



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ \_\_\_\_\_ СПЕЦИАЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ \_\_\_\_\_

КАФЕДРА \_\_\_\_\_ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ \_\_\_\_\_

# **РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

## ***К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ***

### ***НА ТЕМУ:***

***Разработка методов интеллектуального анализа  
выявления дефектов для оценки эксплуатационного  
ресурса композитных элементов воздушных судов***

Студент группы СМ13-И81Б

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

Ли Мёнын

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

С.В. Резник

Консультант

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

С.В. Резник

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)

Л.В. Денисова

2022 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой СМ13  
(Индекс)  
С.В. Резник  
(И.О.Фамилия)  
«      »        20        г.

## З А Д А Н И Е

### на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Студент группы СМ13-И81Б

Ли Мёнын  
(фамилия, имя, отчество)

Тема квалификационной работы Разработка методов интеллектуального анализа выявления дефектов для оценки эксплуатационного ресурса композитных элементов воздушных судов

Источник тематики (НИР кафедры, заказ организаций и т.п.)

Личная инициатива

Тема квалификационной работы утверждена распоряжением по факультету  
СМ № 44/МА-1 от «02» декабря 2021 г.

#### **Часть 1. Литературный обзор**

Литературный обзор современных методов неразрушающего контроля в элементах летательных аппаратов. Анализ механических и теплофизических характеристик композитных материалов.

#### **Часть 2. Разработка подхода для обнаружения дефектов в элементах летательных аппаратов с использованием алгоритмов машинного обучения**

Выполнено сравнение существующих подходов для неразрушающего контроля элементов летательных аппаратов с перспективными, использующими алгоритмы машинного обучения. Рассмотрена структурная система контроля безопасности в полёте и используемые в ней алгоритмы машинного обучения

#### **Часть 3. Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния головного обтекателя ракеты-носителя в программном комплексе ANSYS.**

Разработка метода обнаружения дефектов с использованием результатов численного моделирования и алгоритмов машинного обучения.

Выполнен анализ термонапряжённого состояния трёхслойной конструкции головного обтекателя ракеты-носителя. Предложена универсальная математическая модель, позволяющая выявлять критические дефекты в элементах летательных аппаратов из композиционных материалов.

**Оформление квалификационной работы:**

Расчетно-пояснительная записка на 100 листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)  
28 рисунков, 4 таблиц, презентация из 15 слайдов

---

---

---

---

Дата выдачи задания « 02 » декабря 2021 г.

В соответствии с учебным планом выпускную квалификационную работу выполнить в полном объеме в срок до « 01 » июня 2022 г.

**Руководитель квалификационной работы**

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)      С.В. Резник  
(И.О.Фамилия)

**Студент**

\_\_\_\_\_  
(Подпись, дата)      Ли Мёнын  
(И.О.Фамилия)

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

ФАКУЛЬТЕТ СМ  
КАФЕДРА СМ13  
ГРУППА СМ13-И81Б

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой СМ13  
(Индекс)  
С.В. Резник  
(И.О.Фамилия)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы студента:  
Ли Мёнын**

(фамилия, имя, отчество)

Тема квалификационной работы « Разработка методов интеллектуального анализа выявления дефектов для оценки эксплуатационного ресурса композитных элементов воздушных судов»

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Сроки выполнения этапов		Отметка о выполнении	
		план	факт	Должность	ФИО, подпись
1.	Задание на выполнение работы. Формулирование проблемы, цели и задач работы	<u>02.12.2021</u> <i>Планируемая дата</i>	02.12.2021	Руководитель ВКР	
2.	1 часть <u>Литературный обзор</u>	<u>15.01.2022</u> <i>Планируемая дата</i>	15.01.2022	Руководитель ВКР	
3.	2 часть <u>Разработка подхода для обнаружения дефектов в элементах летательных аппаратов с использованием алгоритмов машинного обучения</u>	<u>01.03.2022</u> <i>Планируемая дата</i>	01.03.2022	Руководитель ВКР	
4.	3 часть <u>Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния головного обтекателя ракеты-носителя в программном комплексе ANSYS.</u>	<u>03.04.2022</u> <i>Планируемая дата</i>	03.04.2022	Руководитель ВКР	
5.	1-я редакция работы	<u>10.05.2022</u> <i>Планируемая дата</i>	10.05.2022	Руководитель ВКР	
6.	Подготовка доклада и презентации	<u>17.05.2022</u> <i>Планируемая дата</i>	17.05.2022		
7.	Заключение руководителя	<u>27.05.2022</u> <i>Планируемая дата</i>	27.05.2022	Руководитель ВКР	
8.	Нормоконтроль	<u>30.05.2022</u> <i>Планируемая дата</i>	30.05.2022	Нормоконтролер	
9.	Защита работы на ГЭК	<u>07.06.2022</u> <i>Планируемая дата</i>	07.06.2022		

Студент \_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Руководитель работы \_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

## **РЕФЕРАТ**

Объем работы – 100 страниц. Использовано 18 источников. Работа содержит 4 таблиц и 28 рисунков.

Ключевые слова: ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ФОРМА ДЕФЕКТА, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ, КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТА, ТРЁХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ.

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка методов интеллектуального анализа выявления дефектов для оценки эксплуатационного ресурса композитных элементов воздушных судов».

Цель работы – повышение точности прогнозирования критических дефектов в элементах летательных аппаратов за счёт использования численного моделирования напряженно-деформированного состояния и алгоритмов машинного обучения.

Объект исследования – головной обтекатель ракеты-носителя.

Предмет – температурное и напряжённо-деформированное состояние головного обтекателя ракеты-носителя, алгоритмы машинного обучения.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	8
1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЁЖНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	9
1.1. Примеры использования композитных материалов в конструкциях летательных аппаратов.....	9
1.2. Анализ требований между народными норм лётной годности в части прочности и ресурса композитных элементов воздушных судов .....	14
1.3. Стратегии управления ресурсом воздушных судов и методы его прогнозирования.....	27
2. СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	32
2.1. Виды дефектов .....	32
2.2. Классификация средств неразрушающего контроля .....	38
2.3. Сравнительный анализ средств неразрушающего контроля для металлических и композитных деталей .....	42
2.4. Перспективы применения алгоритмов машинного обучения для неразрушающего контроля прочностной надёжности композитных элементов ЛА .....	47
3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЁЖНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ .....	52
3.1. Описание объекта исследования из ПКМ и обоснование расчётной модели для исследования прочностной надёжности. ....	52
3.2. Построение параметризованной конечно-элементной модели и определение механических характеристик элемента из ПКМ.....	54

3.3. Разработка алгоритма прогнозирования прочностной надёжности элемента из ПКМ с использованием временных рядов и теоремы Байеса.	72
3.4. Применение средств машинного обучения для выявления критических дефектов детали из ПКМ. ....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	82
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	93

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Ранее композиционные материалы в аэрокосмической промышленности применялись только для изготовления декоративных элементов внутренней отделки салонов самолетов и слабо нагруженных неответственных деталей обшивки крыла.

За последние годы доля композиционных материалов в конструкции летательных аппаратов существенно возросла. Особенно часто используются углепластики (карбон), органопластики (кевлар) и стеклопластики. Данные материалы применяются в конструкциях летательных аппаратов из-за повышенных требований к весовому качеству. Также важны прочность и термостойкость данных материалов. Кроме того, использование композитных материалов позволяет повысить сопротивляемость большому лобовому сопротивлению и снизить расход топлива. При этом композиционные материалы имеют явные недостатки, заключающиеся в сложности ремонта и контроля дефектов при эксплуатации летательных аппаратов.

В последнее время автоматизация применяется во многих отраслях. Если эту автоматизацию правильно применить к проверке самолетов, она может не только уменьшить количество человеческих ошибок, но и дать большой экономический эффект. В частности, одной из самых популярных тенденций в эксплуатации самолетов является снижение эксплуатационных расходов и затрат на техническое обслуживание. Обнаружение дефектов — это работа человека, поэтому ошибки неизбежны. Кроме того, дефекты в композиционных материалах трудно выявляемы человеческим глазом. Как следствие, обнаружение дефектов в композитных материалах самолетов становится очень важным.

В данной работе предложен подход для обнаружения дефектов в элементах летательных аппаратов из композиционных материалов.



# **1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЁЖНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ.**

## **1.1. Примеры использования композитных материалов в конструкциях летательных аппаратов.**

### **Развитие современных композиционных материалов**

Стекловолокно, состоящее из стеклянных волокон, встроенных в матрицу из смолы, является наиболее распространенным композитным материалом, впервые получившим известность в 1950-х годах при разработке пассажирского самолета Boeing 707. Лопатки компрессора реактивного двигателя RB211, разработанного компанией Rolls Royce в 1960-х годах, были изготовлены из углеродного волокна, которое является хрупким и обладает уникальными усталостными характеристиками.

Первоначально волокнистые композиционные материалы в небольших количествах использовались в военных самолетах в 1960-х годах и в гражданской авиации с 1970-х годов. С 1980-х годов композиты в основном использовались для вспомогательных компонентов крыла и оперения, таких как панели задней кромки крыла и рули направления. Современные композиты, состоящие из комбинации высокопрочных жестких волокон, встроенных в общий матричный материал, также широко используются в аэрокосмической промышленности.

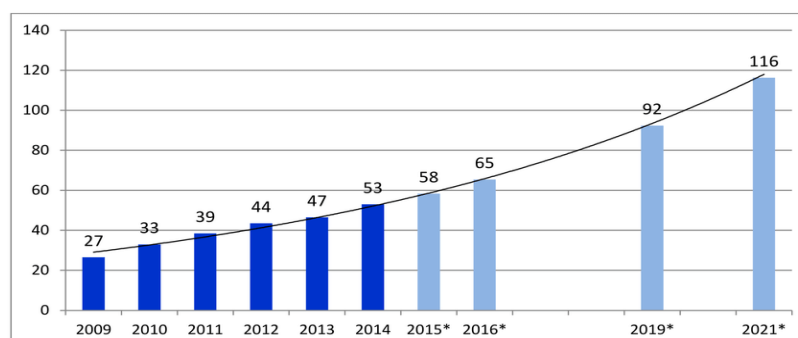


Рисунок 1 - Мировой спрос на углеродное волокно в 1000 тонн с 2009 по 2021

год

## Основные виды композиционных материалов

В технике широкое распространение получили волокнистые композиционные материалы, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами, в которых армирующие элементы несут основную нагрузку, тогда как матрица передаёт напряжения волокнам. Волокнистые композиционные материалы, как правило, анизотропны. Механические свойства композиционных материалов определяются не только свойствами самих волокон, но и их ориентацией, объёмным содержанием, способностью матрицы передавать волокнам приложенную нагрузку и др. Диаметр непрерывных волокон углерода, а также тугоплавких соединений ( $B_4C$ ,  $SiC$  и др.) обычно составляет 100-150 мкм.

Важнейшими технологическими методами изготовления композиционных материалов являются: пропитка армирующих волокон матричным материалом; формование в пресс-форме лент упрочнителя и матрицы, получаемых намоткой; холодное прессование обоих компонентов с последующим спеканием, электрохимическое нанесение покрытий на волокна с последующим прессованием; осаждение матрицы плазменным напылением на упрочнитель с последующим обжатию; пакетная диффузионная сварка монослойных лент компонентов; совместная прокатка армирующих элементов с матрицей и другие. Композиционные материалы в конструкциях, требующих наибольшего упрочнения, характеризуются расположением армирующих волокон по направлению приложенной нагрузки. Цилиндрические изделия и другие тела вращения (например, сосуды высокого давления), в основе которых лежат композиционные материалы, армируют волокнами, ориентируя их в продольном и поперечном направлениях. Причем в поперечном направлении армируют большим количеством волокон. Увеличение прочности и надежности в работе цилиндрических корпусов, а также уменьшение их массы достигается внешним армированием узлов конструкций высокопрочными и высокомодульными

волокнами, что позволяет повысить в 1,5-2 раза удельную конструктивную прочность корпусов из композиционных материалов по сравнению с цельнометаллическими корпусами.

Весьма перспективны композиционные материалы, армированные нитевидными кристаллами (усами) керамических, полимерных и др. материалов. Размеры усов обычно составляют от долей до нескольких мкм по диаметру и примерно 10-15 мм по длине. Разрабатываются композиционные материалы со специальными свойствами, например, радиопрозрачные и радиопоглощающие материалы, композиционные материалы для тепловой защиты орбитальных космических аппаратов, композиционные материалы с малым коэффициентом линейного термического расширения и высоким удельным модулем упругости и другие.

### **КМ в летательных аппаратах**

Согласно термодинамическому циклу Карно, освоенная температура газа определяет уровень совершенства авиационного двигателя. В настоящее время материалы, которые используются в турбинах, работоспособны при температурах 1100°C максимум. Чтобы они продолжали работать при более высоких температурах газа, их необходимо охлаждать. Это усложняет конструкцию и требует отбора воздуха от компрессора, из-за чего существенно снижается экономичность двигателя. Современные композиционные материалы (КМ) способны обеспечить более высокие рабочие температуры деталей турбины с существенно меньшими потерями на охлаждение или даже вовсе без него. Мы пытаемся применить для этих целей высокотемпературные КМ, в основном – керамические (ККМ). Если металлические материалы, которые сегодня применяются в турбинах, имеют удельный вес порядка 7,5–8 г/см<sup>3</sup>, то у ККМ удельный вес – 3–3,4 г/см<sup>3</sup>, то есть масса изделия снижается в два раза. А любое снижение массы – это уменьшение расхода топлива, повышение надежности. Не меньше эффект от применения КМ в холодной части ГТД. В

настоящее время тенденция такова, что эффективность двигателя повышается с увеличением степени двухконтурности, и в этом случае вентилятор приобретает все большие размеры. А ведь вес вентилятора – это порядка 30-40% веса всего двигателя.

Лопатки вентилятора ПД-35, например, имеют длину около 1,1 м, диаметр вентилятора на входе – 3 м, и в этом случае применение металлов приводит к недопустимому росту массы. Даже если гораздо меньшую лопатку для вентилятора двигателя размерности ПД-14 изготовить из сплошного титана, она будет весить 11 кг. Масса нынешней полый титановой лопатки – 8 кг, а углепластиковой – 5,5 кг. А ведь это не только экономия в 2,5 кг на каждой лопатке, которых в вентиляторе около 20. Поскольку это вращающиеся массы, то в результате их снижения уменьшается нагрузка на диск, на вал, снижается ударное воздействие на корпус при обрыве лопатки, турбину можно сделать менее мощной. Подсчитано, что каждый килограмм экономии массы вентилятора приводит к снижению на 3,75 кг массы всего двигателя. А если двигатель легче, то снижается нагрузка на крыло и его тоже можно облегчить. В целом же при замене металлов на КМ масса отдельных деталей снижается на 10–50%, долговечность улов увеличивается на 5–25%, а экономичность двигателя возрастает на 3–8%.

В настоящее время технология проектирования лопаток освоена и используется при конструировании лопаток из полимерных композитных материалов различного типоразмера и назначения. Примечательно, что примерно половина самолетов Airbus A350 и Boeing 787 сделана из композитных материалов. Использование этих материалов в двух гидроагрегатах, несомненно, дает преимущества. Композитные материалы не такие тяжелые, как традиционные конструкции, такие как алюминий. Более того, они не устают и не подвержены коррозии из-за внешних факторов. По весу Boeing 787 на 50% состоит из композитов (но на 80% по объему), на 20% из алюминия, на 15% из

титана, на 10% из стали и на 5% из других элементов. Композиты занимают основную часть конструкции. Однако с этим ходом общий вес снижается в среднем на 20%.

Можно не только сэкономить на весе. Еще одно преимущество состоит в том, что композитным конструкциям можно придать любую форму. Поэтому Boeing сделал фюзеляж 787-го в виде нескольких стволов вместо нескольких алюминиевых панелей меньшего размера, которые необходимо было соединить. По другую сторону пруда Airbus также является поклонником композитных материалов. Это особенно подчеркивает использование пластика, армированного углеродными волокнами (CFRP). Здесь углеродные волокна фиксируются пластиковой смолой. Это обеспечивает лучшее соотношение прочности и веса, чем у металлов, и снижает риск усталости. Не только фюзеляж использует преимущества этой науки. Эти материалы можно найти по всей раме. Большая часть крыла A350 XWB состоит из легких углеродных композитов, таких как верхняя и нижняя крышки.

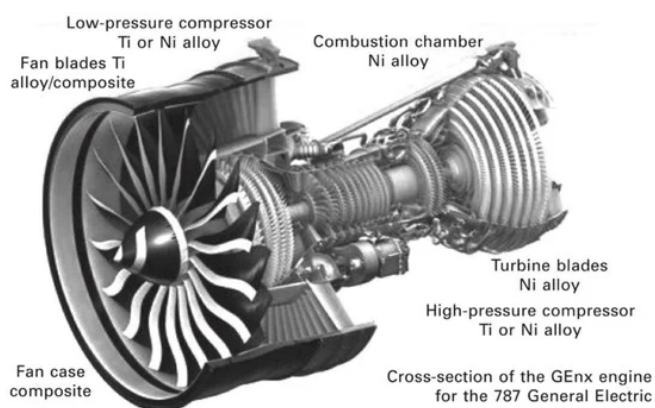


Рисунок 2 - Распределение сплавов на основе Ni и Ti в двигателе самолета



Рисунок 3 - Секция фюзеляжа 41 производства Spirit AeroSystems

## **1.2. Анализ требований между народными норм лётной годности в части прочности и ресурса композитных элементов воздушных судов**

### **Сертификат летной годности**

Сертификат летной годности (С из Л) или сертификат летной годности - это официальный документ, выдаваемый Национальным Авиационным Управлением (НАУ) для подтверждения годности воздушного судна к полетам. Каждое отдельное воздушное судно должно получить свой собственный уровень С или Л, который достигается, когда может быть показано, что он соответствует сертифицированной типовой конструкции и находится в состоянии для безопасной эксплуатации. Как правило, гражданские самолеты не имеют права летать, если у них нет действительного сертификата С или Л.

В зависимости от режима регулирования, С из Л будет нуждаться в периодической повторной валидации или периодическом обновлении, которое может включать завершение графика летных испытаний. В США это

объясняется в FAR, часть 21, подраздел Н - Сертификаты летной годности. В ЕС государства-члены должны использовать не истекающий срок C of A (EASA Form 25), как описано в EASA Part 21 Subpart Н. Этот бессрочный C of A подтверждается выдачей сертификата проверки летной годности (ARC), формы EASA. 15а. Работа по выполнению этой проверки выполняется соответствующей организацией по поддержанию летной годности (CAMO), работающей от имени эксплуатанта.

### **Сертификат проверки летной годности - операторы из ЕС**

Чтобы удовлетворить требования к этой проверке летной годности, CAMO проводит полную документированную проверку записей воздушного судна, как описано в EASA Part M.A.710 [ЕС, 2014]:

- а. Записи об обслуживании, модификациях, LLP, конфигурации, вводе в эксплуатацию, ремонте, записи часов и циклов, массы и баланса и т.д.
- б. Персонал CAMO по проверке летной годности проводит физический осмотр воздушного судна.
- с. Обязательная маркировка / табло, соответствие руководству по летной эксплуатации и документации; явных дефектов нет; нет несоответствий между самолетами и записями.

Срок действия ARC может быть продлен до 3 лет, если самолет обслуживается в «контролируемой среде», т.е. утвержденный CAMO может выдать ARC и продлить его дважды. Продление должно включать документально подтвержденное подтверждение того, что самолет остается годным к полетам. Контролируемая среда означает, что самолет:

непрерывно управляется утвержденной / заключенной по контракту организацией части М подраздела G в течение не менее 12 месяцев, и обслуживается надлежащим образом утвержденной организацией по

техническому обслуживанию. Неконтролируемая среда означает, что поддержание летной годности воздушного судна контролируется владельцем или эксплуатантом в соответствии с EASA Part M Subpart C [EC, 2014]. Самолет должен обслуживаться соответствующим образом лицензированным инженером, за исключением «сложных задач», которые могут быть сертифицированы только организацией, одобренной согласно Подчастям F или Части 145. Раз в 12 месяцев владелец / оператор должен заключить договор об услугах с САМО, который должен провести полную проверку летной годности, прежде чем давать рекомендации NAA для выдачи ARC. NAA может также пожелать обследовать воздушное судно перед выдачей ARC.

### **Требования к прочности**

Связанные структуры включают несколько поверхностей раздела (например, композит-композит, композит-металл или металл-металл), где по крайней мере одна из поверхностей раздела требует дополнительной подготовки поверхности перед склеиванием. Общий характер технических параметров, определяющих различные типы клееных конструкций, аналогичен. Квалифицированный процесс склеивания документируется после демонстрации повторяемых и надежных этапов обработки, таких как подготовка поверхности. Это влечет за собой понимание чувствительности структурных характеристик на основе ожидаемых отклонений, допускаемых для каждого процесса. Для обеспечения устойчивости процесса рекомендуется определение характеристик за пределами технологического процесса. В случае склеивания межфазных поверхностей из композитов требуется квалифицированная подготовка поверхности всех ранее отвержденных субстратов, чтобы активировать их поверхность для химической адгезии. Все металлические поверхности в связанной структуре также имеют химически активированные поверхности, созданные в процессе квалифицированной подготовки. Многие технические вопросы, связанные с объединением, требуют наличия кросс-функциональных



команд для успешных приложений. Приложения требуют строгого контроля процесса и тщательного подтверждения структурной целостности.

(1) Многие отказы от облигаций и проблемы в обслуживании были связаны с недействительной квалификацией или недостаточным контролем качества производственных процессов. Физические и химические испытания могут использоваться для контроля подготовки поверхности, смешивания клея, вязкости и свойств отверждения (например, плотности, степени отверждения, температуры стеклования). Жесткость и прочность при сдвиге внахлест являются обычными механическими испытаниями для аттестации процесса склеивания и склеивания. Испытания на сдвиг не обеспечивают надежного измерения долговечности и ухудшения условий окружающей среды, связанных с плохими процессами склеивания (то есть отсутствием адгезии). Некоторые виды испытаний на отслаивание оказались более надежными для оценки надлежащей адгезии. Без химического связывания существует так называемое состояние «слабого соединения», когда склеиваемое соединение либо нагружается отрывающими силами, либо подвергается воздействию окружающей среды в течение длительного периода времени, либо и то, и другое. Нарушения адгезии, которые указывают на отсутствие химической связи между подложкой и клеящими материалами, считаются неприемлемым видом разрушения во всех типах испытаний. Проблемы материала или процесса склеивания, которые приводят к нарушениям адгезии, решаются до проведения квалификационных испытаний.

(2) Спецификации процесса необходимы для контроля адгезии при производстве и ремонте. «Менталитет контроля процесса», который включает в себя сочетание инспекций и испытаний в процессе производства, оказался наиболее надежным средством обеспечения качества клеевых соединений. Окружающая среда и чистота помещений, используемых для процессов склеивания, контролируются до уровня, подтвержденного квалификацией и

подтверждением испытаний конструкции. Клеи и материалы подложки контролируются в соответствии с требованиями спецификаций, которые согласуются с квалификацией материала и процесса склеивания. Процессы склеивания, используемые для производства и ремонта, соответствуют допускам, подтвержденным при аттестации, разработке проектных данных и проверочных испытаниях конструкции. Некоторые ключевые аспекты процесса изготовления связки, требующие такого контроля, включают обращение с материалами и их хранение; подготовка поверхности склеивания; контроль допусков размеров сопрягаемых деталей; нанесение клея и прижимное давление; контроль толщины линии склеивания; отверждение склеенных деталей (терморегулирование); осмотр отвержденных деталей и процедуры обращения с ними; обучение специалистов по специальным материалам, процессы, инструменты и оборудование. Подготовка поверхности склеивания и последующий контроль обработки, ведущий к сборке и отверждению склеивания, должны тщательно контролироваться во времени и под воздействием окружающей среды и загрязнений.

(3) 14 CFR § 23.573 (a) устанавливает требования для обоснования основных составных конструкций планера, включая соображения по устойчивости к повреждениям, усталости и клеевым соединениям. Несмотря на то, что это правило для малых самолетов, обычно ожидаются те же стандарты характеристик для транспортных самолетов и самолетов категории винтокрылых (посредством специальных условий и выдачи документов).

(a) Для любого клеевого соединения в § 23.573 (a) (5), в частности, говорится: «разрушение которого приведет к катастрофической потере самолета, предельная грузоподъемность должна быть подтверждена одним из следующих методов: (i) Максимальные отслоения каждого склеенного соединения, соответствующие его способности выдерживать нагрузки, указанные в параграфе (a) (3) настоящего документа. раздел должен быть

определен путем анализа, тестов или того и другого. Расслоение каждого клеевого соединения больше указанного должно предотвращаться конструктивными особенностями; или (ii) контрольные испытания должны проводиться для каждого производственного изделия, которое будет применять критическую предельную расчетную нагрузку к каждому критическому соединению; или (iii) должны быть разработаны повторяющиеся и надежные методы неразрушающего контроля, обеспечивающие прочность каждого соединения.»

(b) Эти варианты не отменяют необходимости в квалифицированном процессе склеивания и строгом контроле качества склеенных конструкций. Например, отказоустойчивость, подразумеваемая первым вариантом, не предназначена для обеспечения адекватной безопасности для систематической проблемы плохого соединения процесс применяется к флоту авиационных конструкций. Вместо этого он обеспечивает отказоустойчивость от проблем с соединением, которые могут иногда возникать на определенных участках (например, недостаточное местное контактное давление соединения или загрязнение). Выполнение статических контрольных испытаний для ограничения нагрузки, что является вторым вариантом, может не выявить слабые связи, требующие воздействия окружающей среды и времени для снижения прочности склеенного соединения. Этот вопрос должен быть освещен путем надлежащей демонстрации того, что квалифицированные связующие материалы и процессы обладают долговременной экологической устойчивостью. Наконец, третий вариант открыт для будущего развития и проверки технологии неразрушающего контроля (NDI) для обнаружения слабых связей, которые со временем разрушаются и приводят к нарушениям адгезии. На сегодняшний день такая технология не была надежно продемонстрирована в промышленных масштабах.

(4) Нарушения адгезии, обнаруженные при производстве, требуют немедленных действий для выявления конкретной причины и изоляции всех затронутых деталей и узлов для утилизации. Нарушения сцепления, обнаруженные в процессе эксплуатации, требуют немедленных действий для определения причины, изоляции затронутого воздушного судна и проведения целенаправленного осмотра и ремонта. В зависимости от предполагаемой серьезности проблемы сцепления могут потребоваться немедленные действия для восстановления летного состояния пострадавшего воздушного судна.

Для конкретной структурной конфигурации отдельного компонента (точечный расчет) могут быть установлены расчетные значения, которые включают эффекты соответствующего расчета. Особенности (отверстия, стыки и т. д.). Для выполнения анализа необходимы конкретные показатели, которые количественно определяют серьезность состояний структурных повреждений композитных материалов, вызванных угрозами повреждения от посторонних воздействий (т.е. Эквивалент длины металлической трещины). В результате часто требуется испытание для определения остаточной прочности, включая структурные эффекты критического места повреждения и комбинированных нагрузок. Различные уровни ударного повреждения обычно учитываются путем ограничения уровней расчетной деформации для критериев расчета предельной и предельной комбинированной нагрузки. Таким образом, можно провести рациональный анализ, подкрепленный испытаниями, для определения остаточной прочности деталей точечного дизайна.

### **Подтверждение статической прочности**

При обосновании статической прочности конструкции композитной конструкции следует учитывать все случаи критических нагрузок и связанные с ними виды отказов. Он также должен включать влияние окружающей среды (включая структурные остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления), изменчивость материала и процесса, необнаруживаемые дефекты

или любые дефекты, которые допускаются контролем качества, критериями приемки производства, а также допустимые повреждения при эксплуатации.

Документация по техническому обслуживанию конечного продукта. Статическая прочность композитной конструкции должна быть продемонстрирована с помощью программы испытаний компонентов на предельную нагрузку в соответствующей среде, если только опыт работы с аналогичными конструкциями, системами материалов и нагрузками не доступен для демонстрации адекватности анализа, поддерживаемого субкомпонентом, элементом и купоном. тесты или тесты компонентов для допустимых более низких уровней нагрузки. Необходимый опыт для подтверждения. Анализ должен включать предыдущие испытания компонентов на предельную нагрузку с аналогичными конструкциями, системами материалов и загрузками.

а. При оценке статической прочности следует учитывать эффекты повторяющейся нагрузки и воздействия окружающей среды, которые могут привести к ухудшению свойств материала. Это может быть продемонстрировано анализом, подтвержденным свидетельствами испытаний, испытаниями на уровне купона, элемента или подкомпонента, в зависимости от ситуации, или, альтернативно, соответствующими имеющимися данными. Более ранние обсуждения в этом АС касались воздействия окружающей среды на свойства материала (параграф 6.d) и защиту конструкции (параграф 6.e). Для критических условий нагружения существуют три подхода для учета предшествующих повторных нагружений и / или воздействия окружающей среды в полномасштабных статических испытаниях.

(1) При первом подходе полномасштабные статические испытания следует проводить на конструкции с предварительным повторным нагружением и кондиционировать для моделирования критического воздействия окружающей среды, а затем испытывать в этой среде.

(2) Второй подход основан на данных испытаний купонов, элементов и субкомпонентов для определения влияния повторяющейся нагрузки и воздействия окружающей среды на статическую прочность. Деградация, характеризующаяся этими испытаниями, затем должна быть учтена в полномасштабном демонстрационном испытании на статическую прочность (например, коэффициенты перегрузки) или в анализе этих результатов (например, показывая положительный запас прочности с расчетными значениями, которые включают ухудшающие эффекты окружающей обстановка и повторная нагрузка).

(3) На практике аспекты первых двух подходов могут быть объединены для получения желаемого результата (например, полномасштабное статическое испытание может быть выполнено при критической рабочей температуре с коэффициентом нагрузки, чтобы учесть влагу, поглощаемую в течение срока службы конструкции самолета). . Альтернативные средства учета окружающей среды с использованием проверенных тестов и анализов (например, эквивалентное повышение температуры для учета влияния влаги без химического изменения материала) могут быть предложены заявителем администратору для утверждения.

б. Прочность композитной конструкции должна быть надежно установлена постепенно, с помощью программы анализа и серии испытаний, проводимых с использованием образцов разного уровня сложности. Эти тесты и анализы на уровне купонов, элементов, деталей и субкомпонентов, которые часто называют в промышленности подходом «строительный блок», могут использоваться для решения проблем изменчивости, окружающей среды, структурной неоднородности (например, стыков, вырезов или другие факторы напряжения), повреждения, производственные дефекты, а также детали конструкции или процесса. Как правило, тестирование со временем переходит от простых образцов к более сложным элементам и деталям. Этот подход

позволяет получить данные, собранные для достаточной корреляции анализа, и необходимые реплики для количественной оценки вариаций, возникающих в более крупных структурных масштабах. Уроки, извлеченные из первоначальных тестов, также помогают избежать ранних отказов в более сложных полномасштабных тестах, которые более затратны в проведении и часто возникают позже в графике программы сертификации. (1) На рисунках 1 и 2 представлена концептуальная схема испытаний, обычно включаемых в подход к конструктивным блокам для конструкций с неподвижным крылом и лопастями несущего винта, соответственно. Большое количество тестов, необходимых для обеспечения статистической основы, происходит с самых низких уровней (купонов и элементов), а характеристики структурных деталей проверяются меньшим количеством тестов подкомпонентов и компонентов. Детальные и субкомпонентные тесты могут использоваться для проверки способности методов анализа прогнозировать локальные деформации и виды отказов. Дополнительные статистические соображения (например, повторяющиеся точечные испытания конструкции и / или факторы перегрузки компонентов, чтобы охватить изменчивость материала и процесса) потребуются, когда валидация анализа не будет достигнута. Программа обоснования статической прочности должна также учитывать все критические условия нагружения для всех критическая структура. Сюда входит оценка требований к остаточной прочности и жесткости после заданного срока службы, в которой учитываются повреждения и другие виды ухудшения характеристик, вызванные периодом службы.

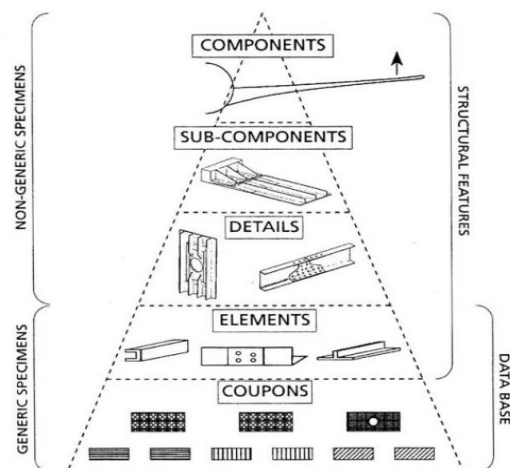


Рисунок 4 - Принципиальная схема испытаний строительных блоков для неподвижного крыла

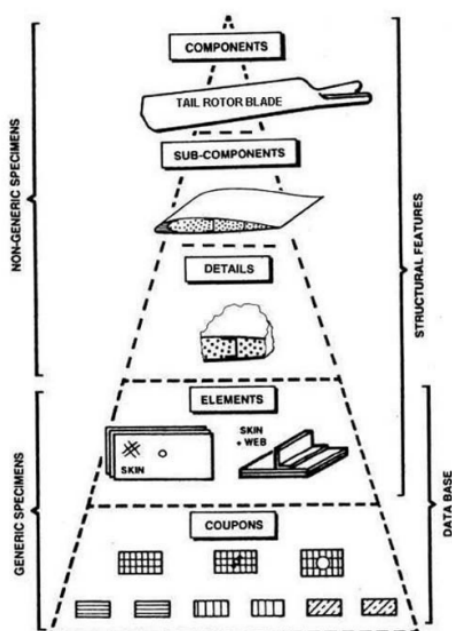


Рисунок 5 - Принципиальная схема испытаний строительных блоков для лопасти рулевого винта



(2) Успешное обоснование статической прочности композитных конструкций традиционно зависело от надлежащего учета концентраций напряжений (например, чувствительности деталей к надрезам и ударного повреждения), конкурирующих видов разрушения и внеплоскостных нагрузок. Подход к обоснованию составных структур на основе комплексных строительных блоков решает наиболее важные структурные проблемы в тестовых статьях с возрастающим уровнем сложности, так что многие области надежной работы могут быть продемонстрированы до тестирования компонентов. Детали и испытания подкомпонентов должны установить критерии отказа и учесть ударные повреждения собранных композитных конструкций. Компонентные тесты необходимы для обеспечения окончательного подтверждения учета комбинированных нагрузок и сложных путей нагружения, которые включают некоторые эффекты вне плоскости. При использовании подхода строительных блоков для испытаний компонентов будут определены случаи критических нагрузок и связанные с ними режимы отказов с использованием аналитических методов, которые поддерживаются валидацией испытаний.

в. Статическое испытание компонента может быть выполнено в окружающей атмосфере, если влияние окружающей среды надежно предсказано испытаниями строительных блоков и учтено в статическом испытании или при анализе результатов статического испытания.

г. Образцы для статических испытаний должны быть изготовлены и собраны в соответствии с производственными спецификациями и процессами, чтобы образцы для испытаний представляли структуру производства, включая дефекты, соответствующие ограничениям, установленным критериями приемки для производства.

д. При обосновании статической прочности следует учитывать вариативность материала и обработки композитной конструкции. Это в первую

очередь достигается за счет установления достаточного контроля процессов и качества для изготовления конструкции и надежного подтверждения требуемой прочности путем испытаний и анализа. Разброс прочностных свойств из-за изменчивости материалов и процессов характеризуется надлежащими допустимыми или расчетными значениями, которые выводятся в соответствии с 14 CFR § 2х.613. Когда детальные испытания, испытания подкомпонентов и компонентов показывают, что местные деформации адекватно спрогнозированы, и существуют положительные запасы безопасности с использованием валидированного анализа повсюду в конструкции, тогда доказательство статической прочности считается подтвержденным с использованием анализа, подтвержденного данными испытаний. В качестве альтернативы, при отсутствии достаточного строительного блока данные испытаний и проверка достоверности анализа, при испытании компонентов необходимы перегрузки, чтобы получить доказательство статической прочности конструкции с использованием подхода, называемого подтвержденным испытаниями. Коэффициенты перегрузки, применяемые в этом случае, должны быть подтверждены испытаниями или прошлым опытом и должны учитывать ожидаемые вариации материала и процесса.

е. Следует показать, что ударное повреждение, которое можно ожидать при производстве и эксплуатации, но не более установленного порога обнаруживаемости для выбранной процедуры проверки, не приведет к снижению прочности конструкции ниже предельной нагрузочной способности. Этот могут быть показаны путем анализа, подтвержденного свидетельствами испытаний, или путем сочетания тестов на уровне купона, элемента, подкомпонента и компонента. Реалистичная тестовая оценка ударных повреждений требует должного учета конструктивных деталей и граничных условий. При использовании процедуры визуального осмотра вероятное повреждение от удара на пороге надежного обнаружения называется едва

заметным ударным повреждением (BVID). При выборе мест ударов для обоснования статической прочности следует учитывать критичность местных структурных деталей и возможность осмотра места. Размер и форма ударников, используемых для обоснования статической прочности, должны согласовываться с вероятными сценариями повреждений в результате столкновения, которые могут остаться незамеченными в течение всего срока службы воздушного судна. Обратите внимание, что некоторые конструкции могут иметь обнаруживаемые ударные повреждения и по-прежнему соответствовать статическим прочностным нагрузкам и другим требованиям без ремонта (см. Обсуждение допустимых повреждений в параграфе 10.с. (1)).

ё. Существенные изменения материалов и процессов в существующей сертифицированной конструкции требуют дополнительного обоснования статической прочности.

### **1.3. Стратегии управления ресурсом воздушных судов и методы его прогнозирования**

#### **Оценка и проверка программы надежности**

Основные части Программы обеспечения надежности оператора. Элементами программы обеспечения надежности оператора обычно являются:

- Система сбора данных
- Система стандартов производительности
- Анализ и рекомендации
- Внутреннее утверждение и внедрение
- Формат отчетности и отображения

## **Документация в руководстве оператора**

Должны убедиться, что стандарты для определения временных ограничений содержат следующее:

1. Общее описание программы надежности, включая определения (или ссылки на) важных терминов, используемых в программе надежности.
2. Применение программы надежности по типам и моделям парка воздушных судов.
3. Процедуры и стандарты для сбора данных и обеспечения применимости / качества данных.
4. Ответственность организации, требования к обучению и опыту.
5. Обязанности и ответственность персонала, выполняющего требования программы. Сюда входят такие сотрудники, как те, кто следит за стандартами производительности или уровнями предупреждений / событий, анализирует операционные данные, а также члены совета директоров или персонал, выполняющий функции принятия решений.
6. Порядок контроля и пересмотра стандартов деятельности.
7. Методы анализа данных.
8. Процесс рекомендаций по корректирующим действиям, включая утверждение и выполнение.
9. Используемые или создаваемые отчеты, а также частота.
10. Стандарты и процедуры корректировки ограничений по времени.
11. Описание или ссылки на формы, уникальные для программы надежности.
12. Процедуры управления и администрирования, включая процесс пересмотра программы надежности.

13. Требования или ссылки на самоаудиты и другие процедуры мониторинга выполнения и эффективности программы надежности.

14. Описание или организационная схема организационных полномочий и делегирования программ надежности. Для администрирования программы обеспечения надежности обычно требуется совет или другой организационный орган в рамках обслуживающей организации оператора. Этот совет должен состоять из опытного и компетентного персонала с полномочиями принимать решения по утверждению изменений в графике технического обслуживания оператора.

### Моделирование и суждение

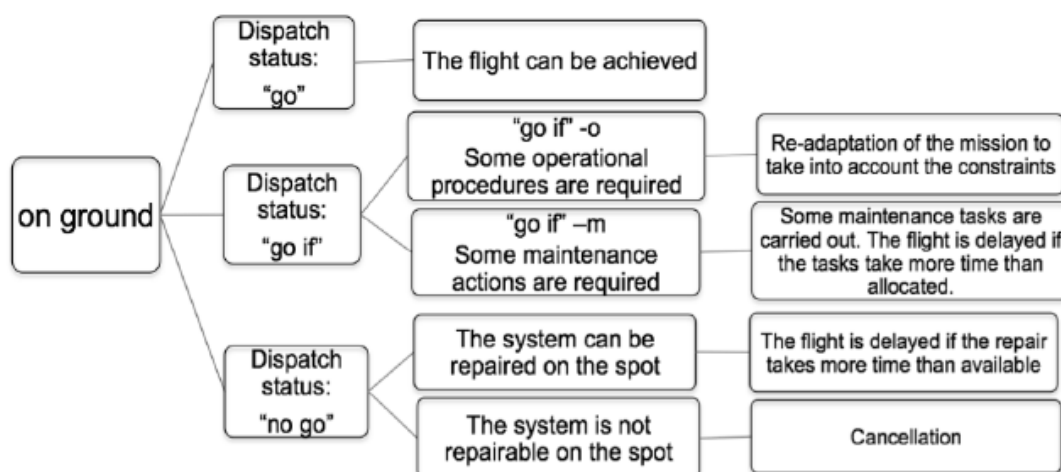


Рисунок 6 – Алгоритм проверки готовности к полёту

Миссия состоит из заданного количества последовательных полетов. Достижение миссии таково, что после каждого полета следует остановка, где самолет готовится к следующему полету. Подготовка состоит из планового

технического обслуживания, уборки салона, питания, обработки багажа и грузов и посадки пассажиров. На каждой остановке самолет осматривается и проверяются расхождения, о которых сообщалось во время предыдущего полета. При обнаружении компонента в рабочем состоянии принимается решение об отправке следующего рейса. Рис. 1 суммирует возможные результаты решения об отправке. Летный капитан обращается к утвержденному документу под названием «Перечень минимального оборудования» (MEL), в котором компоненты перечислены со статусом «годен», «годен, если» или «не годен».

– Статус «в ход» - это когда самолет может летать с вышедшим из строя компонентом.

– Статус «идти, если» разрешает полет при соблюдении некоторых условий (по другим компонентам, эксплуатационным характеристикам или работам по техническому обслуживанию). Это включает установленный крайний срок для ремонта компонента.

- Статус «no go» не позволяет самолету летать. Перед любым полетом неисправный компонент необходимо отремонтировать.

Отправка разрешена, если нет условий «не пойдет» и выполнены все условия «пойдем, если». Если самолет не соответствует требованиям к отправке из-за неисправности, для решения проблемы иницируются работы по техническому обслуживанию. Таким образом, степень серьезности отказа зависит от способности устранить проблему в рассматриваемом месте до запланированного времени отправления. Фактически, рейс считается задержанным только после превышения заданного допустимого периода времени.

Если отправка разрешена, самолет может вылететь после обработки пассажиров, груза и других наземных служб. Затем полет начинается с подруливания самолета к взлетно-посадочной полосе, где начинается взлет. В

этот период или даже после взлета полет может быть прерван в результате критического сбоя. Затем самолет возвращается в аэропорт вылета. В течение всего полета он может быть изменен, если возможности воздушного судна ухудшаются. Процедуры, изложенные в Руководстве по летной эксплуатации (FM), Руководстве по эксплуатации летного экипажа или Кратком справочнике, используются для определения того, следует ли изменить полет или нет.

Неблагоприятные ситуации при эксплуатации воздушного судна соответствуют эксплуатационным перерывам, состоящим из задержек рейсов, отмен, обратных рейсов и отклонений от курса. Задержки и отмены происходят до начала полета, в то время как возврат и изменение направления происходят во время полета.

## **2. СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **2.1. Виды дефектов**

При изготовлении деталей и производстве сборочных узлов конструкций изделий часто образуются дефекты, которые условно можно поделить на дефекты, связанные со сваркой плавлением: дефекты подготовки и сборки деталей; дефекты формы сварного шва; наружные и внутренние дефекты.

К дефектам подготовки и сборки относятся неправильный угол скоса кромок шва; слишком большое или малое притупление по длине кромок; непостоянство зазора между кромками по длине стыкуемых элементов; несовпадение стыкуемых плоскостей; слишком большой зазор между кромками; загрязнения кромок. Дефекты формы сварного шва обуславливаются отклонениями от формы и размеров шва, заданных в технических условиях и чертежах.

При выполнении сварных соединений разными методами сварки швы могут иметь неравномерные размеры, бугры, седловины. Подобные дефекты снижают прочность соединения и могут привести к появлению трещины.

К наружным дефектам относят наплывы, подрезы, незаделанные кратеры, прожоги. Наплывы образуются в результате стекания расплавленного металла на нерасплавленный основной металл без сплавления с ним.

Подрезы – это канавки в основном металле, идущие по краям шва. Глубина подреза колеблется от десятых долей до нескольких миллиметров. Они уменьшают рабочую толщину основного металла, могут вызвать местную концентрацию напряжений от прилагаемых нагрузок и стать причиной разрушения шва в процессе эксплуатации. Подрезы в стыковых и угловых швах, расположенные перпендикулярно действующим на них силам, приводят к снижению вибрационной прочности.



Кратер – углубление, образующееся в конце шва при внезапном прекращении сварки. Кратеры чаще всего возникают при выполнении коротких швов. Размеры кратера в зависимости от величины сварочного тока колеблются от 3 до 20 мм. Незаделанные кратеры снижают прочность сварного соединения, особенно при воздействии вибрационной нагрузки.

Прожоги – это сквозные отверстия в сварном шве, чаще всего образуются при сварке металла небольшой толщины и начального слоя в многослойных швах, а также при сварке снизу вверх вертикальных швов. Независимо от причин, отверстие, возникшее при прожоге, заделывается, но шов получается неудовлетворительным по внешнему виду и качеству.

К внутренним дефектам относят поры, шлаковые включения, непровары, несплавления и трещины.

Поры – полости, заполненные газом, имеющие размеры от 0,1 до 3 мм в диаметре. Поры, выходящие на поверхность, могут быть и больших размеров. Причиной равномерной внутренней пористости является загрязненность свариваемого металла по кромкам, использование влажного флюса или отсыревших электродов. Наиболее вероятно появление пор при сварке алюминиевых и титановых сплавов.

Шлаковые включения в металле сварного шва – это малые объемы, заполненные неметаллическими веществами, чаще всего оксидами и шлаками. Шлаковые включения условно делят на макроскопические и микроскопические. Они могут быть различной формы: круглые, шарообразные, плоские в виде пленки или продолговатые в виде вытянутых «хвостов». По сравнению с порами, шлаковые включения имеют большие размеры, поэтому они лучше обнаруживаются при ультразвуковом и магнитном методах контроля.

Оксидные пленки могут возникать при всех видах сварки, причины их образования такие же, что и образование шлаковых включений.

Непровары и несплавления – это дефекты, возникающие в сварном соединении вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков многослойного шва. Непровары и несплавления достаточно хорошо обнаруживаются при ультразвуковом контроле.

Трещины – частичное местное разрушение сварного соединения в виде разрыва, они относятся к наиболее опасным дефектам и по всем действующим нормам недопустимы. Различают трещины горячие и холодные, имеющие разную физическую природу образования и разные размеры и поэтому по-разному отражают ультразвуковые колебания и по-разному выявляются при контроле.

Основные дефекты сварных соединений, выполненных точечной контактной сваркой, также подразделяются на наружные и внутренние.

К наружным дефектам относят наружные трещины; прожог; наружный выплеск; вырыв точек; выход на поверхность литой структуры; разрыв металла у кромки соединения; поверхностное нарушение сплошности металла; темную поверхность сварных точек; чрезмерную вмятину и неправильную форму вмятины от электрода.

Внутренними дефектами являются непровар; внутренние трещины, поры и раковины; внутренний выплеск металла; несимметричное расположение ядра сварной точки; чрезмерное проплавление.

Основным дефектом контактной стыковой сварки сопротивлением или оплавлением является слипание, при котором между свариваемыми деталями осуществляется механический контакт, но не происходит взаимодействие между атомами кристаллической структуры. Такой дефект довольно часто встречается при сварке давлением, трением и сварке взрывом. Обнаружить слипание

физическими методами контроля сложно, для предупреждения появления подобного дефекта необходимо тщательно отслеживать соблюдение установленных параметров сварки: ток, напряжение, давление, время выдержки и скорость осадки.

При изготовлении паянных соединений в изделиях образуются следующие дефекты: дефекты заготовок и сборки изделия под пайку, дефекты паяных швов, дефекты готового паяного соединения.

Для получения хорошего качества паяной конструкции в первую очередь необходимо обеспечить качество изготовления заготовок и сборки под пайку. При сборке обращают внимание на установление необходимых зазоров и надежное закрепление соединяемых элементов изделия. Изделие, подлежащее пайке, после нанесения и закрепления припоя устанавливают в приспособление, гарантирующем полное затекание припоя в зазоры и наименьшее коробление конструкции.

Характерные дефекты сборки под пайку:

- неравномерность зазора между соединяемыми поверхностями;
- смещение элементов паяемого изделия.

Эти дефекты возникают вследствие неточной обработки заготовок; смещения последних в процессе их закрепления при сборке; отсутствия приспособлений, обеспечивающих надежную фиксацию изделия и отдельных его элементов. Типичные дефекты паяных швов (соединений):

- непропай – несплошное заполнение зазора припоем, а также отсутствие связи между припоем и основным металлом;
- трещины;
- поры и раковины;

– шлаковые и флюсовые включения

Непропай возникает в результате несмачивания паяемого металла припоем. Чтобы избежать непропаянных мест, необходимо тщательно удалить оксидную пленку и обеспечить установленные технологией пайки зазоры. Наличие вредных примесей в припоях отрицательно влияет на качество заполнения зазора. Жидкотекучесть припоев резко снижается при их загрязнении оксидами.

Трещины в паяных швах могут возникнуть под действием собственных напряжений в основном металле или вследствие вибраций паяемой конструкции в процессе пайки, когда закристаллизовавшийся припой недостаточно прочен. К образованию трещин склонны швы, спаянные припоями, имеющими широкий интервал кристаллизации.

Мелкие поры, в том числе и непропаи, могут вызвать выделение в процессе пайки газов, содержащихся в припое и образующихся при испарении отдельных компонентов флюсов и припоев. Образованию усадочных раковин, пор и неспаев способствует также недостаточное количество внесенного при пайке припоя или слишком большой зазор. Наличие адсорбированного слоя влаги во флюсе и на прутках припоя также приводит к появлению пор и непропаев.

Шлаковые включения в паяном шве образуются вследствие плохой подготовки поверхности соединяемых элементов перед пайкой и наличия загрязнений (ржавчины, масла и т. д.), а также при длительном нагреве во время пайки, когда флюс, реагируя с основным металлом, переходит в шлак, плохо вытесняемый припоем. Избыток кислорода в пламени при пайке газовой горелкой – одна из причин образования шлаковых включений.

Влияние всех вышеперечисленных дефектов на работоспособность конструкции изделий зависит от их формы и расположения по отношению к направлению прилагаемых нагрузок при эксплуатации.

Особенность КМ состоит в том, что они не являются монолитным материалом в классическом смысле слова, как, например, металлы. КМ – это фактически конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия. Стоит проблема объективной оценки качества КМ, возможности применения различных физических методов для контроля их качества.

Все дефекты КМ разделены на два больших класса: производственные дефекты, которые появляются в конструкциях либо в процессе их изготовления, либо в процессе изготовления составляющих материалов компонента, и эксплуатационные повреждения, возникающие в процессе эксплуатации. Дефекты могут быть разделены на три группы: микро-, мини- и макродефекты.

Макродефекты – это дефекты армирующих волокон (микротрещины, микровключения, микропустоты, отклонения от формы, изломы и др.), дефекты матрицы в промежутках между элементарными волокнами (микропоры, микротрещины, микровключения и др.), дефекты на поверхности раздела волокно–матрица и др.

Минидефекты – это крутка, искривления, разориентация волокон, мелкие риски, царапины, вмятины, обрыв отдельных нитей, жгутов или групп элементарных волокон.

Макродефекты – это трещины, пересекающие слои вглубь (надрезы), раковины, вмятины на поверхности КМ, дефекты ударного характера, растрескивание, расслоения, выпучивания, непрочности, воздушные макровключения и др.

В процессе полимеризации композитов при их изготовлении из-за внутренних напряжений, неравномерного распределения связующего и других технологических факторов могут возникать расслоения, отслоения отдельных слоев, рыхлость, трещины и др. Также возможны обрывы нитей, жгутов арматуры и т. п.

## **2.2. Классификация средств неразрушающего контроля**

Неразрушающая проверка - это метод проверки полноты, условий поверхности, трещин и т.д. без разрушения структур, элементов и структур в производственной сфере. Представляется, что для обнаружения поверхностных дефектов или внутренних дефектов материалов используются, магнитное тестирование, ультразвуковое тестирование, термографическая проверка, радиографическое тестирование, резонансное тестирование, методы контроля на герметичность и наноиндентирование. В силу природы, в основном, она используется для проверки, оценки, решения проблем и исследования дорогостоящих деталей, таких как части самолета, при этом экономит время и деньги.

### **Ультразвуковое тестирование**

Наиболее часто используемый неразрушающий тест для композитных конструкций является ультразвуковой проверкой, часто создавая двумерную карту структуры "С-скана". В композитных структурах дефекты чаще всего в виде либо дебагов, либо деламинаций в плоскости материала, либо пористости. Причина для ультразвуковой инспекции заключается в том, что она очень чувствительна к таким видам дефектов, которые обычно встречаются в композитах. Это также один из немногих методов обнаружения пористости и одновременно может обнаружить большинство других дефектов. Ультразвуковое обнаружение дефектов анализирует эхо через сравнительный процесс, в котором эхо-образ, созданный хорошей частью, сравнивается с эхо-образным из тестового куска. Поскольку звуковые волны отражаются из пустоты или трещины, изменения в образе эхо указывают на изменения в внутренней структуре детали. При тестировании стеклопластика и композитов, прибор обычно ищет наличие эхо в отмеченных воротах или окнах, которые представляют внутренний интерьер тестового элемента. В то время как несоответственная природа стеклопластика и композитов может генерировать

отражения шума, даже из твердого материала, трещины, площадь которых приближается к диаметру звукового пучка, обычно дают сильные локализованные признаки, которые будут признаны квалифицированным оператором.

### **Термографическая проверка**

Эта проверка либо внутренний, либо внешний обзор. Энергооценщик решает, какой метод даст лучшие результаты при определенных погодных условиях. Интерьерные сканирования более распространены, потому что теплый воздух, выходящий из здания, не всегда проходит через стены прямым путем. Термография измеряет температуру поверхности с помощью инфракрасного видео и фотоаппаратов. Эти инструменты видят свет, который находится в спектре тепла. В видео или фильме показаны температурные изменения кожи здания, начиная от белого для теплых регионов до черного для более холодных. Полученные изображения помогают аудитору определить, нужна ли изоляция. Они также служат инструментом контроля качества, чтобы гарантировать правильную установку изоляции.

### **Радиографическое тестирование**

Это неразрушающий метод тестирования (НДТ), который использует либо рентгеновские лучи, либо гамма-лучей для исследования внутренней структуры производственных компонентов, выявляющих любые недостатки или дефекты. В Радиографическом тестировании тестовая часть помещается между источником излучения и пленкой (или детектором). Разница плотности материала и толщины тестовой части уменьшит (т.е. уменьшит) проникающее излучение путем взаимодействия процессов, включающих рассеивание и/или поглощение. Разница в поглощении затем записывается на пленках или через электронные средства. В промышленной радиографии имеются несколько методов визуализации, техники отображения конечного изображения, т.е.

## **Магнитное тестирование**

Магнитная проверка частиц - это метод проверки, используемый для выявления дефектов на поверхности ферромагнитных материалов, пропускающих через него магнитный ток. Если магнитизированный объект не имеет дефектов, магнитное поле будет перемещаться по всему материалу без каких-либо прерываний или прерываний. Но когда текущий сталкивается с дефектами в материале, он будет прерван, что приводит к его распространению с этой точки и создать то, что называется полем утечки потока, где дефект находится.

## **Резонансное тестирование**

Это неразрушающий метод теста, который оказывает мягкие воздействия на материал для обнаружения повреждений. Резонансная проверка выполняется путем анализа естественных резонансов всего тела компонента. Это означает, что весь компонент может быть проверен в одном испытании на наличие дефектов, свойств материала, размеров, формы и покрытий.

## **Методы контроля на герметичность**

Важнейшим эксплуатационным требованием для изделий замкнутых объемов (баки, цистерны, резервуары, газопроводы и т. д.) является герметичность.

Герметичность – это способность изделия сохранять в рабочих условиях начальное количество содержащихся в нем веществ.

Контроль герметичности изделий основан на проникновении пробных веществ (газов или жидкостей) через сквозные дефекты (течи) и их регистрации с помощью различных приборов, например, течеискателей и других средств регистрации индикаторных веществ.



Как известно, газ – это агрегатное состояние вещества, при котором межмолекулярное воздействие между частицами-молекулами или атомами отсутствует, и объем, занимаемый собственно молекулами, мал, по сравнению с объемом, свободным от них.

Жидкость – это физическое тело, обладающее текучестью, крайне мало изменяющее свою плотность при изменении давления.

Пробным называют вещество, избирательно регистрируемое при данном методе контроля, например гелий при масс-спектрометрическом контроле, фреон при галогенном и т. д. Контрольным веществом называют смесь пробного вещества с каким-либо технологически и экономически целесообразным наполнителем, например гелиево-воздушную или гелиево-азотную смесь при масс-спектрометрическом контроле.

В качестве пробных и контрольных веществ при контроле герметичности используют газы и их смеси (воздух, гелий, фреон, аргон, азот, оксид азота, аммиак, радиоизотопные газы), а также жидкости и их смеси (водные растворы аммониевой и динатриевой солей флуоресцина, различные органические растворы люминофоров, воду с хромпиком, керосин, керосин с люминофором, гидросмеси с люминофором, обессоленную воду с люминофором, спирт с люминофором, жидкости, газированные оксидом азота или пробным газом для газолюминесценции и др.).

Методы и способы контроля герметичности изделий по эффективности их использования позволяют проводить как качественную, так и количественную оценку утечки газов и жидкостей. Степень герметичности изделий количественно характеризуется интегральным (суммарным) потоком пробного вещества в пересчете на поток воздуха, который вытекает за единицу времени из атмосферы в вакуум через все имеющиеся в изделии сквозные дефекты – течи при нормальных условиях.

## **Наноиндентирование**

Наноиндентирование, также называемое инструментальным испытанием на вдавливание, представляет собой ряд испытаний на твердость вдавливания, применяемых к небольшим объемам. Вдавливание - это, пожалуй, наиболее часто применяемый способ проверки механических свойств материалов. Техника наноиндентирования была разработана в середине 1970-х годов для измерения твердости небольших объемов материала.

### **2.3. Сравнительный анализ средств неразрушающего контроля для металлических и композитных деталей**

В отличие от металлических, дефекты КМ в процессе эксплуатации могут быстро увеличиваться, что приводит к снижению надежности конструкции. Через поверхностную трещину матрицы влага проникает внутрь композита и разрывает его, снижает его модуль упругости. Частый дефект в виде расслоения приводит к снижению прочности на сжатие, обрыву волокон, уменьшает усилие на разрыв.

КМ – весьма сложные объекты для контроля, так как характеризуются существенной неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разнообразием типов армирования (однонаправленный, продольно-поперечный, комбинированный и др.), специфическими физическими свойствами: высокими электроизоляционными качествами, низкой теплопроводностью, звукоизоляцией, большим разбросом физико-механических характеристик, малыми значениями плотности (0,02...2,0 г/см<sup>3</sup>). Для композитов у одних и тех же физических методов дефектоскопии отношение сигнал/шум меньше, чем для однородных структур (металлов). Поэтому для одних и тех же методов НК чувствительность и разрешающая способность применительно к композитам соответственно ниже, чем для металлов. С подобной проблемой сталкиваются

при УЗ контроле крупнозернистых структур, таких как чугун и некоторые виды нержавеющей стали.

Большинство видов КМ в зависимости от используемого вида наполнителя относятся к диэлектрикам или плохим проводникам. Практически все КМ являются немагнитными материалами, поэтому многие методы НК, используемые при НК металлов, не подходят для контроля изделий из КМ.

Неэффективны для контроля композитов также высокочастотные УЗ методы, так как УЗ волны с частотой выше 1...5 МГц сильно ослабляются и рассеиваются матрицей, волокнами, различными включениями. Это существенно ограничивает диапазон контролируемых толщин КМ. Некоторые виды КМ могут впитывать влагу. В этом случае неприменимы методы НК, которые предполагают смачивание поверхности контролируемых объектов.

Основные методы, которые применяются при НК изделий из КМ, представлены в таблице. Опишем особенности применения основных методов НК применительно к КМ.

При бесконтактном УЗ контроле для возбуждения волн часто используют мощные лазеры. Эта технология требует определенных мер безопасности при работе персонала и имеет ограниченное применение в полевых условиях.

Среди акустических методов НК, особенно многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), особое место занимают низкочастотные методы, в которых применяется сухой контакт преобразователя с поверхностью контролируемого изделия. Основная область применения этих низкочастотных методов – обнаружение зон нарушения соединений в многослойных клееных конструкциях из ПКМ на основе углеродных, борных, стеклянных, органических волокон (угле-, боро-, стекло-, органопластиков и т. п.). Этими методами УЗК могут быть выявлены дефекты в

неметаллических покрытиях зоны нарушения клеевого соединения между покрытием и каркасом объекта.

Основными преимуществами специальных низкочастотных методов контроля перед другими методами НК многослойных клееных конструкций из ПКМ являются:

- отсутствие необходимости смачивания конструкций или погружения их в жидкость, что позволяет проводить контроль деталей и агрегатов из гигроскопичных материалов;

- кривизна поверхности контролируемых конструкций обычно не является препятствием для проведения контроля, причем возможен контроль как выпуклых, так и вогнутых деталей;

- возможность контроля деталей, выполненных из анизотропных материалов с различной шероховатостью поверхности.

У негигроскопичных КМ акустический контакт между датчиком и объектом осуществляется через связывающие жидкости. Для больших корпусов УЗ колебания могут передаваться по струе воды.

Очень часто для контроля КМ используется метод свободных колебаний, который основан на анализе характеристик свободных колебаний изделия, вибрирующего после удара. Простейший случай практического применения этого метода – контроль на слух целостности стеклянной или фарфоровой посуды. Этот метод с соответствующей электронной аппаратурой широко используется для определения расслоений и воздушных полостей, непрочных, расслоений, характеризующихся наличием заполненного газом промежутка. Зоны с нарушением сцепления слоев, не имеющие заполненного газом промежутка, низкочастотными акустическими методами не выявляются. Преимущества метода свободных колебаний перед другими низкочастотными акустическими

методами НК (импедансным, велосиметрическим, акустико-топографическим и др.) заключаются в возможности:

- обнаружения дефекта на больших глубинах;
- контроля конструкций из материалов с малыми модулями упругости;
- контроля конструкций из материалов с высокими коэффициентами затухания упругих колебаний.

Один из наиболее распространенных и понятных для изготовителей и эксплуатационников ответственных изделий является радиационный контроль. Этот метод может широко применяться при контроле КМ. Радиационные методы контроля композитов особенно эффективны для выявления различных пустот, для выявления посторонних материалов различных включений, для структурных неоднородностей, таких как пропуски, обрывы армирующих элементов.

Однако также как и в случае металлов, дефекты, которые не приводят к значительным изменениям общей толщины КМ в направлении просвечивания (трещины, расслоения, ориентированные перпендикулярно пучка излучению) не могут быть обнаружены при рентгеновском контроле.

Для этих материалов может использоваться капиллярно-радиационный метод, при котором контрастность элементов просвечиваемого объекта повышается введением жидкого рентгеноконтрастного пенетранта. Для этих целей выпускается достаточно широкий спектр органических и неорганических пенетрантов с высоким коэффициентом поглощения рентгеновского излучения. Наиболее широко используемым из них является йодид цинка, который имеет высокую радиационную непрозрачность по сравнению с другими веществами.

Цифровая радиоскопия с подключением компьютера (ноутбука) обеспечивает мгновенное получение цифрового рентгеновского изображения, улучшение визуального восприятия изображений, измерение геометрических

параметров контролируемых объектов по их изображениям. Встроенная база данных обеспечивает ввод, хранение, выбор и отображение изображения, вывод результатов контроля, обеспечивает защищенный доступ, а также передачу данных по локальным и внешним сетям (интернет). Этот комплекс возможностей на основе рентгенотелевизионного контроля называется флэш-радиографией.

Практическое применение томографии для диагностики композитов усложняется большими габаритами контролируемых изделий, для которых необходимо получить 360...720 снимков при круговом их вращении на 360°. В случае, когда имеется возможность получить только 6, 12, 24 проекции, то реализуется малоракурсная томография, когда недостающие экспозиции получают виртуально. Но в этом случае погрешность реконструкции геометрических параметров резко возрастает.

Термография – это одна из перспективных направлений НК конструкций из КМ. В основу этого метода положен анализ признаков наличия дефектов по изменениям температурных полей с использованием инфракрасной техники (тепловизор или пирометр). Термография фиксирует изменения температуры на уровне 0,01 °С. Поэтому даже при механическом нагружении фиксируются места концентрации энергии, где может происходить пластическая деформация с выделением тепла. Зафиксировав температурное поле на поверхности, можно определить местоположение концентратора энергии относительно поверхности изделия. Решив обратную задачу нестационарной теплопроводности, можно определить местоположение и размер дефекта. На рис. 6 показаны примеры распределения тепловых полей (термограммы) объектов из КМ.

Для КМ исследование их качества физическими методами НК намного важнее, чем для металлических конструкций. НК композиционных материалов ввиду их специфических свойств требует особого подхода при использовании

традиционных методов НК. Наиболее эффективна для этих целей флэш-радиография.

#### **2.4. Перспективы применения алгоритмов машинного обучения для неразрушающего контроля прочностной надёжности композитных элементов ЛА**

Появление композитных самолетов, таких как B787, увеличивает потребность и интерес к диагностическим и прогностическим инструментам для композитов в авиационных приложениях. Например, возрос спрос на неразрушающую технологию или технологию неразрушающей оценки, которая представляет собой метод обнаружения дефектов, присущих производству фюзеляжей и крыльев из композитных материалов.

Композитные самолеты имеют характеристики, отличные от обычных самолетов с металлической конструкцией. Например, при низкоэнергетическом ударе вмятина возвращается к своей первоначальной форме за счет упругости и выглядит неповрежденной снаружи, но внутри могут возникать дефекты едва заметные ударные повреждения (BVID, barely visible impact damage), такие как расслоение микрослоев и микротрещины. Если эти дефекты едва заметные ударные повреждения (BVID, barely visible impact damage) приводят к укрупнению или росту дефектов в процессе эксплуатации самолета, может произойти внезапное катастрофическое разрушение конструкции при приложении к дефектной детали большой нагрузки. Поэтому для безопасности самолета необходимо на ранней стадии определять местонахождение этих поврежденных частей и производить ремонт в соответствии с руководством по ремонту конструкции.

В случае с существующей металлической конструкцией самолета пластическая деформация происходит из-за удара внешнего летающего объекта,

а утопленная часть возникает заметно. Кроме того, дефекты, такие как микротрещины, можно контролировать с помощью количественной неразрушающей оценки (QNDE, quantitative non-destructive evaluation), а также прогнозировать оставшийся срок службы конструкции. С другой стороны, композитные материалы требуют передовых технологий неразрушающий контроль (NDT, non-destructive testing) из-за отсутствия данных испытаний для прогнозирования срока службы, различных производственных процессов и различных методов ремонта.

В связи с появлением композитных самолетов методы неразрушающего контроля используются для проверки дефектов, таких как едва заметные ударные повреждения (BVID, barely visible impact damage), во время эксплуатации композитных самолетов, что требует больше усилий и затрат по сравнению с обычными металлическими самолетами. Она может варьироваться в зависимости от уровня усталости и мастерства. Поэтому авиастроители при изготовлении конструкции из композиционного материала встраивают внутрь конструкции легкое оборудование для неразрушающего контроля и датчики, и благодаря этому дефекты, возникающие или присущие самолету в полета, такие как рис. 8, обнаруживаются с использованием различных методов проверки. Следует применять автоматизированную технологию мониторинг состояния конструкции (SHM, structural health monitoring), которая может автоматически уведомлять пилота о местоположении и размере дефекта в режиме реального времени путем его анализа или передачи по беспроводной сети на внешнее записывающее устройство для выполнения ремонта сразу после операции. Рис. 8 представляет собой схематическую диаграмму мониторинг состояния конструкции, примененную к самолету. Мониторинг состояния конструкции в значительной степени является сенсорным модулем, включающим сенсор и интерфейсный блок, который получает и обрабатывает сигналы от сенсора, модуль изображения, который визуализирует или визуализирует обработанный



сигнал, коммуникационный модуль, который передает эти сигналы и изображения наружу, и внешний сервер. или сервер. Можно сказать, что он состоит из пользовательского интерфейса, такого как хост-узел.

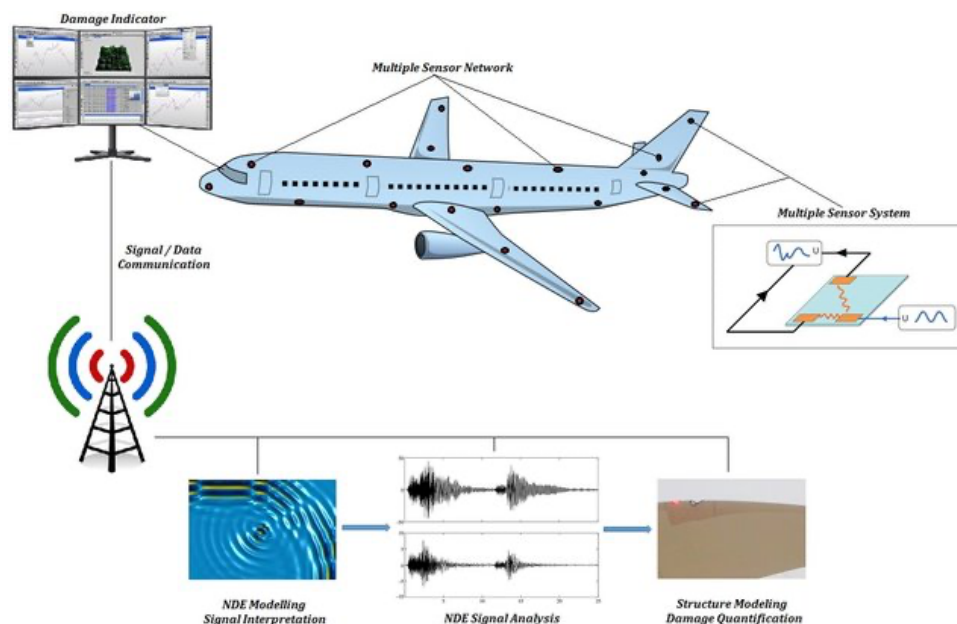


Рисунок 7 - Мониторинг состояния конструкции

(SHM, structural health monitoring)

Из-за стремительного роста цен на нефть в последние годы возрос спрос со стороны покупателей на авиастроителей, чтобы их самолеты были более экономичными и экологичными, чем у конкурентов, и соответствовали стандартам безопасности. Кроме того, по мере того, как растет спрос со стороны эксплуатантов воздушных судов на покупку самолетов, которые минимизируют прямые эксплуатационные расходы (DOCs, direct operating costs) и прямые затраты на техническое обслуживание (DMC, direct maintenance costs), возрастает мотивация к покупке самолетов, оснащенных мониторинг состояния

конструкции (SHM, structural health monitoring). Так как применяемый самолет мониторинг состояния конструкции обеспечивает безопасность установочной части в конструкции конструкции, эта информация снова отражается в конструкции самолета, что имеет побочный эффект в виде снижения веса самолета. Также с точки зрения затрат на техническое обслуживание ремонт в связи с внеплановыми мероприятиями будет производиться в соответствии с плановыми мероприятиями за счет применения мониторинг состояния конструкции. Другими словами, в будущем ремонты по ненормированному графику практически исчезнут, а ремонты будут производиться по предсказуемому графику, что значительно снизит затраты на техническое обслуживание. Кроме того, могут быть значительно снижены затраты на демонтаж конструкций, труднодоступных для существующего инспекционного оборудования.

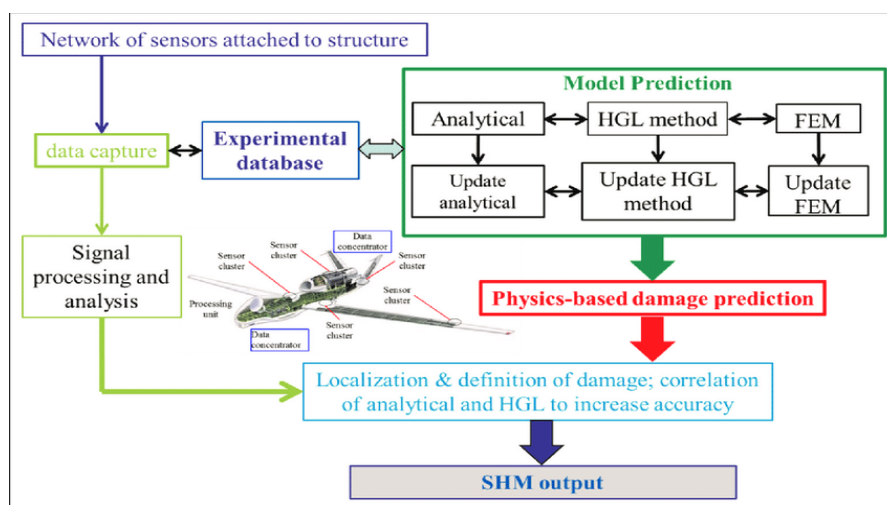


Рисунок 8 - Мониторинг состояния элементов конструкции

Функциональная диаграмма мониторинга состояния здоровья показывает важность прогноза модели для получения точных результатов для вывода продукции из системы SHM.

Технология системы SHM (структурный мониторинг здоровья) состоит из сбора данных, обработки данных, анализа данных, диагностики и прогнозирования, как показано на рисунке 8. В области диагностики/предсказания хорошо используются бинарные методы классификации машинного обучения.

С момента недавнего прихода композитных самолетов технология системы SHM, которая может снизить стоимость неразрушающих испытаний и повысить безопасность самолетов, используется не только в авиационных, но и в международных космических станциях.

### **3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЁЖНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

#### **3.1. Описание объекта исследования из ПКМ и обоснование расчётной модели для исследования прочностной надёжности.**

Полимерные композиционные материалы используются в различных типах транспортных средств во всем мире. Эти транспортные средства включают автомобили, поезда и самолеты. Несмотря на высокую стоимость, многие компании пытаются применять композитные материалы для транспортных средств из-за меньшего веса и большей гибкости в отношении кузовных деталей и панелей, чем металл. Кроме того, композиты могут помочь уменьшить аэродинамическое сопротивление и сопротивление качению. Как я уже упоминал определение композиционных материалов, полимерные композиты представляют собой комбинацию полимеров (т. е. термореактивных материалов или термопластов) с различными непрерывными и прерывистыми армирующими элементами/наполнителями, в основном добавляемыми к полимерам для улучшения характеристик материала. Матрица большинства композитных материалов, используемых в автомобильной промышленности, обычно изготавливается из полимеров. Обычно существует два типа полимеров; Термореактивные и термопластичные. Термины «термореактивный» и «термопласт» традиционно использовались для описания различных типов пластиковых материалов. Термореактивный материал похож на бетон. Есть только один шанс разжижить его и придать ему форму. Эти материалы могут быть «отверждены» или полимеризованы с использованием тепла и давления или, как в случае с эпоксидными смолами, химической реакции, запускаемой химическим инициатором. Термопласт в целом подобен воску; то есть его можно плавить и формировать несколько раз. Термопластические материалы бывают кристаллическими или аморфными. Достижения в области химии сделали

различие между кристаллическим и аморфным менее четким, поскольку некоторые материалы, такие как нейлон, изготавливаются как в виде кристаллических, так и аморфных материалов.

Применение композиционных полимерных материалов в различных областях

- В автомобилях ПКМ наносят на внутренние детали, включая легкие сиденья, приборные панели, прочную обивку, ткани со звукоизоляцией, обшивку потолка, приборную панель и дверные панели.
- В поездах ПКМ используются в путевых полотнах, порталах, модулях, линейной мебели и платформенных системах.
- При использовании на море ПКМ используются для изготовления конструктивных элементов, таких как переборка, палуба, мачта, гребной винт.
- В самолетах ПКМ использовались только во второстепенных конструкциях, но по мере развития материалов и технологий их использование в первичных конструкциях, таких как крылья, флапероны, руль направления и фюзеляжи, увеличилось.

В общем, наиболее распространенным осмотром самолета является визуальный осмотр. Однако визуальные осмотры являются простейшими тестами, выполняемыми людьми, и их недостатком являются частые ошибки. Безопасность всегда является самой важной задачей в авиационной отрасли, потому что даже небольшое нарушение или трещина могут напрямую привести к большой аварии, поэтому механики должны строго ознакомиться с руководством по техническому обслуживанию авиации, проверять и проверять.

На самом деле, согласно статистике авиационных происшествий Международной организации гражданской авиации (ИКАО), за последние 10 лет (2010-2019 гг.) произошло в общей сложности 1277 авиационных происшествий, из которых около 12% были вызваны техническим обслуживанием. Считается,

что эту цифру можно значительно снизить, если проводить досмотр самолетов с использованием искусственного интеллекта. Сначала весь самолет фотографируется с помощью дронов, а изображения и видео передаются на компьютер и сохраняются. Затем эти данные передаются искусственному интеллекту для оценки, а люди проходят вторичный тест.

Оценка надежности может сравнивать точность, передавая одни и те же данные искусственному интеллекту и людям и проверяя их. Чтобы сделать это суждение искусственного интеллекта достаточно надежным значением, они должны сначала обучить эту модель. Данных о дефектах композиционных материалов, используемых в авиационной технике, недостаточно. Поэтому я добавил данные по всем видам транспорта, включая автомобили, корабли, вертолеты и поезда, а также самолеты. Кроме того, эти данные были расширены в нескольких формах, чтобы предоставить достаточно обучающих данных для модели машинного обучения.

### **3.2. Построение параметризованной конечно-элементной модели и определение механических характеристик элемента из ПКМ.**

#### **Анализ напряжённно-деформированного состояния обтекателя ракеты-носителя тяжёлого класса**

Ракеты-носители (РН) сверхтяжелого класса способны выводить на низкую околоземную орбиту до 50 тонн полезного груза. Головной обтекатель РН защищает полезную нагрузку при движении в плотных слоях атмосферы от внешних воздействий. К полезным грузам относятся различные космические аппараты, элементы космических станций, искусственные спутники Земли. Геометрия головного обтекателя РН «Ariane 6» показана на рисунке 9.

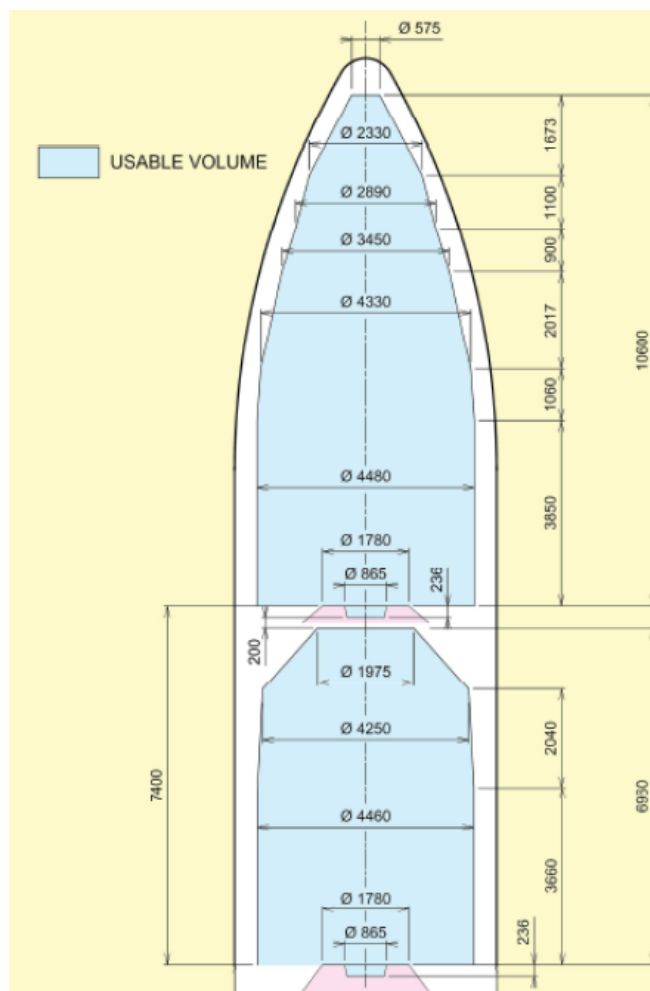


Рисунок 9 – Головной обтекатель РН «Ariane 6»

Весовая характеристика ГО является одним из главных его качественных показателей. Чаще всего ГО является тонкостенной трехслойной оболочкой. Характерной чертой тонкостенных оболочек является очень маленькая величина толщины стенки по отношению к радиусу силовой конструкции.

Трехслойные оболочки (сэндвичевая) – представляют собой последовательно расположенные слои из композитного материала, сотового заполнителя, еще одного композитного материала скрепленные между собой с помощью клея (рисунок 10). Слои могут изготавливаться из различных материалов с различными толщинами, а сотовый заполнитель также заполняться полимером. В частности, может использоваться керамика, углепластик,

стеклопластик, ситал, нитрид кремния т.д. Компоновку трехслойной оболочки определяют исходя из требований по тепловым и механическим нагрузкам, требованиям по радиопрозрачности, весовому качеству и даже особенностям крепления и транспортировки.

В таких оболочках внешние слои принимают на себя нагрузки растяжения, сжатия, сдвиг в своей плоскости, и поперечные изгибающие моменты. В тоже время заполнитель, обеспечивает совместную работу и устойчивость конструкции и принимает на себя поперечные силы при изгибе.

Для борьбы с потерей устойчивости поперечного сечения ГО применяют различные подкрепляемые элементы. Одним из таких элементов является шпангоут, который представляет собой кольцо различного поперечного сечения. Шпангоуты чаще всего изготавливают из конструкционного материала.

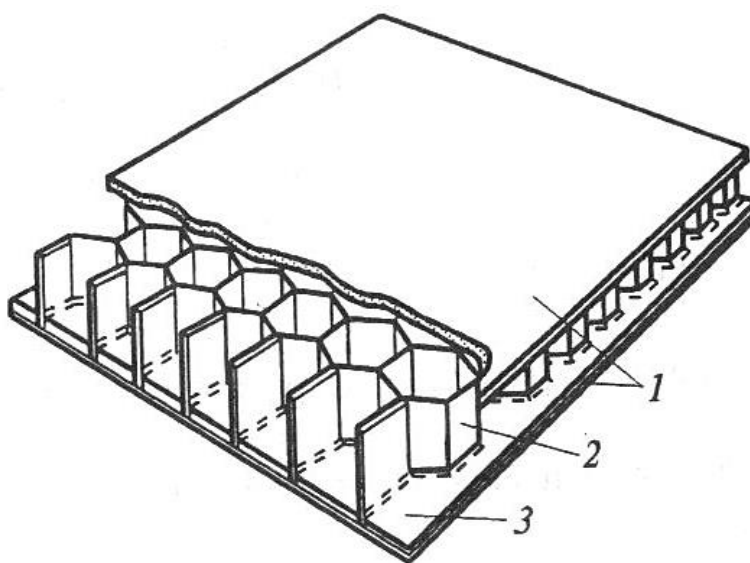


Рисунок 10 – Трехслойная оболочка с сотовым заполнителем:

1 – несущие слои; 2 – сотовый заполнитель; 3 – клеевой слой

Для задачи определения напряженно-деформированного состояния была построена трехмерная модель обтекателя РН «Ariane 6». Построенный



обтекатель длиной 18 м состоит из цилиндрической части диаметром 4,5 м, двух конических частей и сферического наконечника. Полученная трёхмерная модель обтекателя представлена на рисунке 11.

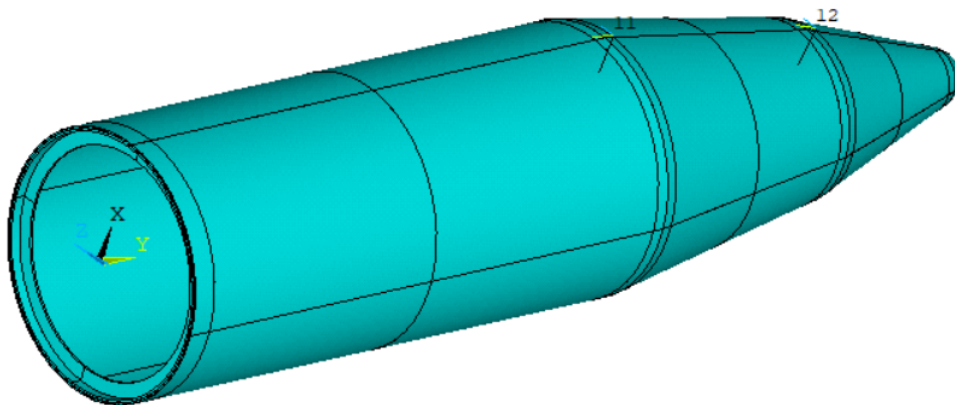


Рисунок 11 – Трёхмерная модель головного обтекателя РН «Ariane 6»

Стенки оболочки были выполнены в виде трехслойной конструкции с сотовым наполнителем. Толщины углепластиковых несущих слоёв (рисунок 12, позиция 1) – по 5 мм, с высотой сотового наполнителя 30 мм (рисунок 12, позиция 2).

Для подкрепления оболочки в стыковых зонах установлены шпангоуты таврового поперечного сечения (рисунок 12, позиция 3). Для соединения шпангоутов и панелей предусмотрены металлические вкладыши (рисунок 12, позиция 4). Вкладыши толщиной 40 мм имеют клеевое соединение с трехслойной оболочкой. Высота вкладышей подбиралась по длине полок тавра шпангоута. Стыковые шпангоуты соединяются с вкладышами при помощи болтовых креплений.

На переднем конце обтекателя расположен сферический носовой обтекатель, выполненный из теплозащитного композиционного материала (рисунок 12, позиция 5).

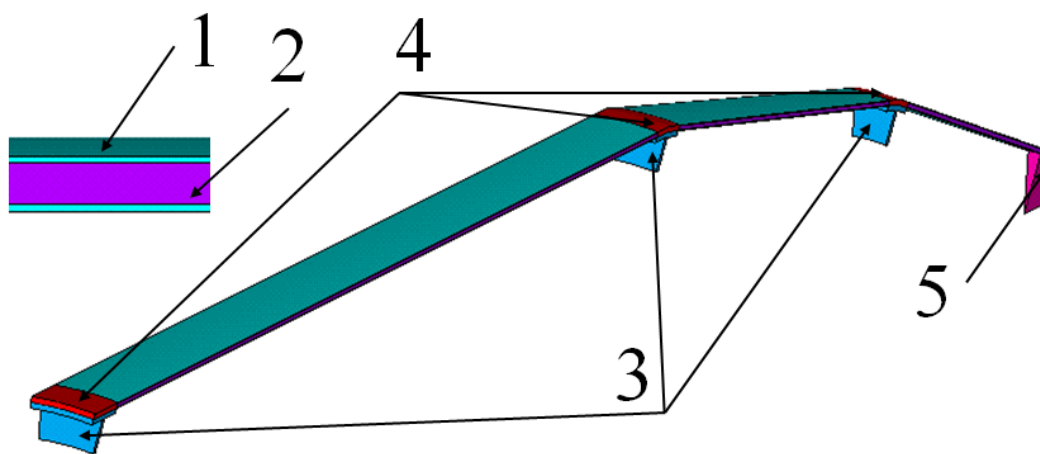


Рисунок 12 – Трёхмерная модель головного обтекателя в виде сектора

Углепластики представляют собой полимеры, армированные углеродными волокнами. Они обладают такими свойствами как, высокая удельная прочность и жесткость, высокая износостойкость, устойчивость к тепловым нагрузкам и воздействию агрессивной среды, низкий КЛТР, высокая усталостная прочность.

Для изготовления двух несущих слоев применяется полиимидный углепластик конструкционного назначения с углами армирования  $90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$ . В качестве сотового заполнителя применяется углесотопласт, имеющий размер ячейки грани, равный 5 мм. Сотовый заполнитель на основе углеродного наполнителя в составе трёхслойной конструкции обеспечивает повышение прочностных характеристик конструкции. При малой массе данный углесотопласт имеет максимальные удельные показатели прочности и жесткости при сжатии и сдвиге. Шпангоуты и крепежные вкладыши выполнены из алюминиевого сплава. Свойства рассмотренных материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические и теплофизические свойства материалов

Характеристика	Углепластик	Углесотопласт	Алюминиевый сплав
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1500	500	2500
Модуль упругости $E_X$ , МПа	70000	100	80000
Модуль упругости $E_Y$ , МПа	70000	100	80000
Модуль упругости $E_Z$ , МПа	15000	130000	80000
Модуль сдвига $G_{XY}$ , МПа	8000	100	—
Модуль сдвига $G_{YZ}$ , МПа	5000	2000	—
Модуль сдвига $G_{XZ}$ , МПа	5000	2000	—
Коэффициент Пуассона $\nu_{XY}$	0,25	0,3	0,3
Коэффициент Пуассона $\nu_{XZ}$	0,06	0,01	0,3
Коэффициент Пуассона $\nu_{YZ}$	0,06	0,01	0,3
КЛТР, °C <sup>-1</sup>	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$19 \cdot 10^{-6}$

Конечно-элементная модель сектора, представляющего собой сектор с углом 12 градусов обтекателя, показана на рисунке 13. При построении сетки использовались гексагональные элементы первого порядка. Общее количество элементов – 107266. Свойства элементов задавались в локальных системах координат элементов, как показано на рисунке 13: X – продольное направление, Y – поперечное.

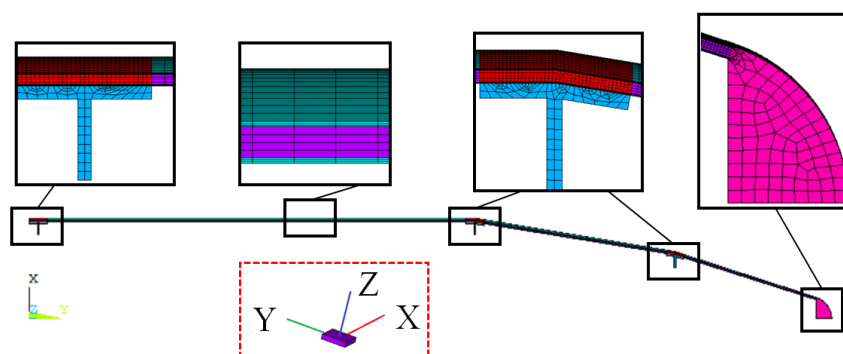


Рисунок 13 – Конечно-элементная модель головного обтекателя

При моделировании напряженно-деформированного состояния модели задавались следующие граничные условия и нагрузки (рисунок 14):

- закрепление обтекателя в задней торцевой части;
- условие циклической симметрии на боковых поверхностях сектора обтекателя;
- распределение давлений от набегающего потока (от 0,07 до -0,01 МПа);
- перегрузка  $10 \cdot m \cdot g$ , приложенная к центру тяжести модели, с учётом связи со всеми узлами.

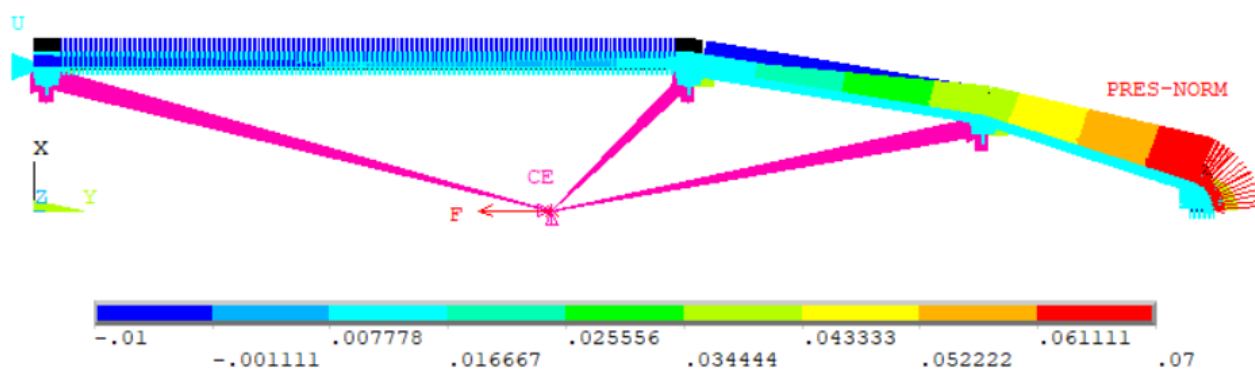


Рисунок 14 – Граничные условия и нагрузки

Температурное состояние конструкции показано на рисунке 7.

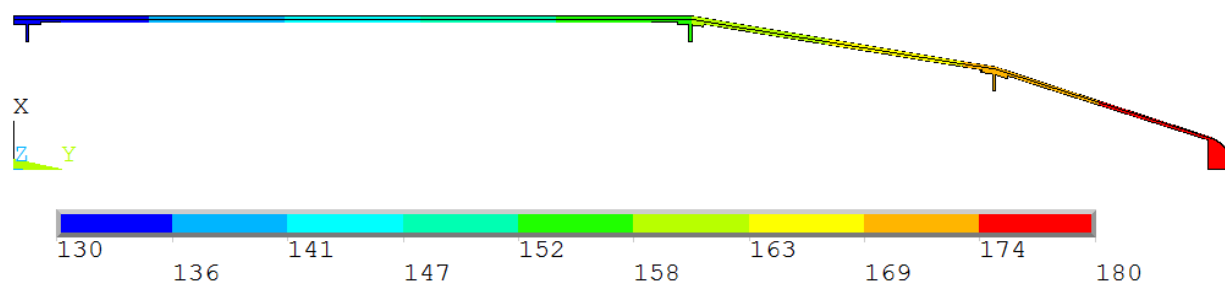


Рисунок 15 – Распределение температур, °C

Результаты расчётов показаны на рисунках 16 – 20.

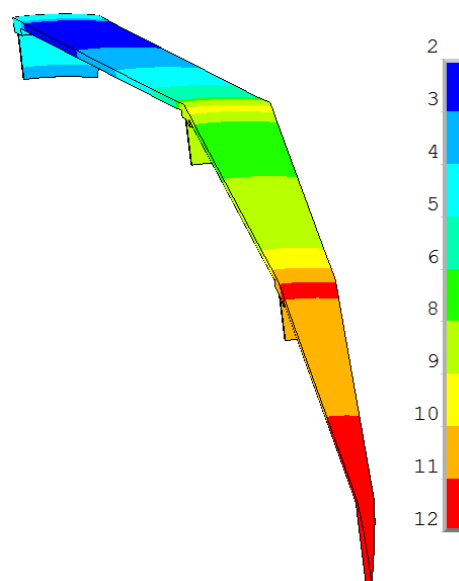


Рисунок 16 – Распределение суммарных перемещений, мм

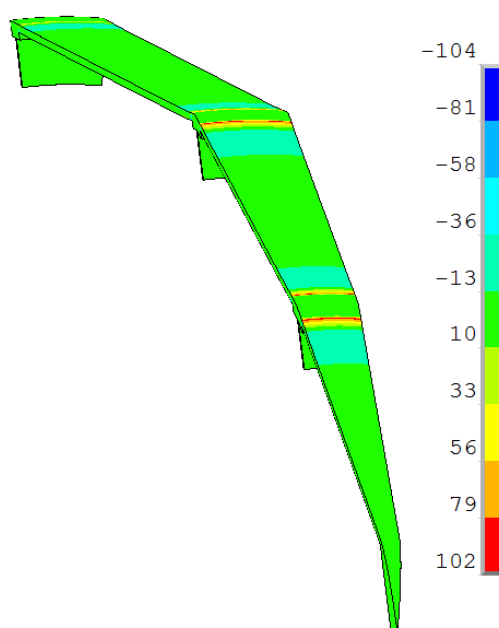


Рисунок 17 – Распределение напряжений вдоль оси X  
(в локальной СК элементов), МПа

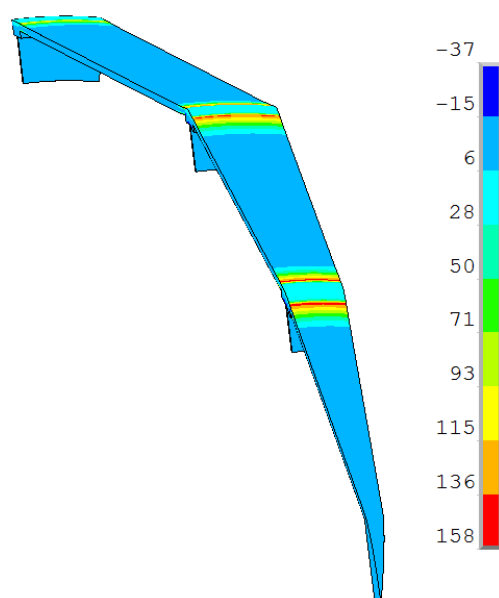


Рисунок 18 – Распределение напряжений вдоль оси Y  
(в локальной СК элементов), МПа

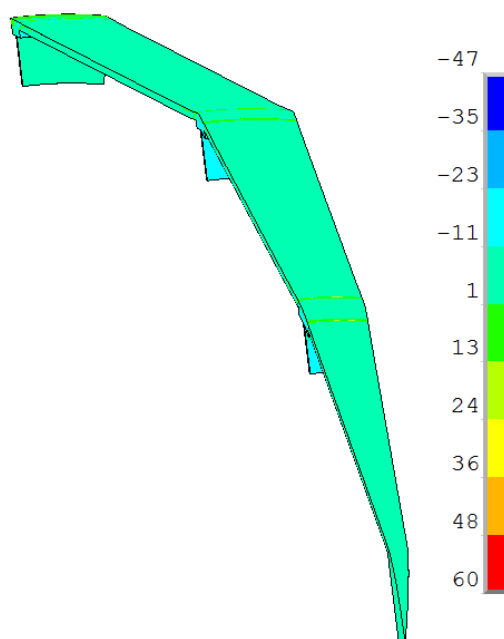


Рисунок 19 – Распределение напряжений вдоль оси Z (в локальной СК  
элементов), МПа

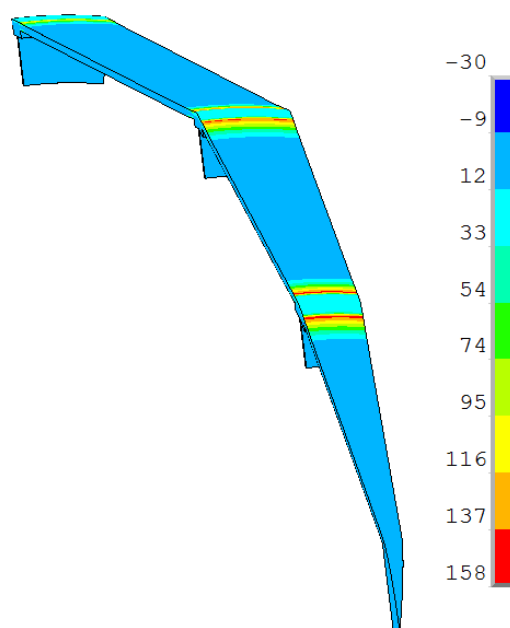


Рисунок 20 – Распределение первых главных напряжений, МПа

Для оценки прочности конструкции выбран критерий максимальных напряжений. Согласно этому критерию взаимодействие компонентов напряжения не учитывается, то есть материал воспринимает сдвиговые и осевые напряжения независимо друг от друга. Разрушение наступает тогда, когда одно из напряжений достигает своего предельного значения. Таким образом, критерий максимальных напряжений в главных осях анизотропии запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} \sigma_{1B}^- < \sigma_{11} < \sigma_{1B}^+ \\ \sigma_{2B}^- < \sigma_{22} < \sigma_{2B}^+ \\ |\sigma_{12}| < \sigma_{12B} \end{cases} \quad (1)$$

Поверхностью прочности здесь является прямоугольный параллелепипед (рисунок 21), выход за которую означает исчерпание несущей способности материала.

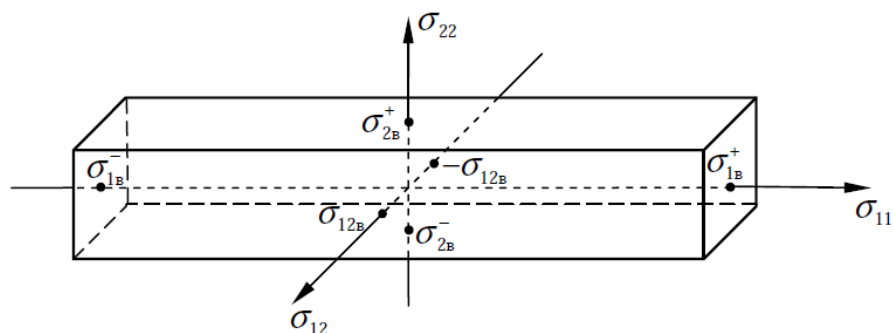


Рисунок 21 – Поверхность критерия прочности максимальных напряжений

Прочностные характеристики углепластика, используемые при анализе статической прочности несущих слоёв головного обтекателя РН приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Прочностные характеристики пакета из углепластика

параметр	$\sigma_{X BP}$	$\sigma_{Y BP}$	$\sigma_{Z BP}$	$\sigma_{X BC}$	$\sigma_{Y BC}$	$\sigma_{Z BC}$	$\sigma_{XY BP}$	$\sigma_{YZ BP}$	$\sigma_{XZ BP}$
Значение, МПа	450	450	350	-300	-300	-300	80	80	80

В результате расчёта значение критерия прочности составило 0,60.

Рассмотрим задачу статической прочности локальной зоны углепластикового корпуса головного обтекателя при наличии дефекта формы, показанной на рисунке 22. В качестве граничных условий принималось: закрепление модели с левого края, растягивающая нагрузка с правого края (рисунок 23). Значение растягивающей нагрузки в виде давления соответствовало уровню максимальных растягивающих напряжений в слоях ракеты-носителя и составляло 158 МПа.



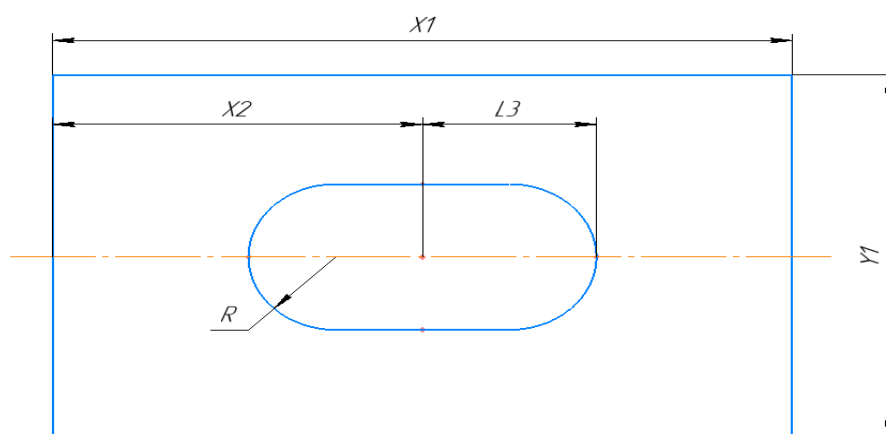


Рисунок 22 – Форма дефекта

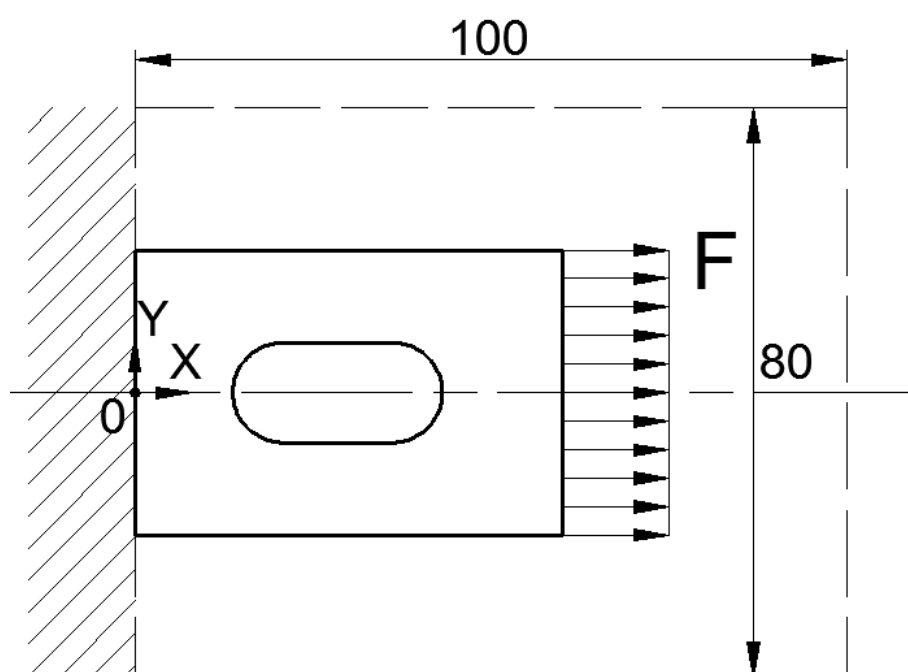


Рисунок 23 – Поверхность критерия прочности максимальных напряжений

Поверхность прочности для данного случая невозможно представить в трехмерном пространстве. Однако для плоского случая лишь с тремя.

Таблица 3 – Произвольно выбранный  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  в диапазоне от 0,2 до 0,8 для симуляции Ансиса

$k_1$	$k_2$	$k_3$		$k_1$	$k_2$	$k_3$	
$0.2 \leq k_1, k_2, k_3 \leq 0.8$				$0.2 \leq k_1, k_2, k_3 \leq 0.8$			
			№ варианта				№ варианта
0.5	0.5	0.3	1	0.3	0.3	0.7	51
0.2	0.6	0.4	2	0.3	0.5	0.5	52
0.25	0.55	0.45	3	0.3	0.25	0.6	53
0.3	0.5	0.5	4	0.3	0.6	0.65	54
0.35	0.8	0.4	5	0.3	0.5	0.8	55
0.3	0.4	0.3	6	0.3	0.2	0.75	56
0.3	0.7	0.8	7	0.35	0.45	0.55	57
0.6	0.7	0.7	8	0.35	0.6	0.4	58
0.55	0.65	0.75	9	0.35	0.7	0.2	59
0.7	0.7	0.7	10	0.35	0.75	0.5	60
0.8	0.2	0.6	11	0.4	0.2	0.4	61
0.8	0.4	0.55	12	0.4	0.3	0.4	62
0.75	0.6	0.6	13	0.4	0.4	0.5	63
0.7	0.5	0.5	14	0.4	0.5	0.5	64
0.7	0.55	0.45	15	0.4	0.6	0.4	65
0.7	0.65	0.4	16	0.4	0.6	0.7	66
0.7	0.2	0.5	17	0.4	0.7	0.3	67
0.7	0.25	0.6	18	0.4	0.6	0.8	68
0.7	0.3	0.3	19	0.4	0.5	0.25	69
0.7	0.35	0.2	20	0.4	0.6	0.45	70
0.6	0.4	0.75	21	0.45	0.3	0.3	71
0.6	0.45	0.65	22	0.45	0.5	0.6	72
0.6	0.3	0.3	23	0.45	0.6	0.6	73
0.6	0.35	0.5	24	0.45	0.7	0.7	74
0.6	0.6	0.6	25	0.45	0.8	0.7	75
0.6	0.25	0.55	26	0.25	0.25	0.25	76
0.6	0.7	0.25	27	0.25	0.3	0.8	77
0.6	0.8	0.8	28	0.25	0.4	0.7	78
0.65	0.2	0.8	29	0.25	0.5	0.5	79
0.65	0.3	0.8	30	0.25	0.6	0.65	80
0.65	0.4	0.8	31	0.75	0.2	0.3	81
0.55	0.2	0.2	32	0.75	0.3	0.4	82
0.55	0.3	0.3	33	0.75	0.5	0.5	83

0.55	0.3	0.4	34	0.75	0.6	0.3	84
0.55	0.4	0.5	35	0.75	0.7	0.25	85
0.55	0.3	0.6	36	0.75	0.4	0.45	86
0.55	0.35	0.5	37	0.75	0.65	0.55	87
0.55	0.4	0.25	38	0.8	0.2	0.2	88
0.5	0.4	0.4	39	0.8	0.4	0.3	89
0.5	0.3	0.2	40	0.8	0.3	0.4	90
0.5	0.2	0.4	41	0.8	0.5	0.5	91
0.5	0.6	0.3	42	0.8	0.45	0.7	92
0.5	0.7	0.2	43	0.8	0.3	0.6	93
0.5	0.65	0.4	44	0.8	0.6	0.6	94
0.5	0.5	0.5	45	0.8	0.7	0.7	95
0.5	0.5	0.6	46	0.8	0.8	0.8	96
0.5	0.35	0.35	47	0.2	0.4	0.6	97
0.5	0.7	0.7	48	0.2	0.5	0.5	98
0.5	0.6	0.8	49	0.2	0.8	0.8	99
0.55	0.55	0.55	50	0.2	0.6	0.7	100

Таблица 4 – Характеристики дефектов, полученные после моделирования НДС в ANSYS

L3, мм	R, мм	X2, мм	критерий прочности	Index (0 – отсутствие дефектов, 1- наличие)
25	7.5	50	0.91	0
12	4.80	20	0.77	0
13.75	6.19	25	0.8	0
15	7.5	30	0.85	0
28	11.2	35	1.01	1
12	3.6	30	0.7	0
21	16.8	30	1.26	1
28	19.6	60	2.67	1
29.25	21.94	55	2.79	1
21	14.7	70	1.98	1
4	2.4	80	0.8	0

8	4.4	80	0.93		0
15	9	75	1.33		1
15	7.5	70	1.06		1
16.5	7.43	70	1.09		1
19.5	7.8	70	1.2		1
6	3	70	0.77		0
7.5	4.5	70	0.87		0
9	2.7	70	0.71		0
10.5	2.1	70	0.65		0
16	12	60	1.3		1
18	11.7	60	1.28		1
12	3.6	60	0.74		0
14	7	60	0.93		0
24	14.4	60	1.54		1
10	5.5	60	0.88		0
28	7	60	1.06		1
32	25.6	60	5.35		1
7	5.6	65	1.01		1
10.5	8.4	65	1.13		1
14	11.2	65	1.32		1
9	1.8	55	0.58		0
13.5	4.05	55	0.77		0
13.5	5.4	55	0.82		0
18	9	55	1.02		1
13.5	8.1	55	0.99		0
15.75	7.88	55	0.96		0
18	4.5	55	0.77		0
20	8	50	0.94		0

15	3	50	0.68		0
10	4	50	0.78		0
30	9	50	1.04		1
35	7	50	0.99		0
32.5	13	50	1.35		1
25	12.5	50	1.23		1
25	15	50	1.36		1
17.5	6.13	50	0.83		0
35	24.5	50	3.68		1
30	24	50	2.72		1
24.75	13.61	55	1.38		1
9	6.3	30	0.9		0
15	7.5	30	0.85		0
7.5	4.5	30	0.82		0
18	11.7	30	1.04		1
15	12	30	1.07		1
6	4.5	30	0.89		0
15.75	8.66	35	0.92		0
21	8.4	35	0.88		0
24.5	4.9	35	0.76		0
26.25	13.13	35	1.08		1
8	3.2	40	0.74		0
12	4.8	40	0.8		0
16	8	40	0.9		0
20	10	40	0.97		0
24	9.6	40	0.95		0
24	16.8	40	1.32		1
28	8.4	40	0.91		0

24	19.2	40	1.49		1
20	5	40	0.75		0
24	10.8	40	1.02		1
13.5	4.05	45	0.74		0
22.5	13.5	45	1.19		1
27	16.2	45	1.37		1
31.5	22.05	45	2.08		1
36	25.2	45	3.23		1
6.25	1.56	25	0.59		0
7.5	6	25	0.94		0
10	7	25	0.88		0
12.5	6.25	25	0.82		0
15	9.75	25	0.94		0
5	1.5	75	0.6		0
7.5	3	75	0.77		0
12.5	6.25	75	1.04		1
15	4.5	75	0.93		0
17.5	4.38	75	0.97		0
10	4.5	75	0.89		0
16.25	8.94	75	1.34		1
4	0.8	80	0.54		0
8	2.4	80	0.72		0
6	2.4	80	0.73		0
10	5	80	0.99		0
9	6.3	80	1.14		1
6	3.6	80	0.88		0
12	7.2	80	1.28		1
14	9.8	80	1.63		1

16	12.8	80	2.76		1
8	4.8	20	0.8		0
10	5	20	0.78		0
16	12.8	20	1.06		1
12	8.4	20	0.89		0

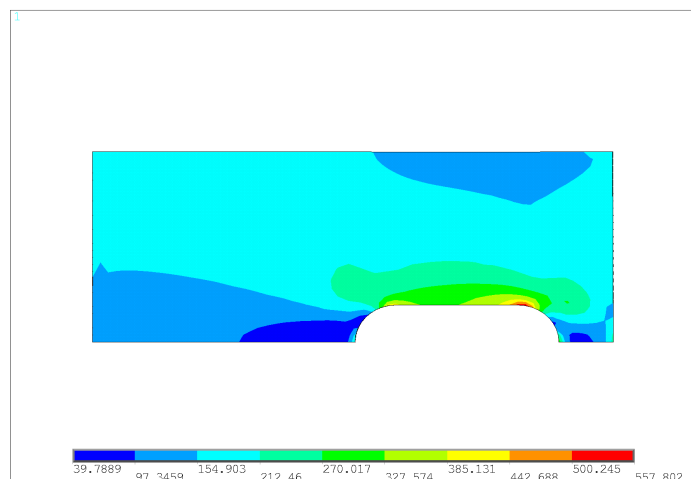


Рисунок 24 – Тест № 16 (Наличие дефекта)

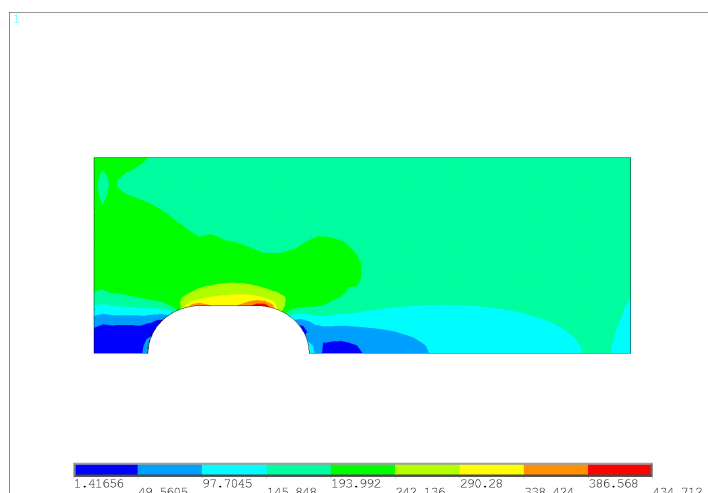


Рисунок 25 – Тест № 80 (Отсутствие дефекта)

### **3.3. Разработка алгоритма прогнозирования прочностной надёжности элемента из ПКМ с использованием временных рядов и теоремы Байеса.**

Композитные дефекты — это микроскопические и макроскопические агенты, обладающие способностью воспроизводить себя внутри композитных деталей. В этом отрывке подход, основанный на машинном обучении (ML, machine learning), используется для анализа нескольких изображений дефектов с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Подход на основе ML в основном фокусируется на методах классификации, таких как логистическая регрессия (LR, logistic regression), нейронная сеть (NN, neural network), k-ближайшие соседи (kNN, k-nearest neighbors) и наивный байесовский метод (NB, naïve bayes) для обработки изображений дефектов просвечивающей электронной микроскопии. Существует три метода машинного обучения: обучение с учителем, обучение без учителя и обучение с подкреплением. Методы обучения без учителя часто используются при кластеризации, хотя методы обучения с учителем сосредоточены на классификации. Подобные объекты могут быть сгруппированы в набор, известный как кластер, с использованием методов кластеризации. Методы классификации используются для разделения данных на классы. Алгоритм может учиться на предоставленных ему входных данных, а затем использовать эту модель обучения для классификации новых наблюдений. Эффективность этих методов анализируется с использованием параметра точности классификации. Наивный байесовский метод использует теорему Байеса, и этот метод предполагает, что наличие определенного признака в классе не связано ни с какими другими признаками. Таким образом, каждая пара признаков независима друг от друга. Этот метод может предсказывать групповые вероятности для каждого класса, и класс с наибольшей вероятностью может рассматриваться как наиболее вероятный класс.



## Понятийный аппарат байесовского подхода

Нас интересуют убеждения (beliefs), которые в терминах байесовского подхода могут быть интерпретированы как вероятности. У нас есть априорная уверенность в событии  $A$ , например в том, что перед выполнением тестов код содержит ошибки. Затем мы наблюдаем очередное свидетельство. В продолжение примера с ошибочным кодом: если код проходит  $X$  тестов, то необходимо изменить нашу уверенность с учетом данного факта. Величина, характеризующая уточненную уверенность в событии, называется апостериорной вероятностью. Уточнение уверенности осуществляется посредством следующего уравнения, известного как теорема Байеса, названная в честь открывшего ее Томаса Байеса (Tomas Bayes):

$$P(A|X) = \frac{P(X|A)P(A)}{P(X)}$$
$$\propto P(X|A)P(A).$$

Знак  $\propto$  обозначает пропорциональность. Данная формула касается не только байесовского вывода — это математический факт, используемый и вне его рамок. Байесовский вывод всего лишь использует формулу, чтобы связать априорную вероятность  $P(A)$  с обновленной апостериорной вероятностью  $P(A|X)$ .

## Прикладная математика в машинном обучении

$$X \sim P(X)$$

Это указывает на то, что  $X$  является случайной величиной, полученной из распределения вероятностей  $P(X)$ .

Функция массы вероятности (PMF, probability mass function) используется для описания дискретных случайных величин. Значение в выборочном пространстве переменной сопоставляется с вероятностью с использованием функции массы вероятности. Примером дискретного распределения является

Бернулли. Распределение Бернулли обозначает вероятность случайной величины, которая принимает одно из двух значений (например, орел/решка, истина/ложь и т. д.).

Функция плотности вероятности (PDF, probability density function) используется для описания непрерывных распределений. Бесконечное пространство выборки сопоставляется со значениями относительного правдоподобия с использованием функции плотности вероятности. Примером непрерывного распределения является распределение Гаусса. Гауссово или нормальное распределение параметризуется средним значением и дисперсией.

Распределение нескольких случайных величин называется совместным распределением вероятностей.

Предельное распределение вероятностей  $x$  при заданном  $y$  представлено как

$$P(x) = E_y P(x, y)$$

Здесь правило сумм используется для маргинализации случайных величин.

Условные распределения вероятностей  $x$  при заданном  $y$  представлены как

$$P(x|y) = P(x, y) \div P(y)$$

Вероятность  $x$  зависит от наблюдения  $y$ .

Правило Байеса представляется как

$$P(x|y) = P(y|x).P(x) \div P(y)$$

Это правило очень важно в машинном обучении.

Рассмотрим две переменные  $x$  и  $y$ . Здесь  $x$  и  $y$  называются независимыми тогда и только тогда, когда

$$P(x, y) = P(x).P(y)$$

Точно так же  $x$  и  $y$  называются условно независимыми при заданной другой переменной  $z$  тогда и только тогда, когда

$$P(x,y|z) = P(x|z).P(y|z)$$

### Этапы классификации дефектов

Шаг 1: ввод данных

Шаг 2: выполните механизм встраивания изображения с учетом входных данных

Шаг 3: тестирование и расчет оценок путем рассмотрения данных встраивания изображений и применения методов LR, NN, kNN и NB по отдельности для вычисления точности классификации.

Шаг 4: создайте матрицу путаницы для представления результатов классификации каждого метода.

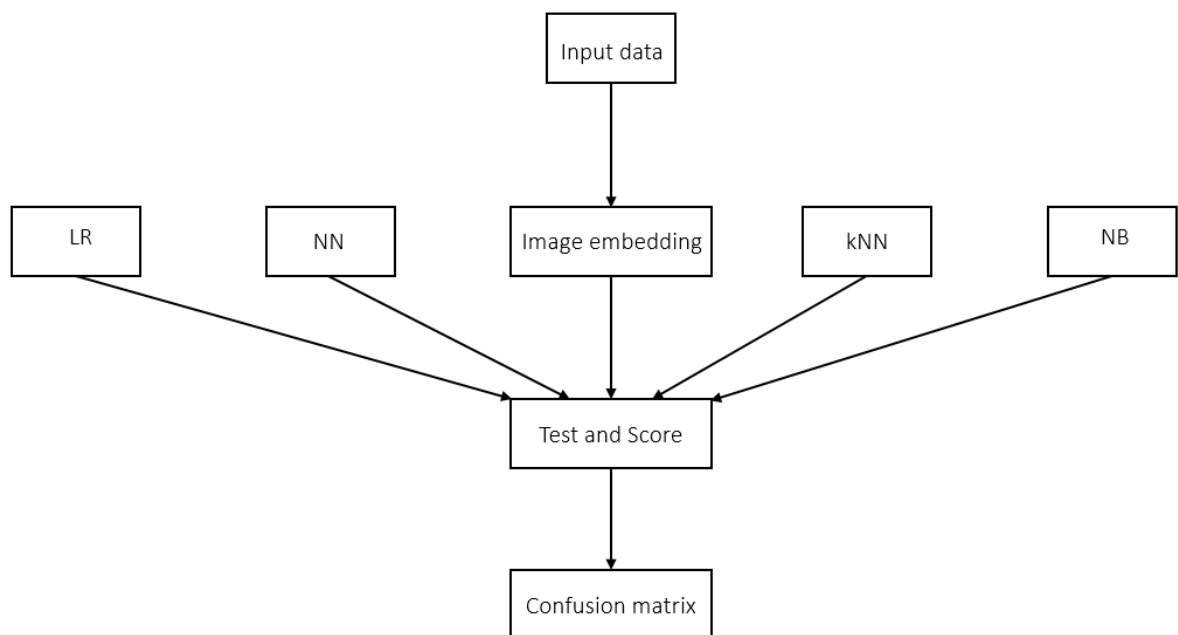


Рисунок 26

### **3.4. Применение средств машинного обучения для выявления критических дефектов детали из ПКМ.**

В настоящее время большинство отраслей промышленности приняли решение автоматизировать различные процессы на своем производстве. Поэтому контроль качества сырья играет решающую роль в производстве качественного продукта. Непрерывный мониторинг — утомительная и рутинная задача, которая утомляет эксперта и склонна к ошибкам. Хубер и другие обнаружили, что точность, достигнутая экспертом при идентификации дефекта, составляет 68%, что дало возможность для внедрения новых технологий, чтобы заполнить пробел. В автоматизированных производствах эта идентификация также должна быть автоматизирована и может быть достигнута с помощью системы машинного зрения. Система машинного зрения состоит из устройства получения изображения системы освещения и устройства обработки для определения дефекта поверхности путем обработки изображений. Система освещения помогает контролировать изменение освещения изображения во время получения изображения. С расширением возможностей обработки становится возможным обрабатывать большой набор данных изображений для достижения высокой точности с помощью обученной модели. Если материал рассматривается как композиты или металлическая поверхность, раннее обнаружение снижает стоимость дальнейшей обработки, поскольку конечный продукт может оказаться бесполезным. В данном пункте использование системы машинного зрения решает эти проблемы.

#### **Сбор информации**

Этот набор данных был загружен из базы данных дефектов поверхности металла Северо-восточного университета, которая содержит шесть типов типичных поверхностных дефектов горячекатаной стальной полосы, т. поверхность (PS), включения (In) и царапины (Sc). База данных включает 1800 изображений в градациях серого: по 300 образцов каждого из шести различных типов типичных дефектов поверхности. Однако в этом процессе набор данных

делится на 3 категории. Учебный каталог содержит 276 изображений каждого класса из 300 изображений. Остальные 24 изображения каждого класса снова делятся на тестовые и действительные наборы данных.

### **Содержание кода**

- 1) Распределение набора данных — набор поездов, набор проверки и набор тестов.
- 2) Предварительная обработка данных.
- 3) Разработка функций:
  - Модель FeatureExtractor использует последовательность Keras
  - Использованы активации «relu» и «softmax» (мультиклассификация)
- 4) Оценка качества модели.

### **Оценка точности и потерь**

Epoch 1/20

166/166 [=====] - 23s 139ms/step - loss: 2.0482 - accuracy: 0.2965 - val\_loss: 1.3099 - val\_accuracy: 0.4306

Epoch 2/20

166/166 [=====] - 16s 96ms/step - loss: 1.3796 - accuracy: 0.4813 - val\_loss: 0.9019 - val\_accuracy: 0.7778

Epoch 3/20

166/166 [=====] - 15s 92ms/step - loss: 1.0042 - accuracy: 0.6479 - val\_loss: 0.4159 - val\_accuracy: 0.9028

Epoch 4/20

166/166 [=====] - 16s 99ms/step - loss: 0.7477 - accuracy: 0.7554 - val\_loss: 0.6149 - val\_accuracy: 0.8472

Epoch 5/20

166/166 [=====] - 16s 98ms/step - loss: 0.6659 - accuracy: 0.7929 - val\_loss: 0.2035 - val\_accuracy: 0.9444

Epoch 6/20

166/166 [=====] - 16s 98ms/step - loss: 0.5590 - accuracy: 0.8394 - val\_loss: 0.1750 - val\_accuracy: 0.9583

Epoch 7/20

166/166 [=====] - 15s 91ms/step - loss: 0.5338 - accuracy: 0.8448 - val\_loss: 0.1715 - val\_accuracy: 0.9722

Epoch 8/20

166/166 [=====] - 16s 98ms/step - loss: 0.4560 - accuracy: 0.8835 - val\_loss: 2.4035 - val\_accuracy: 0.5139

Epoch 9/20

166/166 [=====] - 15s 92ms/step - loss: 0.4347 - accuracy: 0.8708 - val\_loss: 0.9173 - val\_accuracy: 0.7083

Epoch 10/20

166/166 [=====] - 16s 98ms/step - loss: 0.3763 - accuracy: 0.8919 - val\_loss: 0.1559 - val\_accuracy: 0.9583

Epoch 11/20

166/166 [=====] - 15s 91ms/step - loss: 0.4569 - accuracy: 0.8949 - val\_loss: 0.1490 - val\_accuracy: 0.9444

Epoch 12/20

166/166 [=====] - 16s 95ms/step - loss: 0.4242 - accuracy: 0.9149 - val\_loss: 0.0305 - val\_accuracy: 1.0000

Epoch 13/20

166/166 [=====] - 15s 93ms/step - loss: 0.3301 - accuracy: 0.9046 - val\_loss: 0.0206 - val\_accuracy: 1.0000

Epoch 14/20

166/166 [=====] - 16s 97ms/step - loss: 0.3673 - accuracy: 0.9094 - val\_loss: 0.0245 - val\_accuracy: 1.0000

Epoch 15/20

166/166 [=====] - 16s 94ms/step - loss: 0.3224 - accuracy: 0.9106 - val\_loss: 0.0513 - val\_accuracy: 1.0000

Epoch 16/20

166/166 [=====] - 16s 95ms/step - loss: 0.3442 - accuracy: 0.9082 - val\_loss: 0.0405 - val\_accuracy: 0.9861

Epoch 17/20

166/166 [=====] - 16s 94ms/step - loss: 0.2862 - accuracy: 0.9173 - val\_loss: 0.0166 - val\_accuracy: 1.0000

Epoch 18/20

166/166 [=====] - 16s 96ms/step - loss: 0.3125 - accuracy: 0.9167 - val\_loss: 0.0861 - val\_accuracy: 0.9722

Epoch 19/20

166/166 [=====] - 16s 94ms/step - loss: 0.3214 - accuracy: 0.9064 - val\_loss: 0.0106 - val\_accuracy: 1.0000

Epoch 20/20

166/166 [=====] - 16s 95ms/step - loss: 0.2910 - accuracy: 0.9269 - val\_loss: 0.0450 - val\_accuracy: 0.9861

## Визуализация результатов тестирования

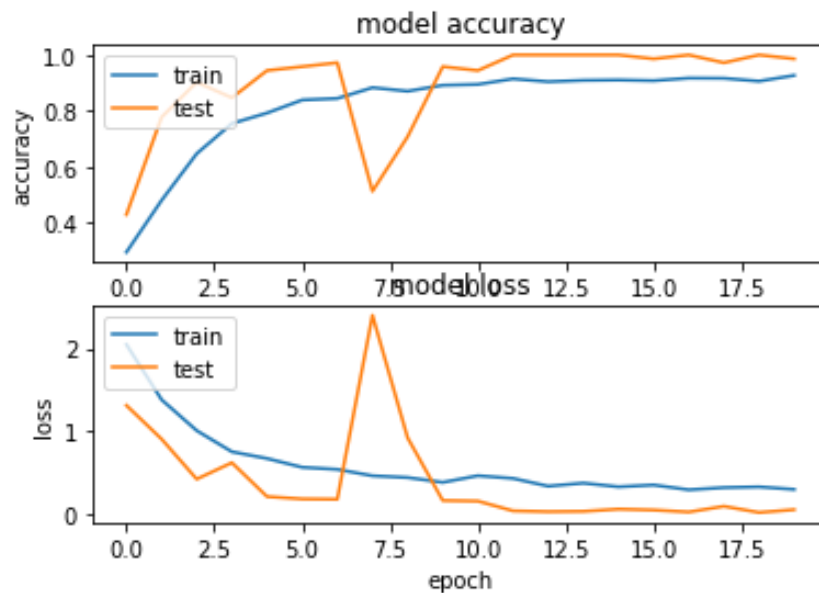


Рисунок 27 – модель точности и потери

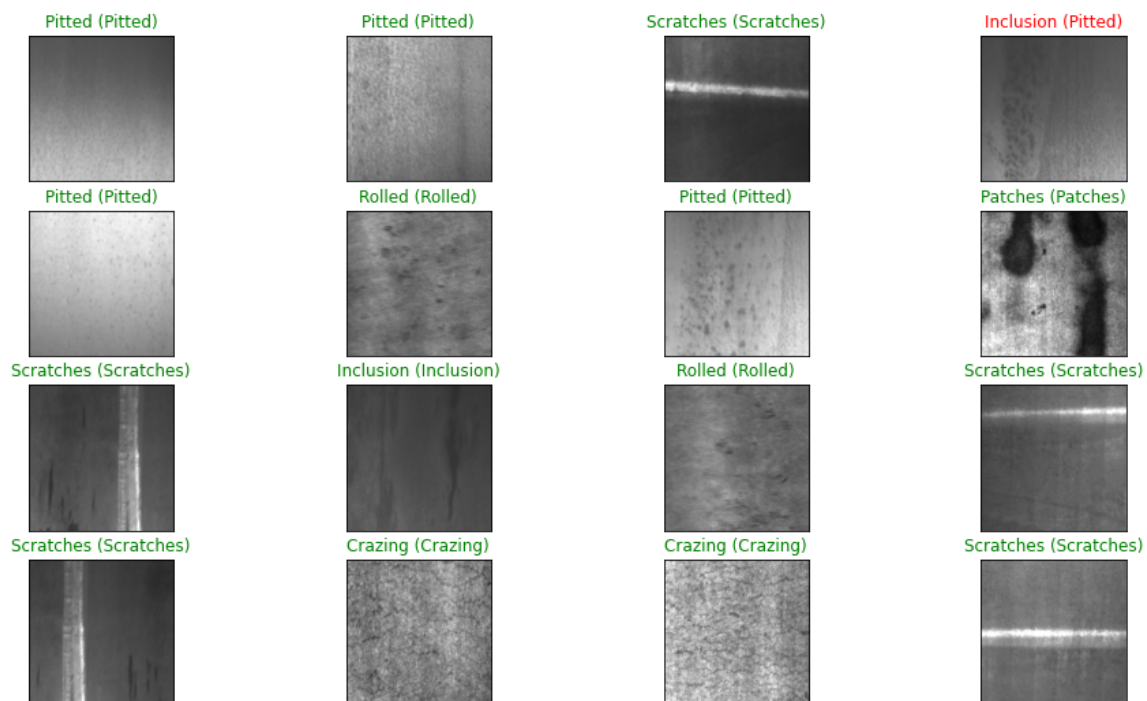


Рисунок 28 – Результат тестирования



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе выполнен литературный анализ основных преимуществ системного мониторинга безопасности по сравнению с традиционными неразрушающими методами контроля, используемыми в настоящее время при проверке элементов летательных аппаратов из композитных материалов. Опыт успешного внедрения технологии системного мониторинга безопасности на самолетах и ракетах был признан эффективным.
2. С помощью программного комплекса ANSYS проведено моделирование напряжённо-деформированного состояния трёхслойного головного обтекателя ракеты-носителя. Максимальное значение растягивающего напряжения в эксплуатационных условиях составило 158 МПа.
3. Рассмотрена задача статической прочности локальной зоны углепластикового корпуса головного обтекателя при наличии различных видов дефектов. В качестве критерия оценки работоспособности конструкции выбран критерий максимальных напряжений композиционного материала. Определено 100 вариантов возможных дефектов и построена алгоритмическая модель прогнозирования технического состояния конструкции, в зависимости от геометрических параметров дефекта. Эффективность построенной модели превышает 95%, что свидетельствует о практической пользе данного подхода.
4. На базе данных о характеристиках дефектов из открытых источников построена алгоритмическая модель, позволяющая прогнозировать техническое состояние конструкции по фотографии дефекта. Точность предсказания с использованием полученной модели превышает 97%.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Брондз, Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов / Е.А. Мокринская, В.В. Лебедев, Е.В. Бекетова, Н.М. Харитонов, А.А. Снастина, А.М. Усачева // М.. Машиностроение, 1986. – 184 с.
2. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. // Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей. – Москва “Высшая школа”, 2002.
3. EASA, CS-E (Amendment 5), Easy Access Rules for Engines
4. Composite aircraft structure // U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
5. Reliability Program Methods— Standards for Determining Time Limitations // U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
6. Certification of large airplane composite structures, recent progress and new trends in compliance philosophy // Jean Rouchon // Centre d’Essais Aeronautique de Toulouse 31056 Toulouse cedex – France
7. Dr. David J. Smith // Reliability, Maintainability and Risk // IChemE // Tonbridge, UK.
8. Теплинский Ю.А., Быков И.Ю. // Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов. – Москва, ЦентрЛитНефтеГаз, 2007. – 400 с.
9. <https://skybrary.aero/articles/non-destructive-testing-composite-materials-aviation>
10. Зайцев, А. М. Обеспечение надежной работы деталей авиационных двигателей // Издательство “Транспорт” Москва. – 1971. – С. 1-196.
11. Chehroudi, Bruce. Composite Materials and Their Uses in Cars Part II: Applications. (1999)
12. Кэмерон Дэвисон-Пайлон. Вероятностное программирование на Python Байесовский вывод и алгоритмы. (2009)

13. Ashok N. Srivastava, Jiawei Han. Machine Learning and Knowledge Discovery for Engineering Systems Health Management. (2011)
14. Muthukumaran Malarvel, Soumya Ranjan Nayak, Prasant Kumar Pattnaik, and Surya Narayan Panda. Machine Vision Inspection Systems. (2021)
15. Shrirang Ambaji Kulkarni, Varadraj P. Gurupur, Steven L. Fernandes. Introduction to IoT with Machine Learning and Image Processing using Raspberry Pi. (2020)
16. Dataset//<https://www.kaggle.com/datasets/fantacher/neu-metal-surface-defects-data>
17. Ebna Hai, Bhuiyan Shameem Mahmood & Bause, Markus & Kuberry, Paul. (2016). Finite Element Approximation of the eXtended Fluid-Structure Interaction (eXFSI) Problem. ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Volume 1A. pp. V01AT11A001. 10.1115/FEDSM2016-7506.
18. Time-domain hybrid global--local concept for guided-wave propagation with piezoelectric wafer active sensor - Scientific Figure on ResearchGate.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Текст кода ансиса для определения дефектов у композитных деталей

! Габариты рассматриваемой области, мм

X1=100

Y1=80

! Толщина детали, мм

h=5

! Давление, МПа

P\_pres=158

! Температуры на границах модели, град Цельсия

T1=160

T2=170

k1=0.5 ! коэффициент по отношению к X1 - центр отверстия

k2=0.5 ! коэффициент для L3

k3=0.3 ! Коэффициент для R относительно L3 и Y1/2

!! 1 - Механические характеристики углепластика

! Модули упругости, МПа

E\_KM\_X=70000

E\_KM\_Y=70000

E\_KM\_Z=15000

G\_KM\_YZ=5000

G\_KM\_XY=8000

G\_KM\_XZ=5000

! Коэффициенты Пуассона

MU\_KM\_XY=0.25

MU\_KM\_XZ=0.06

MU\_KM\_YZ=0.06

ALPH\_KM\_X=5e-6

ALPH\_KM\_Y=5e-6

ALPH\_KM\_Z=5e-6

! Предельные характеристики, МПа

S\_KM\_1\_tension=450

S\_KM\_2\_tension=450

S\_KM\_3\_tension=350

S\_KM\_1\_compression=-300

S\_KM\_2\_compression=-300

S\_KM\_3\_compression=-300

S\_KM\_12\_tension=80

S\_KM\_23\_tension=80

S\_KM\_13\_tension=80

! Плотность, т/мм<sup>3</sup>

po\_KM=1.5e-9

```

F1=(1/S_KM_1_tension)+(1/S_KM_1_compression)
F2=(1/S_KM_2_tension)+(1/S_KM_2_compression)
F11=-1/(S_KM_1_tension*S_KM_1_compression)
F22=-1/(S_KM_2_tension*S_KM_2_compression)
F44=1/S_KM_12_tension**2
F12=-F11/2

```

/PREP7 ! Входим в модуль построения геометрии

X2=k1\*X1

csys,0 !!! работаем в декартовой системе координат

K, , 0, 0, 0 !!! построение первой точки с координатами X=0, Y=0, Z=0

K, , 0, Y1/2, 0 !!! построение второй точки с координатами X=0, Y=Y1/2, Z=0

K, , X1, Y1/2, 0 !!! построение третьей точки с координатами X=0, Y=Y1/2, Z=0

K, , X1, 0, 0 !!! построение четвертой точки с координатами X=0, Y=Y1/2, Z=0

K, , X2, 0, 0 !!! построение третьей точки с координатами X=0, Y=Y1/2, Z=0

LSTR, 1, 2 !!! соединение точек с номерами 1 и 2 - линия 1

LSTR, 2, 3 !!! соединение точек с номерами 2 и 3 - линия 2

LSTR, 3, 4 !!! соединение точек с номерами 3 и 4 - линия 3

LSTR, 4, 1 !!! соединение точек с номерами 4 и 5 - линия 4

\*GET, X\_5, KP, 5, LOC, X !!! записываем переменную X\_5 - координаты точки 5 по X

\*GET, Y\_5, KP, 5, LOC, Y !!! записываем переменную Y\_5 - координаты точки 5 по Y

L\_1\_5=X\_5-0

L\_2\_5=X1-X\_5

L3min=L\_1\_5

\*if, L\_2\_5, le, L3min, then

L3min=L\_2\_5

\*endif

L3=k2\*L3min

K, , X2-L3, 0, 0

K, , X2+L3, 0, 0

Rmin=L3

\*if, Y1/2, le, Rmin, then

Rmin=Y1/2

\*endif

R=k3\*Rmin

KGEN, 2, 6, , , R, , , ,

KGEN, 2, 6, , , R, R, , ,

KGEN, 2, 7, , , -R, , , ,

KGEN, 2, 7, , , -R, R, , ,

LARC,6,9,8,R, !!! Дуга по точкам номер 6 и 9, с центром в точке 8, радиусом R  
LARC,11,7,10,R, !!! Дуга по точкам номер 6 и 9, с центром в точке 8, радиусом R

LSTR, 9, 11

LSTR, 6, 7

! Построение поверхностей

AL, 1, 2, 3, 4

AL, 8, 5, 7, 6

ASBA, 1, 2

! ЗАДАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

! Углепластик

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

!!модули упругости

MPDATA,EX,1,,E\_KM\_X

MPDATA,EY,1,,E\_KM\_Y

MPDATA,EZ,1,,E\_KM\_Z

!!коэффициенты Пуассона

MPDATA,PRXY,1,,MU\_KM\_XY

MPDATA,PRYZ,1,,MU\_KM\_YZ

MPDATA,PRXZ,1,,MU\_KM\_XZ

!!модули сдвига

MPDATA,GXY,1,,G\_KM\_XY

MPDATA,GYZ,1,,G\_KM\_YZ

MPDATA,GXZ,1,,G\_KM\_XZ

!!клтр (при нагреве от температуры 20 град Цельсия)

UIMP,1,REFT,,,20

MPDATA,ALPX,1,,ALPH\_KM\_X

MPDATA,ALPY,1,,ALPH\_KM\_Y

MPDATA,ALPZ,1,,ALPH\_KM\_Z

!! плотность , т/мм3

MPDATA,DENS,1,,ро\_KM

! ЗАДАНИЕ ТИПОВ ЭЛЕМЕНТОВ И РАЗМЕРОВ СЕТКИ, ПОСТРОЕНИЕ сетки

! Оболочечный 4-узловой

ET,1,SHELL181

! Трехмерный 8-узловой

ET,2,SOLID185

! Размеры сетки

n\_model=1.5

n\_h\_count=5

```
LESIZE, ALL, n_model  
AMESH, ALL
```

```
! Построение 3d-геометрии  
KGEN, 2, 1, , , , h, , ,  
LSTR, 1, 12  
LESIZE, 4, , , n_h_count, , , , 0  
VDLAG, 3, , , , , 4  
LDELETE, 4, , , 1  
ACLEAR, ALL
```

#### ! ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

```
! Заделка  
ASEL, S, , , 1  
NSLA, S, 1  
D, ALL, , 0, , , , UX, , , UZ, , ,  
ALLSEL, ALL
```

```
ASEL, S, , , 5  
ASEL, A, , , 9  
NSLA, S, 1  
D, ALL, , 0, , , , UY, , , ,  
ALLSEL, ALL
```

```
! Давление  
ASEL, S, , , 4  
NSLA, S, 1  
SF, ALL, PRES, -P_pres  
ALLSEL, ALL
```

```
! Температура  
kol_temp=2 !Число точек, в которых задается температура
```

```
*dim, temp_func_axi, table, kol_temp, 1 !Создаем массив данных - таблицу температур
```

```
!---ЗНАЧЕНИЯ Координат по оси X в таблице---  
temp_func_axi(1, 0)=0 !начало координат  
temp_func_axi(2, 0)=X1 !крайняя точка нашей детали по оси x
```

```
!---ЗНАЧЕНИЯ Температур для соответствующих координат по оси X в таблице---  
temp_func_axi(1, 1)=T1  
temp_func_axi(2, 1)=T2
```

```
*get, node_count, node, , count ! Определяем число узлов в модели  
!*
```

```
*get, node_max, node, , num, max ! Определяем максимальный номер узлов в модели
```

```

*get, x_coord, node, node_max, loc, x ! Определяем координату по оси X узла с
максимальным номером
bf, node_max, temp_x, temp_func_axi(x_coord) ! интерполируем значение температуры в узле,
на основе данных таблицы
*do,i,2,node_count,1 !проходим цикл со всеми остальными узлами модели аналогично
*get,node_max1,node,node_max,nxtl !определяем узел с максимальным номером после
текущего максимального
node_max=node_max1 !работаем теперь с этим новым узлом
*get, x_coord, node, node_max, loc, x
bf, node_max, temp_x, temp_func_axi(x_coord)
*enddo
ALLSEL, ALL

```

! ЗАПУСК НА РЕШЕНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

```

/sol
solve

```

! ОБРАБОТКА ДАННЫХ

```

/POST1
SubStep=1

```

!!! 1 - ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМЕРОВ ВЫБРАННЫХ УЗЛОВ

```

*get,Model_max_count,node,,count ! число выбранных узлов
*get,Model_max_nmax,node,,num,max ! максимальный номер

```

!2d массив размерностью: число узлов - число шагов решения

```

*dim,Model_max_array,array,Model_max_count, SubStep

```

Model\_max\_array(1,1)=Model\_max\_nmax ! первый - с максимальным номером

!далее будем записывать узлы по убыванию номера

```

*do,Model_max_i,2,model_max_count,1
*get,Model_max_nmax1,node,Model_max_array(Model_max_i-1,1),nxtl
Model_max_array(Model_max_i,1)=Model_max_nmax1
*enddo

```

```

*dim, max_stress_X, array, SubStep
*dim, max_stress_Y, array, SubStep
*dim, max_stress_Z, array, SubStep
*dim, max_stress_XY, array, SubStep
*dim, max_stress_YZ, array, SubStep
*dim, max_stress_XZ, array, SubStep
*dim, max_stress_criterion, array, SubStep
*dim, max_stress_criterion_num, array, SubStep
*dim, Tsai_Wu_criterion, array, SubStep

```



## !!! 2 - ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НДС В УЗЛАХ

! массив для записи компонент НДС каждого узла

\*dim, rez\_SigmaX, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, Criterion\_max\_stress\_SigmaX, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, rez\_SigmaY, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, Criterion\_max\_stress\_SigmaY, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, rez\_SigmaZ, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, Criterion\_max\_stress\_SigmaZ, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, rez\_SigmaXY, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, Criterion\_max\_stress\_SigmaXY, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, rez\_SigmaYZ, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, Criterion\_max\_stress\_SigmaYZ, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, rez\_SigmaXZ, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, Criterion\_max\_stress\_SigmaXZ, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, Criterion\_max\_stress, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, fiber\_f, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, matrix\_f, array, Model\_max\_count, SubStep

\*dim, rez\_Tsai\_Wu, array, Model\_max\_count, SubStep

! внешний цикл - по числу шагов решения

\*do, i, 1, SubStep, 1

set, i

!внутренний цикл - по узлам с записью данных

\*do, j, 1, Model\_max\_count, 1

\*get, SigmaX\_rez, node, Model\_max\_array(j, 1), S, X

rez\_SigmaX(j, i) = SigmaX\_rez

S\_X\_fail = S\_KM\_1\_tension

\*IF, rez\_SigmaX(j, i), LE, 0, THEN

S\_X\_fail = S\_KM\_1\_compression

\*endif

Criterion\_max\_stress\_SigmaX(j, i) = rez\_SigmaX(j, i) / (S\_X\_fail + 0.01)

\*get, SigmaY\_rez, node, Model\_max\_array(j, 1), S, Y

rez\_SigmaY(j, i) = SigmaY\_rez

S\_Y\_fail = S\_KM\_2\_tension

\*IF, rez\_SigmaY(j, i), LE, 0, THEN

S\_Y\_fail = S\_KM\_2\_compression

\*endif

Criterion\_max\_stress\_SigmaY(j, i) = rez\_SigmaY(j, i) / (S\_Y\_fail + 0.01)

\*get, SigmaZ\_rez, node, Model\_max\_array(j, 1), S, Z

rez\_SigmaZ(j, i) = SigmaZ\_rez

S\_Z\_fail = S\_KM\_3\_tension

\*IF, rez\_SigmaZ(j, i), LE, 0, THEN

```

S_Z_fail=S_KM_3_compression
*endif
Criterion_max_stress_SigmaZ(j,i)=rez_SigmaZ(j,i)/(S_Z_fail+0.01)

*get,SigmaXY_rez,node,Model_max_array(j,1),S,XY
rez_SigmaXY(j,i)=SigmaXY_rez
S_XY_fail=S_KM_12_tension
Criterion_max_stress_SigmaXY(j,i)=rez_SigmaXY(j,i)/(S_XY_fail+0.01)

*get,SigmaYZ_rez,node,Model_max_array(j,1),S,YZ
rez_SigmaYZ(j,i)=SigmaYZ_rez
S_YZ_fail=S_KM_23_tension
Criterion_max_stress_SigmaYZ(j,i)=rez_SigmaYZ(j,i)/(S_YZ_fail+0.01)

*get,SigmaXZ_rez,node,Model_max_array(j,1),S,XZ
rez_SigmaXZ(j,i)=SigmaXZ_rez
S_XZ_fail=S_KM_13_tension
Criterion_max_stress_SigmaXZ(j,i)=rez_SigmaXZ(j,i)/(S_XZ_fail+0.01)

Criterion_max_stress(j,i)=Criterion_max_stress_SigmaX(j,i)
*IF, Criterion_max_stress(j,i), LE, Criterion_max_stress_SigmaY(j,i), THEN
Criterion_max_stress(j,i)=Criterion_max_stress_SigmaY(j,i)
*ENDIF
*IF, Criterion_max_stress(j,i), LE, Criterion_max_stress_SigmaZ(j,i), THEN
Criterion_max_stress(j,i)=Criterion_max_stress_SigmaZ(j,i)
*ENDIF
*IF, Criterion_max_stress(j,i), LE, Criterion_max_stress_SigmaXY(j,i), THEN
Criterion_max_stress(j,i)=Criterion_max_stress_SigmaXY(j,i)
*ENDIF
*IF, Criterion_max_stress(j,i), LE, Criterion_max_stress_SigmaYZ(j,i), THEN
Criterion_max_stress(j,i)=Criterion_max_stress_SigmaYZ(j,i)
*ENDIF
*IF, Criterion_max_stress(j,i), LE, Criterion_max_stress_SigmaXZ(j,i), THEN
Criterion_max_stress(j,i)=Criterion_max_stress_SigmaXZ(j,i)
*ENDIF

fiber_f(j,i)=F1*rez_SigmaX(j,i)+F11*rez_SigmaX(j,i)**2
matrix_f(j,i)=F2*rez_SigmaY(j,i)+F22*rez_SigmaY(j,i)**2+F44*rez_SigmaXY(j,i)**2
rez_Tsai_Wu(j,i)=fiber_f(j,i)+matrix_f(j,i)+2*F12*rez_SigmaX(j,i)*rez_SigmaY(j,i)

*enddo

*vscfun, max_X_rez, max, Criterion_max_stress_SigmaX(1,i)
max_stress_X(i)=max_X_rez

*vscfun, max_Y_rez, max, Criterion_max_stress_SigmaY(1,i)
max_stress_Y(i)=max_Y_rez

*vscfun, max_Z_rez, max, Criterion_max_stress_SigmaZ(1,i)
max_stress_Z(i)=max_Z_rez

```

```
*vscfun, max_XY_rez, max, Criterion_max_stress_SigmaXY(1,i)
max_stress_XY(i)=max_XY_rez
```

```
*vscfun, max_YZ_rez, max, Criterion_max_stress_SigmaYZ(1,i)
max_stress_YZ(i)=max_YZ_rez
```

```
*vscfun, max_XZ_rez, max, Criterion_max_stress_SigmaXZ(1,i)
max_stress_XZ(i)=max_XZ_rez
```

```
*vscfun, max_rez, max, Criterion_max_stress(1,i)
max_stress_criterion(i)=max_rez
```

```
*vscfun, max_rez_NUM, lmax, Criterion_max_stress(1,i)
max_stress_criterion_num(i)=max_rez_NUM
```

```
*vscfun, max_rez_Tsai, max, rez_Tsai_Wu(1,i)
Tsai_Wu_criterion(i)=max_rez_Tsai
```

[\\*enddo](#)

```
*vscfun, max_stress_fin, max, max_stress_criterion
criterion_max_stress_FIN=max_stress_fin
```

```
max_stress_fin_NUM=Model_max_array(max_rez_NUM,1)
```

```
*vscfun, max_Tsai_fin, max, Tsai_Wu_criterion
criterion_Tsai_Wu_FIN=max_Tsai_fin
```

```
ALLSEL, ALL
```

```
! Создание файла с картинкой
```

```
/DSCALE,ALL,1.0
```

```
/EFACET,1
```

```
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
```

```
/UDOC,1,TYP2,0
```

```
/UDOC,1,TYPE,0
```

```
/UDOC,1,DATE,0
```

```
/PLOPTS,INFO,3
```

```
/PLOPTS,LEG1,1
```

```
/PLOPTS,LEG2,1
```

```
/PLOPTS,LEG3,1
```

```
/PLOPTS,FRAME,1
```

```
/PLOPTS,TITLE,0
```

```
/PLOPTS,MINM,0
```

```
/PLOPTS,FILE,0
```

```
/PLOPTS,SPNO,0
```

```
/PLOPTS,LOGO,1
```

```
/PLOPTS,WINS,1
```

```
/PLOPTS,WP,0
```

```
/PLOPTS,DATE,2
/TRIAD,OFF
/REPLOT
/SHOW,PNG,,0
PNGR,COMP,1,-1
PNGR,ORIENT,HORIZ
PNGR,COLOR,2
PNGR,TMOD,1
/GFILE,1200,
!*
/CMAP,_TEMPCMAP_,CMP,,SAVE
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,0,0,0,15
/REPLOT
/CMAP,_TEMPCMAP_,CMP
/DELETE,_TEMPCMAP_,CMP
/SHOW,CLOSE
/DEVICE,VECTOR,0
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Текст кода для модели машинного обучения

```
import numpy as np

import pandas as pd

import os

import tensorflow as tf

from tensorflow.keras.optimizers import RMSProp

from tensorflow.keras.preprocessing.image import ImageDataGenerator


# Pre-processing the data

train_datagen = ImageDataGenerator(

    rescale=1. / 255,

    shear_range=0.2,

    zoom_range=0.2,

    horizontal_flip=True)


test_datagen = ImageDataGenerator(rescale=1./255)


train_generator = train_datagen.directory(

    train_dir,

    target_size=(200, 200),

    batch_size=10,
```

```
class_mode='categorical')
```

```
validation_generator = test_datagen.directory(
```

```
    val_dir,
```

```
    target_size=(200, 200),
```

```
    batch_size=10,
```

```
    class_mode='categorical')
```

```
class myCallback(tf.keras.callbacks.Callback):
```

```
    def on_epoch_end(self, epoch, logs={}):
```

```
        if(logs.get('accuracy') > 0.98 ):
```

```
            self.model.stop_training = True
```

```
model = tf.keras.models.Sequential([
```

```
    tf.keras.layers.Conv2D(32, (2,2), activation='relu', input_shape=(200, 200, 3)),
```

```
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2, 2),
```

```
    tf.keras.layers.Conv2D(64, (2,2), activation='relu'),
```

```
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2,2),
```

```
    tf.keras.layers.Conv2D(128, (2,2), activation='relu'),
```

```
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2,2),
```

```
    tf.keras.layers.Flatten(),
```

```
    tf.keras.layers.Dense(256, activation='relu'),
```

```
tf.keras.layers.Dropout(0.2),  
tf.keras.layers.Dense(6, activation='softmax')  
])
```

```
model.summary()
```

```
model.compile(loss='categorical_crossentropy',  
              optimizer='rmsprop',  
              metrics=['accuracy'])
```

```
callbacks = myCallback()
```

```
history = model.fit(train_generator,  
                    batch_size = 32,  
                    epochs=20,  
                    validation_data=validation_generator,  
                    callbacks=[callbacks],  
                    verbose=1, shuffle=True)
```

```
# Test result visualization
```

```
# summarize history for accuracy & loss
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
plt.figure(1)
```

```
plt.subplot(211)

plt.plot(history.history['accuracy'])

plt.plot(history.history['val_accuracy'])

plt.title('model accuracy')

plt.ylabel('accuracy')

plt.xlabel('epoch')

plt.legend(['train', 'test'], loc='upper left')
```

```
plt.subplot(212)

plt.plot(history.history['loss'])

plt.plot(history.history['val_loss'])

plt.title('model loss')

plt.ylabel('loss')

plt.xlabel('epoch')

plt.legend(['train', 'test'], loc='upper left')

plt.show()
```

```
from sklearn.datasets import load_files

import numpy as np
```

```
test_dir = '/path/'
```

```
def load_dataset(path):
```



```

data = load_files(path)

files = np.array(data['filenames'])

targets = np.array(data['target'])

target_labels = np.array(data['target_names'])

return files,targets,target_labels


x_test, y_test,target_labels = load_dataset(test_dir)


from keras.utils import np_utils

y_test = np_utils.to_categorical(y_test,no_of_classes)


from keras.preprocessing.image import array_to_img, img_to_array, load_img

def convert_image_to_array(files):

    images_as_array=[]

    for file in files:

        images_as_array.append(img_to_array(load_img(file)))

    return images_as_array


x_test = np.array(convert_image_to_array(x_test))

print('test set shape : ',x_test.shape)

y_pred = model.predict(x_test)

fig = plt.figure(figsize=(16, 9))

```

```
for i, idx in enumerate(np.random.choice(x_test.shape[0], size=16, replace=False)):

    ax = fig.add_subplot(4, 4, i + 1, xticks=[], yticks=[])

    ax.imshow(np.squeeze(x_test[idx]))

    pred_idx = np.argmax(y_pred[idx])

    true_idx = np.argmax(y_test[idx])

    ax.set_title("{} ({}).format(target_labels[pred_idx], target_labels[true_idx],

        color=("green" if pred_idx == true_idx else "red"))
```