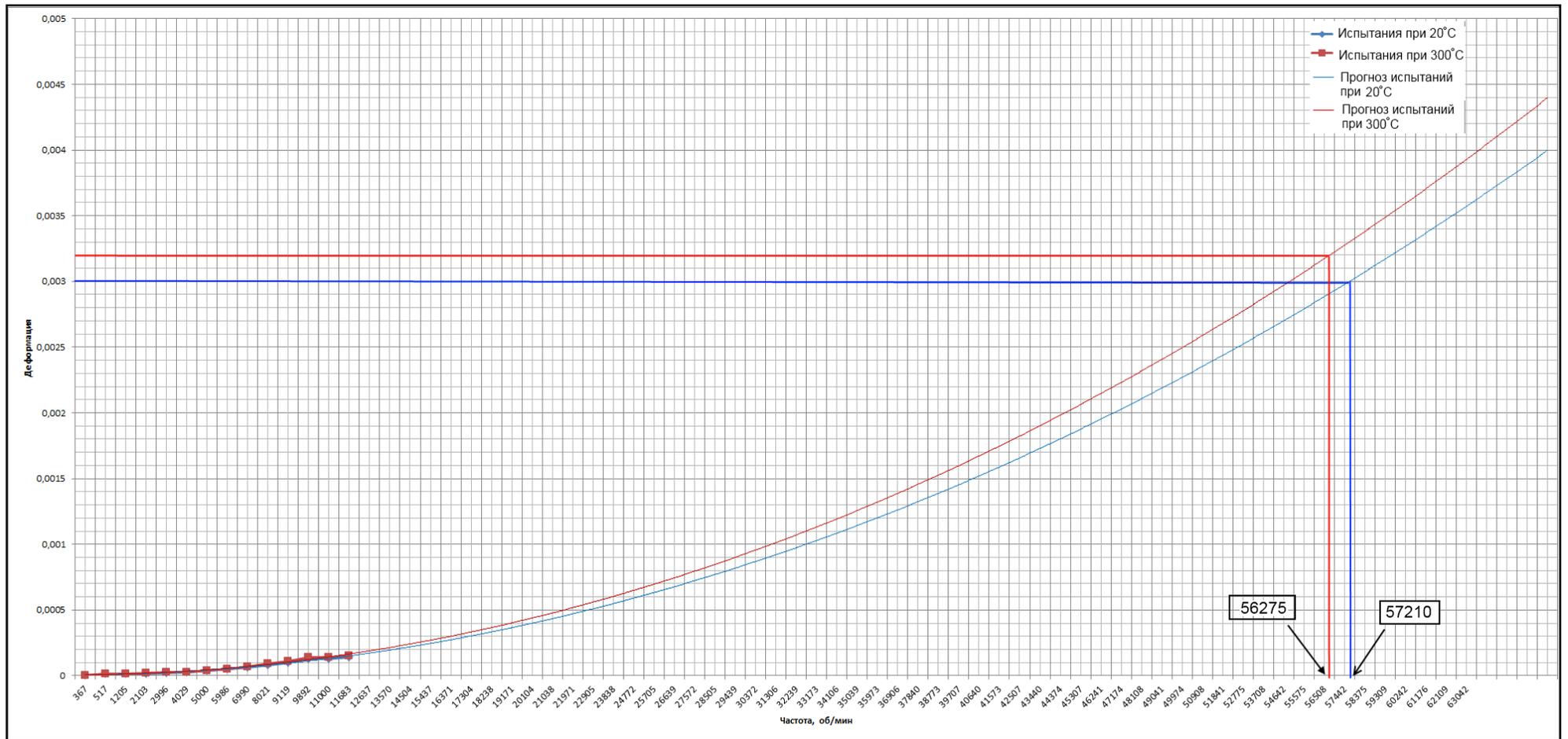


Рисунок 53 – Анализ испытаний РКЦК при нормальной и повышенной (до 300°C) температурах.

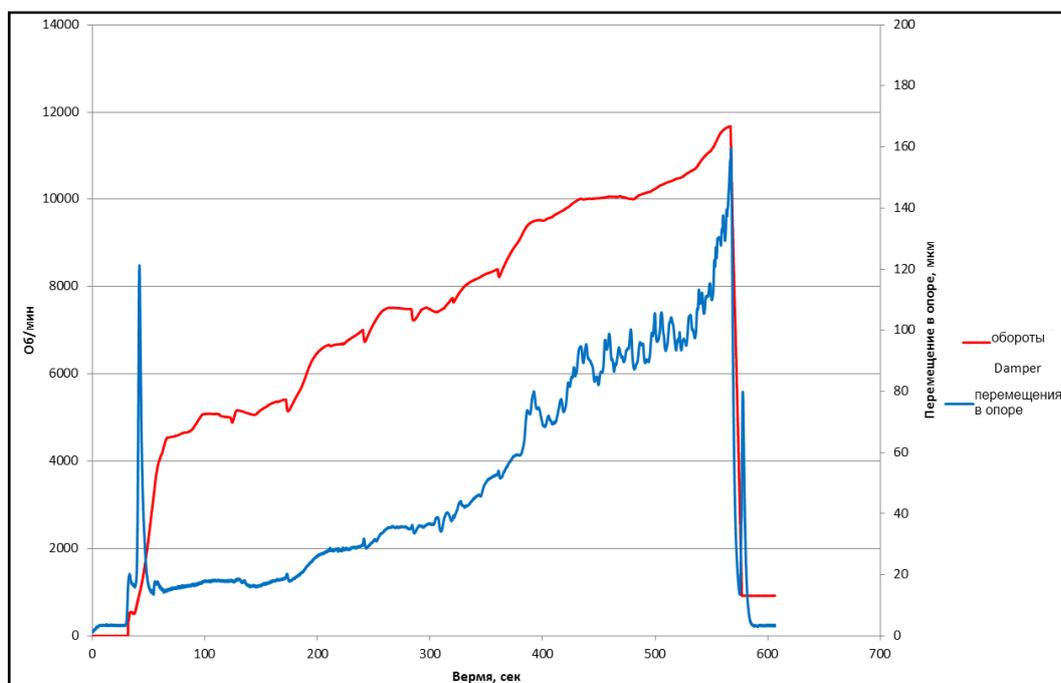


Рисунок 54 – Перемещения в опоре на стенде

Выводы по главе 6

В результате проведенных испытаний получена зависимость распределения деформаций в конструкции РКЦК от частоты оборотов. Анализ результатов испытаний показал, что наибольшие деформации возникают на датчике, закрепленном на кольце № 5. Предельные деформации для кольца № 5 при нормальной температуре составляют 0,003, а при повышенной (300°C) составляют 0,0032.

Проведя разгонные испытания РКЦК из КМ на стенде до 11667 об/мин, была получена зависимость распределения деформаций от частоты оборотов. Аппроксимируя дальнейшие испытания получены кривые, которые показывают, что превышение уровня разрушающих деформаций при нормальной температуре достигнет при частоте 57210 об /мин, при повышенной температуре (300°C) достигнет при частоте 56275 об/мин.

В результате проведенных работ установлено, что деформация силовых элементов конструкции РКЦК при рабочей максимальной частоте вращения 52000 об/мин не превысит уровень предельных разрушающих деформаций.

Отдельно следует отметить, что масса разработанного и изготовленного РКЦК из КМ составляет 520 г, что меньше в 3 раза, чем масса РКЦК из титанового сплава ОТ4-1 (1560г).

Углепластиковые лопатки, изготовленные по разработанной технологии специально по заказу ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» для рабочего колеса компрессора МГТД, успешно прошли и выдержали испытания. Таким образом, разработанный метод автоматизированной нашивки ровинга рекомендуется для производства малоразмерных изделий в составе конструкций транспортных и энергетических газотурбинных установок, а также при проведении ремонтно-восстановительных работ с их элементами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технологическая схема изготовления объёмно-армированных преформ лопаток ГТД из ПКМ с применением автоматизированной нашивки ровингом, исключая влияние человеческого фактора на качество изделия.

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».

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют говорить о том, что свойства нашивных материалов сопоставимы со свойствами прессованных углепластиков с высокоориентированной структурой, прочность на изгиб которых отличается не более, чем на 25%. Наиболее энергоёмкая структура нашивного углепластика достигается в диапазоне плотности нашивки 50 – 60 у.е. и шага прошивки 7-10 мм. При этом углепластики на основе tfr-преформ обладают более высокими энергией разрушения и прочностью на сдвиг по сравнению с прессованными.

Помимо достижения оптимальных для эксплуатации совокупности физико-механических показателей, метод направленной нашивки волокна имеет такие преимущества, как возможность изготовления серий малогабаритных изделий с идентичными геометрическими, весовыми и прочностными характеристиками, отсутствие человеческого фактора, экономичность и безотходность производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
2. Shailendra Kumar Bohidar, Ravi Dewangan, Kalpit Kaurase. Advanced Materials used for different components of Gas Turbine// International Journal of scientific research and management (IJSRM). -2013. -Vol. 1. -№7. -P. 366-370.
3. Соловьёв П.В., Полежаев Н.И., Шамсутдинов А.А. К вопросу о прогнозировании механических свойств волокнистых композиционных материалов в широком температурном диапазоне //Молодёжный Вестник УГАТУ. -2013. -№ 4 (9). -С. 5-11.
4. Фалалеев, С.В. Современные проблемы создания двигателей летательных аппаратов: электрон. учебное пособие /С.В.Фалалеев; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-т) – Самара, 2012. – 106 с.
5. Сагитов И. Ф. Композиционные материалы в современном авиастроении//Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т.2. – стр. 488-490
6. Гайдачук, А. В. Состояние и перспективы применения композиционных материалов в газотурбинных двигателях летательных аппаратов/А. В. Гайдачук//Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 3. – С. 11 – 20
7. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030// Авиационные материалы и технологии. – 2012. – стр. 7-18
8. Самедов А.С., Вагаблы Э. Т. Перспективы и проблемы развития авиационных газотурбинных двигателей нового поколения//Молодой ученый. Издательство: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство Молодой ученый" (Казань). – 2016. - №6 (110). – стр. 177-181

9. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций//Крылья Родины.–2016.– №5. – С. 8–18.
10. Черепанов А. И. Теория и технология литейных композиционных материалов. Версия 1 [Электронный ресурс]: конспект лекций / А. И. Черепанов. – Электрон. дан. (4Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 146 с.
11. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В. О формировании технических требований к полимерному материалу перспективной рабочей лопасти вентилятора ТРДД //Двигатель. - 2015. - № 1. - стр. 2-8.
12. Калгин А.В., Калинин Ю.Е., Кудрин А.М., Малюченков А.В., Панин Ю.В., Ситников А.В. Перспективы развития производства авиационных деталей из композиционных материалов//Вестник воронежского государственного технического университета. – 2011г. - №11-2. – с. 146-153
13. Башаров Е. А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов// ТРУДЫ МАИ. -2017. -№92. -С. 13.
14. Пуденков Н.М., Пашков В. П. Применение углепластиков в авиастроении// Авиамашиностроение и транспорт Сибири. - 2013. – С. 126-128
15. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения// Авиационная промышленность. – 1997. - № 3–4. – стр. 58–60.
16. Кербер М.Л., Виноградов В.М. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.:Профессия, - 2009. - 560 с.
17. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов//Авиационные материалы и технологии. - 2017. - №S. - стр. 344–348.
18. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники//Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2007. – №5. – стр. 7-27

19. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов // Конверсия в машиностроении. - 2004. - №4 (65). - стр. 65–69.
20. Иноземцев А.А. Наноиндустрия авиадвигателя // Пермские авиационные двигатели. –2010. –№ 20
21. Каблов Е.Н., Скибин В.А., Абузин Ю.А., Кочетов В.Н., Шавнев А.А., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. Широкохордные лопасти вентиляторов для ТРДД 5–6 поколений// Конверсия в машиностроении. -2005. -№5. -С. 5-16.
22. Кутилин С.Г., Кожина Т. Д. Особенности технологического процесса изготовления деталей компрессоров авиационных ГТД из полимерных композиционных материалов// Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. -2014. -№1(28). – С. 48-54.
23. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В. Рабочие лопасти вентиляторов из углепластика для перспективных двигателей. Достижения и проблемы // Двигатель. – 2011. – №6 (78).
24. Михалкин А. А. Рабочие лопасти вентилятора перспективных ТРДД / А. А. Михалкин//Авиационно-космическая техника и технология. - 2013. - № 9. - С. 97-100
25. Каримбаев Т.Д. Композиционные материалы в конструкциях авиационных двигателей (обзор)// Конструкции из композиционных материалов. – 2017. - №4 (148). – С. 37-45.
26. Фейгенбаум Ю. М., Бутушин С. В., Божевалов Д. Г., Соколов Ю. С. Композиционные материалы и история их внедрения в авиационные конструкции//Научный вестник ГОСНИИ ГА. Издательство: Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (Москва). – 2015. - № 7 (318). - стр. 24-37
27. Новиков А.С., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В., Мезенцев М.А. Инновации при применении композиционных материалов в авиационных двигателях//Двигатель. – 2015. - № № 2 (98). – стр. 6-9

28. Бабкин В.И., Скибин В.А., Солонин В.И. Вклад ЦИАМ в инновационное развитие авиационного двигателестроения//Двигатель. – 2012. – №1. – стр. 4-7.
29. Бабкин В. И., Ланшин А.И. ЦИАМ и российское двигателестроение//Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. – 2016. - № 1 (42). – т. 21. – стр. 169-180.
30. Марков В. Г. Роль и место ЦИАМ и его экспериментальной базы в процессе разработки и создания перспективных авиационных двигателей//Автоматизация в промышленности. – 2016. - №4. – стр. 6-8
31. Скибин В.А., Солонин В.И., Цховребов М. М, Ланшин А.И. Исследования ЦИАМ в обеспечение создания базового ТРДД нового поколения для магистральных самолетов//Двигатель. – 2005. - №5. – стр. 3
32. Марков В. Г., Ланшин А. И. ЦИАМ - единственная в России научная организация, способная проводить разработку и весь комплекс экспериментальных работ по созданию авиационных двигателей мирового уровня//Автоматизация в промышленности. Издательство: Издательский дом "ИнфоАвтоматизация" (Москва). – 2016. - №4. – стр. 3-5.
33. Вольсков Д. Г. Интегральные конструкции из полимерных композиционных материалов газотурбинных двигателей//Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2015. - № 2 (70). – стр. 50-55.
34. Климов А. К., Климов Д. А., Низовцев В. Е., Ухов П. А. Эффективность применения наноструктурных композиционных материалов и изделий из них в авиационной промышленности//Труды МАИ. – 2013. - №67. – стр. 21.
35. Пейчев Г.И. Разработка, экспериментальные исследования и доводка углепластиковой лопатки спрямляющего аппарата вентилятора двигателя Д-18Т // Авиационная промышленность. –1989 – № 9 – С. 13–14.
36. Макин Ю. Н. Основы производства ЛА и АД: Текст лекций / Ю. Н. Макин, А. Н. Ерошкин, О. В. Комиссарова; Моск. гос. техн. ун-т гражд.

- авиации, каф. ремонта летат. аппаратов и авиадвигателей. - М.: МГТУГА, 1996. - 88 с
37. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Коротков И.А. Некоторые особенности жидкостного формования полимерных композиционных материалов (обзор)// Труды ВИАМ. – 2017. – №2(50). – стр. 54-64
38. Lang D. Aerospace structures: current trends//Composites RTM infusion. - 2009. - P. 228—242.
39. Вашуков Ю. А. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов/ Вашуков Ю. А. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. -185 с.
40. Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012.
41. Bogdanovich A.E. Multi-scale Modeling, Stress and Failure Analyses of 3-D Woven Composites// Journal of Materials Science. -2006. - Vol. 41. - № 20. -P. 6547-6590.
42. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ //Авиационные материалы и технологии. -2013. -№1. -С. 35–39.
43. Коваленко О.Н., Тувин А.А. Современные текстильные технологии для производства высокоэффективных композитов// Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2016. - №1. – т.2. – стр. 113-117
44. McClain M., Goering J. Overview of Recent Developments in 3D Structures /In: ICCM 17, 3D Textiles & Composites. Edinburgh. 2009.
45. Бухаров С.В., Лебедев А.К., Зинин А.В., Базаев Е.М. Технология пространственно-армированных полимерных волокнистых композиционных материалов в аэрокосмической технике// Сборник докладов II Научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для

- перспективных изделий авиационной и космической техники». – 2015. – стр. 14.
46. Караваев Р.Ю. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов// Сборник материалов XIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». – 2016. – стр. 395-398
47. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ //Труды ВИАМ. -2014. -№4.-С.6
48. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4
49. Киселев В.Ю., Селиверстов М.В. Методы проектирования цельнотканых 3D преформ//Сборник материалов XX Международного научно-практического форума «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоёмкие технологии и материалы». – 2017. - стр. 67-72
50. Киселев М.В., Селиверстов В.Ю., Киселев А.М. Разработка методов проектирования, технологии и оборудования получения 3D-текстильных преформ методами ткачества для производства композиционных материалов с повышенными механическими свойствами /Российский рынок технического текстиля и нетканых материалов: наука и производство в современных экономических условиях: сб. докладов IМеждунар. науч.-практ. симпозиума, г. Москва, 25 февраля 2016 г. ЦВК «Экспоцентр». –М.: изд-во «БОС». –2016. С.169 –176
51. Лукьяненко Ю.В., Халиулин В.И., Шкитов А.М. Исследование по созданию 3D армированных преформ для изделий авиационного назначения// Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли». - Издательство: Академия наук Республики Татарстан. – 2016. – стр. 743-748.

52. Кравец Е.В., Звекова Е.А. Оценка перспективы развития российского рынка композитных материалов, изготовленных на основе объемных текстильных преформ// Экономика и предпринимательство. – 2016. - №11-3 (76-3). – стр. 067-1071
53. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ// Авиационные материалы и технологии. – 2016. - №4(16). – стр. 54-59
54. Лаврис Е.В. Совершенствование плетельного оборудования для производства текстильных деталей сложных форм //Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. -2011.- № 70. -С. 214-225
55. Getmantseva V.V., Lavris E.V., Petrosova I.A. Trends of design technologies for innovative textile goods production //Fiberfashion: World internet journal of textile and apparel production. 2011.
56. Голубев С.Е., Киселев М.В. Обзор текстильного оборудования для изготовления трехмерных армирующих преформ//Сборник трудов международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы науки в технологиях текстильной и легкой промышленности». – 2016. – стр. 221-223
57. Грачев Ф.А. Применение армированных преформ, полученных методом контурного плетения, в современных образцах ракетно-космической и авиационной техники// Сборник статей по материалам участников VII Ежегодной научной конференции аспирантов "МГОТУ" «Инновационные аспекты социально-экономического развития региона». – 2017. – стр. 215-224
58. Reimer Viktor, Dyagilev A.S., Gries Thomas. Изготовление плетеных преформ для формирования композиционных материалов на радиальной плетельной машине//Материалы докладов 50-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной году науки. Издательство: Витебский государственный технологический университет (Витебск). – 2017. – стр. 308-310

59. Коваленко О.Н., Тувин А.А. Плетение: прошлое, настоящее, будущее//Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2017. - № 1 (1). – стр. 289-294
60. Шабалов А.В., Халиулин В.И. Исследование процесса изготовления преформ методом радиального плетения на оправке с криволинейной формой// Сборник трудов международной научно-практической конференции «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности». Издательство: Издательство Казанского государственного технического университета. - 2014. – стр. 202-204
61. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Свойства полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе плетеных преформ//Труды ВИАМ. -2014.- №3.- стр. 4
62. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Использование технологий плетения при производстве элементов конструкций из ПКМ//Труды ВИАМ.– 2013. - №10. – стр. 4
63. Донецкий К. И., Раскутин А. Е., Хилов П. А., Лукьяненко Ю. В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор)//Труды ВИАМ. – 2015. - №9. - стр. 77- 85
64. Григорьев М.М., Орлов Е.В. Современные полимерные композиционные материалы и технологии для авиационной промышленности//Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2015. - №1. - С.10-14
65. Богомолов П.И., Козлов И.А., Бируля М.А. Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов//Технико-технологические проблемы сервиса. - 2017. - №1(39). – с. 22-27
66. L.Tong. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites. // L.Tong, A.P.Mouritz, M.K.Bannister. // Oxford: Elsevier Science Ltd, 2002. - 241 с.

67. Киселев А.М. Определение перспективных направлений в построении автоматизированных систем проектирования 3D-преформ и прогнозирования заданных свойств композиционных материалов на их основе//Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2015. - № 5 (358). – стр. 193-197
68. Колобов Ю.В. Разработка современных отечественных ткацких комплексов для производства технического текстиля, тканых преформ, новых текстильных изделий. Цели, проблемы, достижения//Сборник трудов конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». Издательство: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. – 2016. – стр. 5
69. Сергеев В.Т. Современные технологии и оборудование для изготовления армирующих многослойных тканей и 3D тканых преформ// Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2017. - №1(1). - 268-274
70. Киселев А.М., Селиверстов В.Ю., Киселев М.В. Методы проектирования цельнотканых 3D преформ// Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). - 2017. - №1(1). – стр. 67-72
71. Киселев А.М., Киселев М.В. Проектирование и прогнозирование физико-механических свойств композиционных материалов на основе 3D-текстильных преформ// Известия высших учебных заведений. технология текстильной промышленности. – 2017. - №1(367). – стр. 325-329
72. Сидорина А. И., Гуняева А. Г. Тканые армирующие углеродные наполнители для полимерных композиционных материалов. Обзор// Химические волокна. – 2017. - №2. – стр. 20-23
73. Ерёмкин Д. И. Разработка метода проектирования и способа изготовления трехмерного тканого каркаса лопатки вентилятора: диссертация ... кандидата технических наук: 05.19.04 / Ерёмкин Денис

Иванович; [Место защиты: Моск. гос. ун-т дизайна и технологии] - Москва, 2010. - 164 с.: ил. РГБ ОД, 61 10-5/1644

74. Шагеев А.М., Микрюкова Н.С., Лапин Е.В. Цельнотканые каркасы-оболочки -наполнители перспективных композиционных материалов//Вестник ПНИПУ, Аэрокосмическая техника. -2015. - №42. – стр. 132-149

75. Lomov S.V., Ivanov D.S., Perie G., Verpoest I. Modelling 3D-fabrics and 3D- reinforced Composites /In: Challenges and Solutions. World Conference on 3D- fabrics. Manchester. 2008.

76. Mattheij P., Gliesche K., Feltin D. 3D reinforced stitched carbon/epoxy laminates made by Tailored Fibre Placement// COMPOSITES PART A: APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING. Т. 31. № 6. 2000. С. 571-581.

77. Method for producing multilayer Tailored Fiber Placement (TFP) preforms using meltable fixing fibers: Pat. WO 0245932 (A1), B29B 11/16, Gessler Andreas [DE], 13.06.2002.

78. Method for manufacturing a preform and its use in the manufacture of a composite part. EP2599614 (B1), B29C 70/08, Hervé Grelin [FR], 05.06.2013.

79. Method for producing one- or multi-layer fibre preforms with a TFP method. EP1907195 (A1), B29B11/16; Joern Paul [DE]; Eberth Ulrich [DE], 04.09.2008.

80. Paul Mattheij, Konrad Gliesche, Dirk Feltin. Tailored Fiber Placement- Mechanical Properties and Applications//Journal of Reinforced Plastics and Composites. Volume 17. issue 9. Dresden. 1998. P. 774-786.

81. Ginger Gardiner. Tailored Fiber Placement: Besting metal in volume production//Plastic Technology. №2. 2013

82. Carosella S. Tailored Fibre Placement – Merging stitching and fibre placement technologies// ICS Europe, JEC Paris. 2012

83. Carosella S. Tailored Fibre Placement – an option for automated high volume Preform Production// Symposium on Automation of Advanced Composites and its Technology, materials of conference SAMPE Europe Symposium 2012 (SEMAT). 2012. P.52-58

84. Михеев П.В., Орлов М.А., Шаталов Р.Л., Верхов Е.Ю. Влияние прошивки преформы арамидными нитями на сдвиговые характеристики конечного изделия из углепластика // Системные технологии. – № 3 (16), 2015, с. 37 – 42
85. Михеев П.В., Орлов М.А., Малышев А.Н., Шаталов Р.Л., Верхов Е.Ю. Использование арамидных волокон для увеличения прочности углепластика при сдвиге вдоль слоев//Известия МГТУ МАМИ. – 2015. - №1 (23). – т.2. – стр.37-40
86. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.:Машиностроение, 1984. 263 с.
87. Бидерман В.Л. Упругость и прочность анизотропныхстеклопалстиков. – В кн.: расчеты на прочность. Вып. 11, М.:Машиностроение, 1965, с. 3 -30.
88. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1098. 375 с.
89. Болотин В.В. Плоская задача теории упругости для деталей из армированных материалов. -В кн.: Расчеты на прочность. №12. М.:Машиностроение. 1966, с. 3 – 31.
90. Мальмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. Рига: Зинатне, 1980., 582 стр.
91. Ван ФоФы, Г.А.Конструкции из армированных пластмасс. Киев: Техника, 1971, 220 с.
92. Хашин З., Розен Б.В. Упругиемодули материалов, армированных волокнами// Труды американского общества инженеров-механиков. 1969, №2, с.223-232.
93. Скудра А.М., Булавс Ф.Я., Роценск К.А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1971, 204 с.
94. Григолюк Э.И., Фильштинский Л.А. «О жесткости двоякопериодических решеток» - Изв. АН СССО. Механикатвердоготела 1970, №1, с. 75-79.

95. Болотин В.В. Теория армированной слоистой среды со случайными начальными неправильностями//Механика полимеров, 1966, №1, с.11-19.
96. Торнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник, М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
97. Жигун И.Г., Поляков В.А. Свойства пространственно-армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978, 215 с.
98. Скудра А.М., Булавс Ф.Я Прочность армированных пластиков//М.Ж Химия, 1982. 216 с.
99. Иванова В.С., Копьев И.М. и др. Упрочнение металлов волокнами. М.: Наука, 1973, 206 с.
100. Reuss A. Berchnung der Fliessgrgenza von Mischkristllen auf Grund der Plastizitatsbedingung fur Einkristall – Z. angew. Math.,Mech., 1929, Bd.9, n1,S. 49-58.
101. Шермергор Г.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1997, 400с
102. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М.: Издательство МГУ, 1984, 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора –
директор исследовательского центра
«Динамика, прочность, надёжность»
ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»



Ножницкий Ю.А.

2019г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Орлова Максима Андреевича

по теме: «Разработка технологии создания элементов газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов с применением автоматизированной нашивки ровингом»

Настоящим актом подтверждается, что положения и результаты диссертационного исследования М.А. Орлова внедрены в научную и практическую деятельность ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Разработанная М.А. Орловым технология создания преформ для изделий из полимерного композиционного материала (ПКМ) методом автоматизированной нашивки углеродного ровинга на водорастворимую подложку применена при изготовлении преформы лопатки компрессора. Полученные по вышеуказанной технологии преформы лопатки компрессора были использованы при изготовлении рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) из ПКМ на нашем предприятии.

Применение данной технологии при изготовлении лопаток компрессора МГТД из ПКМ позволило улучшить механические свойства материала конструкции. Увеличились предел прочности на сдвиг в плоскости армирования и прочность при межслоевом сдвиге на 29% и 23% соответственно по сравнению с характеристиками материала с идентичной схемой армирования, но без прошивки углеродного ровинга.

Результаты работы и научно-практические рекомендации автора диссертации по применению разработанной технологии при производстве преформ для изделий из ПКМ планируется использовать в дальнейших проектах, научных и экспериментальных исследованиях выполняемых ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Начальник сектора 20602

Пальчиков Д.С.

Начальник сектора 20603

Мезенцев М.А.



**КОМПОЗИТЫ
РОССИИ**
МГТУ имени Н.Э. Баумана

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«МЕЖОТРАСЛЕВОЙ ИНЖИНИРИНГОВЫЙ ЦЕНТР
МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА»
(ООО «МИЦ МГТУ ИМ. Н.Э.БАУМАНА»)

Бауманская ул., д. 58/25, корп. 8, комната 1,5,
г. Москва, 105005
ОГРН 5147746379523
ИНН 7701415302, КПП 770101001
Тел.: +7 (499) 899-21-26
<http://www.emtc.ru>, e-mail: iec@emtc.ru

№ 001/11
На № _____ от 12.08.2020

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«МЕЖОТРАСЛЕВОЙ ИНЖИНИРИНГОВЫЙ ЦЕНТР
МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА»
(ООО «МИЦ МГТУ ИМ. Н.Э.БАУМАНА»)

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Орлова Максима Андреевича
по теме: «Разработка технологии создания элементов газотурбинного
двигателя из полимерных композиционных материалов с применением
автоматизированной нашивки ровинга»

Настоящим актом подтверждается, что результаты, полученные в ходе диссертационного исследования Орлова М.А., используются в учебном процессе при повышении квалификации специалистов, а также при выполнении прикладных научных исследований и разработок в рамках выполнения контрактов предприятия.

Генеральный директор

Ведущий инженер



А.С. Бородулин

А.Н. Калинин