

На правах рукописи



Белоусов Илья Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ МЕЖСЛОЙНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И
УСТОЙЧИВОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск — 2026

Работа выполнена в Федеральном автономном учреждении «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина» и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Бурнышева Татьяна Витальевна**
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Бохоева Любовь Александровна**,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Восточно-Сибирский государственный университет
технологии и управления», кафедра
«Информационные технологии и прикладная
механика», заведующий кафедрой;

Кургузов Владимир Дмитриевич
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Институт гидродинамики имени
М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской
академии наук», лаборатория механики композитов,
главный научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»,
г. Самара.

Защита диссертации состоится «02» июля 2026 г. в 14⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета 24.2.347.03 при ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073; г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте организации: www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» мая 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Андрей Геннадиевич Тюрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Многослойные композиционные материалы широко используются в авиационной промышленности для создания легких и прочных элементов конструкции летательных аппаратов. Одним из наиболее распространённых типов дефектов, которым подвержены элементы конструкций, выполненные из таких материалов, являются межслойные дефекты, или расслоения. Подобные дефекты могут возникнуть в процессе производства и эксплуатации композитных элементов конструкций летательных аппаратов, что может привести к заметному снижению их несущей способности. На текущий момент не существует единого стандартного подхода, по которому можно было бы определить степень влияния обнаруженного межслойного дефекта на несущую способность конструкции, и, соответственно, является ли межслойный дефект опасным.

В связи с вышесказанным является актуальной задача исследования и анализа влияния подобных дефектов на несущую способность как образцов, так и цельных элементов конструкции летательных аппаратов, а также валидации расчётных моделей на основе экспериментальных данных.

Степень разработанности темы исследования

В литературе представлено большое число исследований, посвящённых механике многослойных композиционных материалов и анализу напряжённо-деформированного состояния конструктивных элементов из многослойных композитов (Алфутов Н.А., Болотин В.В., Максименко В.Н., Олегин И.П., Пустовой Н.В.), механике разрушения таких материалов (Качанов Л.М., Сиратори М., Вильдеман В.Э., Тарнопольский Ю.М.), устойчивости элементов конструкции из многослойных композиционных материалов (Алфутов Н.А.) и их закритического поведения (Митрофанов О.В., *Kim H.J.*), оптимальному проектированию элементов конструкций из многослойных композиционных материалов (Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И., Аннин Б.Д.). Существуют работы, посвященные экспериментальному исследованию композитов с различными дефектами (Болдырев А.В., Лобанов Д.С., *Yongliang Li*).

Задачи анализа закритического поведения пластин с расслоениями, а также моделирование развития расслоений с использованием расширенного функционала потенциальной энергии представлены в работах *Kollner A., Vollmecke C., Wang K., Zhao L., Hong H., Gong Y., Zhang J., Ning H.* Подходы к моделированию процесса расслоений в рамках метода конечных элементов описаны в работах Чернякина С.А., Скворцов Ю.В., *Krueger R., Heidari-Rarani M., Sayedain M.*

Монография Бохоевой Л.А. посвящена решению задачи локальной потери устойчивости композитных элементов конструкций с дефектом. В работе приведено сравнение данных, полученных аналитическими методами и методом конечных элементов, с результатами испытаний образцов на примере полосы со сквозным расслоением и пластины с круглым межслойным дефектом.

Сравнение результатов испытаний образцов с межслойными дефектами на сжатие с результатами конечно-элементного моделирования и результатами, полученными с помощью аналитических подходов, также представлены в работах Чермошнцева А.С., Пнёва А.Г., Дамдинова Т.А.

Целью диссертационной работы является оценка влияния межслойных дефектов на несущую способность многослойных композитных пластин при действии одноосного сжимающего нагружения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести экспериментальные исследования по определению межслоевой вязкости разрушения углеродного композиционного материала, несущей способности образцов пластин, выполненных из многослойного композиционного материала, без дефектов и с межслойными дефектами при одноосном сжимающем воздействии.

2. Разработать расчетную параметрическую модель многослойных углеродных композитных пластин с межслойными дефектами в виде круглого непрочья для определения их несущей способности с учетом процесса расслоения и провести её валидацию.

3. Провести численные исследования несущей способности многослойных углеродных композитных пластин, конструктивно-подобных образцов элементов конструкций ЛА с дефектом в виде круглого непрочья при сжимающей осевой нагрузке с помощью разработанной параметрической модели.

Научная новизна работы:

1. На основании новых экспериментальных данных по несущей способности многослойных композитных пластин при одноосном сжимающем воздействии получена оценка влияния параметров межслойного дефекта круглой формы на несущую способность пластин.

2. Разработана и валидирована новая расчётная параметрическая модель многослойной композитной пластины с межслойным дефектом в виде круглого непрочья для моделирования процесса расслоения и определения несущей способности пластины.

3. Получены новые результаты по влиянию параметров межслойного дефекта на критическую нагрузку и несущую способность композитных пластин при одноосном сжимающем воздействии.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость определяется необходимостью разработки и валидации расчётных конечно-элементных моделей композитных элементов конструкции ЛА с межслойными дефектами, которые учитывают потерю устойчивости, закритическое поведение, процесс расслоения и оценку разрушающей нагрузки.

Практическая значимость заключается в получении экспериментальных и расчётных зависимостей влияния межслойного дефекта на несущую способность композитных элементов конструкции ЛА. Полученные результаты использованы в ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, о чем имеется акт внедрения.

Методология и методы исследования

Методология и методы исследования основаны на применении метода конечных элементов для численного решения задач теории упругости при определении критических нагрузок, форм потери устойчивости и напряжённо-

деформированного состояния многослойных пластин; методов вычислительного эксперимента и экспериментальных методов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты натурных испытаний по определению величин вязкости разрушения образцов из препрега *Torayca T800*; результаты натурных испытаний на сжатие образцов в виде пластин без дефектов и с межслойными дефектами в виде круглого непрочлея из материала *АСМ-102С 130UD* для оценки роста межслойных дефектов и определения разрушающих нагрузок.

2. Разработанная и валидированная расчётная параметрическая модель для определения несущей способности многослойной композитной пластины с межслойным дефектом, учитывающая процесс расслоения и вязкость разрушения материала.

3. Результаты параметрического исследования несущей способности композитных пластин с межслойным дефектом в виде круглого непрочлея при действии сжимающей осевой нагрузки с учётом расположения и геометрических размеров дефекта.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность и обоснованность результатов работы определяется согласованностью результатов расчётов и экспериментальных измерений; применением основных положений механики композиционных материалов; использованием расчётных численных моделей, построенных в апробированных и сертифицированных программных комплексах расчёта напряжённо-деформированного состояния методом конечных элементов; использованием сертифицированных измерительных машин и инструментов при проведении натурных испытаний.

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались: на XXI Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 2020 г.; на Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», Москва, Институт прикладной механики РАН, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, 2020, 2022 гг.; в рамках школы-семинара «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов», Новосибирск, СибНИА, 2021, 2022 гг.; на 16-й Всероссийской научной конференции «Краевые задачи и математическое моделирование», Новокузнецк, КГПИ КемГУ, 2022 г.; на Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов», Новосибирск, СибНИА, 2023 г.; на XXIV Всероссийской научно-технической конференции «Наука Промышленность Оборона», Новосибирск, НГТУ, 2023 г.; на научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов-2022», Москва, ЦАГИ, 2022 г.; на 22-ой международной конференции «Авиация и Космонавтика», Москва, МАИ, 2023 г.; Научно-техническая конференция «Прочность конструкций летательных аппаратов-2022», Москва, ЦАГИ, 2022 г.

Личный вклад автора заключается в решении задач и достижении цели диссертационного исследования, определении программы исследования и её

реализации; построении численных моделей типовых образцов с дефектами, выполненных из многослойных композитных материалов; проведении испытаний образцов; в валидации расчётной модели по результатам испытаний; проведении параметрических исследований с помощью валидированной расчётной модели; анализе полученных результатов и формулировании выводов. Совместно полученные результаты представлены с согласия соавторов.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» в части пунктов 2 — «Обеспечение прочности объектов авиационной, ракетной и космической техники на основе современных аналитических и численных методов, методов натурного и полунатурного моделирования в условиях стационарных и нестационарных внешних воздействий» и 6 — «Организация, экономика и оптимизация процессов обеспечения прочности, термочечности и тепловых режимов летательных аппаратов».

Публикации

По результатам исследований опубликовано 14 печатных работ, из них: 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 11 — в прочих изданиях и сборниках трудов Международных и Всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка используемой литературы из 152 наименований и 5 приложений. Общий объём основной части составляет 161 страниц и включает 89 рисунков и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, обозначены научная новизна и практическая значимость результатов работы, а также положения, выносимые на защиту. Приведено краткое описание текущего уровня разработанности проблемы в литературе.

В первой главе диссертационной работы проведён обзор различных подходов к исследованию межслойных дефектов и процесса разрушения вследствие роста межслойных дефектов, методов экспериментальных исследований композитов с межслойными дефектами, а также подходов к моделированию расслоений в композитных пластинах методом конечных элементов. Выделены два основных подхода к моделированию процесса расслоения: метод виртуального закрытия трещины (*virtual crack closure technique, VCCT*) и модель когезионной зоны (*cohesive zone model, CZM*). Отмечено, что в литературе не представлено исчерпывающих экспериментальных данных о несущей способности элементов конструкций ЛА из композитных материалов в зависимости от параметров межслойного дефекта, во многих работах сравнение результатов расчёта приводится с ограниченным набором экспериментальных данных.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям композитов с межслойными дефектами.

В результате проведения натуральных испытаний в соответствии с ГОСТ Р 56815-2015 образцов в виде двойной консольной балки из препрега *Torayca T800* с

предварительно выполненным на конце расслоением, расположенным посередине толщины, определены значения вязкости разрушения G_{IC} для композита. Эскиз образцов с характерными геометрическими размерами показан на рисунке 1. Испытания проводились на испытательной установке *Instron 8801*. Вид образца в рабочем положении в машине до и после испытаний показан на рисунке 2.

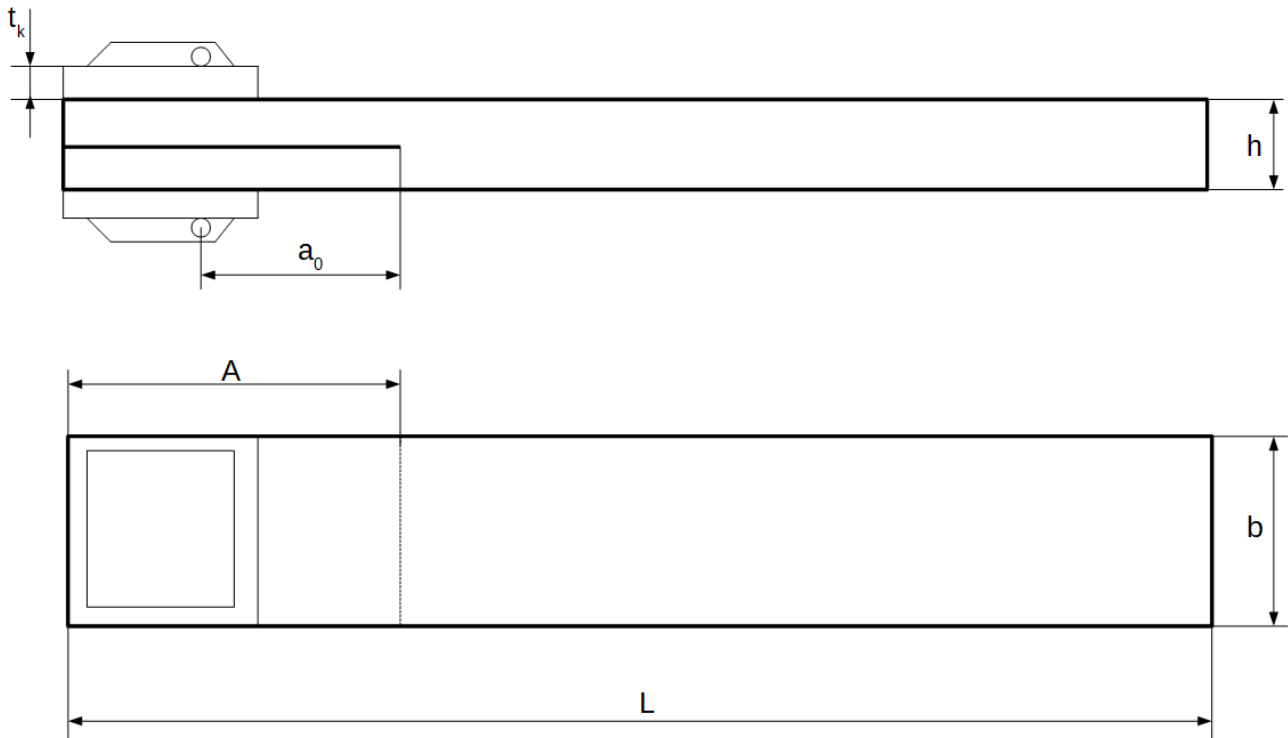


Рисунок 1 — Эскиз образца ДКБ с блоками нагружения

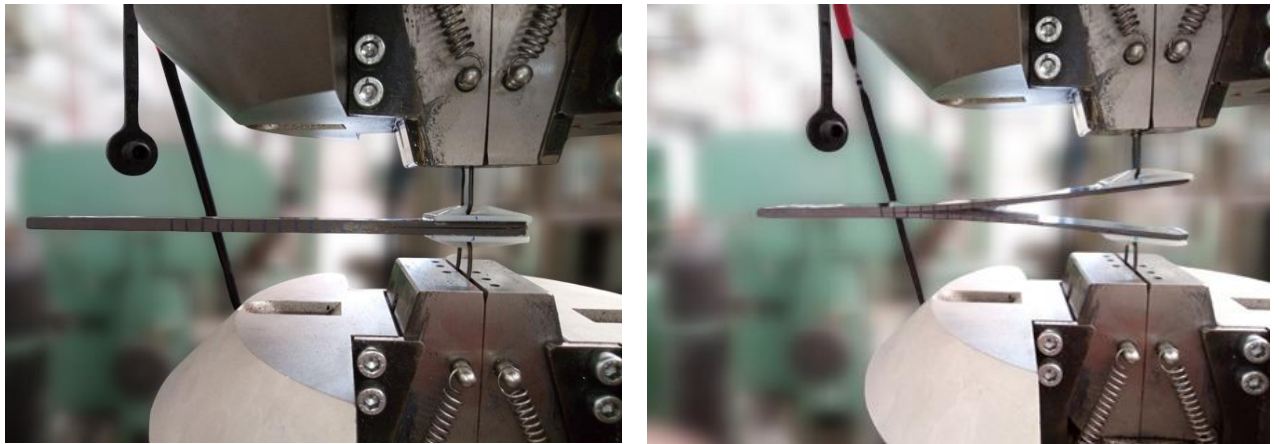


Рисунок 2 — Образец в испытательной машине *Instron 8801*

Первое, минимальное значение — вязкость разрушения страгивания $G_{IC}^{ini} = 0,031$ кгс/мм, которое соответствует началу распространения расслоения. Значение вязкости разрушения распространения $G_{IC}^{prop} = 0,065$ кгс/мм соответствует установившемуся процессу расслоения.

Испытания на базе СибНИА им. С. А. Чаплыгина полос на сжатие из препрега *Torayca T800* со сквозным непроклеем показали, что начало роста расслоения связано с локальной потерей устойчивости образца в зоне дефекта. Это согласуется с результатами испытаний, опубликованными в открытых источниках. После снятия

нагрузки образцы возвращались в исходную форму. Результаты экспериментальных испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты испытаний образцов-полос с дефектом в виде сквозного непрочлея

№.	b , мм	t_{ϕ} , мм	F_{ϕ} , мм ²	$P_{кр}$, кгс	P_{max} , кгс	$\sigma_{кр}$, кгс/мм ²	σ_{max} , кгс/мм ²
C-1	35,0	4,2	147,0	3950	4631	26,87	31,50
C-2	35,0	4,2	147,0	2200	4200	14,97	28,57
C-3	35,0	4,2	147,0	2900	4200	19,73	28,57
C-4	35,2	4,2	147,8	2600	4250	17,59	28,75
C-5	35,0	4,2	147,0	3300	4250	22,45	28,91
C-7	37,3	4,2	156,7	3000	4200	19,15	26,81
Среднее				2991	4288	20,12	28,85

Обозначения: b — ширина образца, t_{ϕ} — фактическая толщина, F_{ϕ} — фактическая площадь, $P_{кр}$, $\sigma_{кр}$ — нагрузка и напряжения начала расслоения, P_{max} , σ_{max} — нагрузка и напряжения, максимальные в испытаниях.

В процессе испытаний у части образцов фиксировалось, насколько вырос дефект в образце в процессе увеличения нагрузки (рисунок 3).

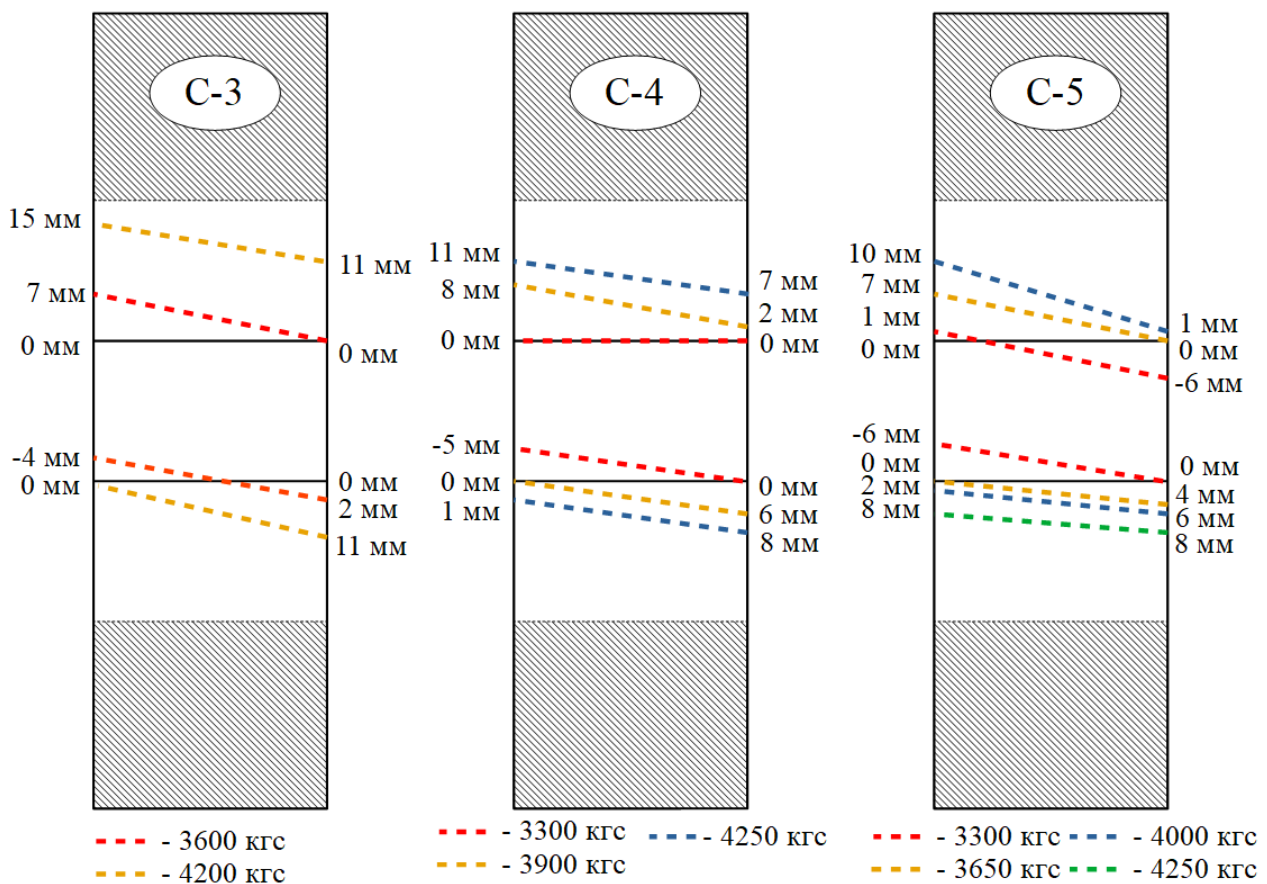


Рисунок 3 — Границы расслоений в образцах по итогам испытаний: числа вдоль торцов — длина, на которую увеличился соответствующий край дефекта; числа под образцами — значение приложенной сжимающей нагрузки

Неравномерный рост дефекта по ширине образца и его несимметричное развитие по длине можно связать с возможными неточностями проведения

испытаний. В их числе неравномерное зажатие образцов в гидрозавятах испытательной машины, возможный люфт штока, а также отклонение от идеального центрирования, что приводило к возникновению эксцентриситета при сжатии и, как следствие, к неравномерному распределению напряжений в зоне дефекта.

Проведены испытания на сжатие композитных образцов (О62.1 и О62.2) в виде пластины с предварительным дефектом в виде непрочной круглой формы. Материал образцов — препрег *АСМ-102С 130UD*. Углы армирования однонаправленных слоёв в градусах относительно продольной оси $[+45, -45, 0, 0, 90, 0, 0, +45, -45, 0, 0, 90, 0, 0, +45, -45, 0, 0, 0, 0, 45, +45, 0, 0, 90, 0, 0, 45, +45, 0, //, 0, 90, 0, 0, -45, +45]$, (дефект располагается между 6 и 7 слоем, обозначен символом «//»). Испытания были проведены на электромеханической машине *Instron 5985*, оснащённой предназначенными для приложения сжимающих нагрузок жёсткими параллельными платформами. Геометрические размеры образцов соответствуют требованиям стандарта испытаний композитных пластин на сжатие после удара *ASTM D7137/D7137M—07* и в процессе испытаний использовалась оснастка, соответствующая данному стандарту. При этом для образца реализуются следующие граничные условия: поперечные края пластин — жёсткое защемление, продольные края — шарнирное опирание. Эскиз образца представлен на рисунке 4.

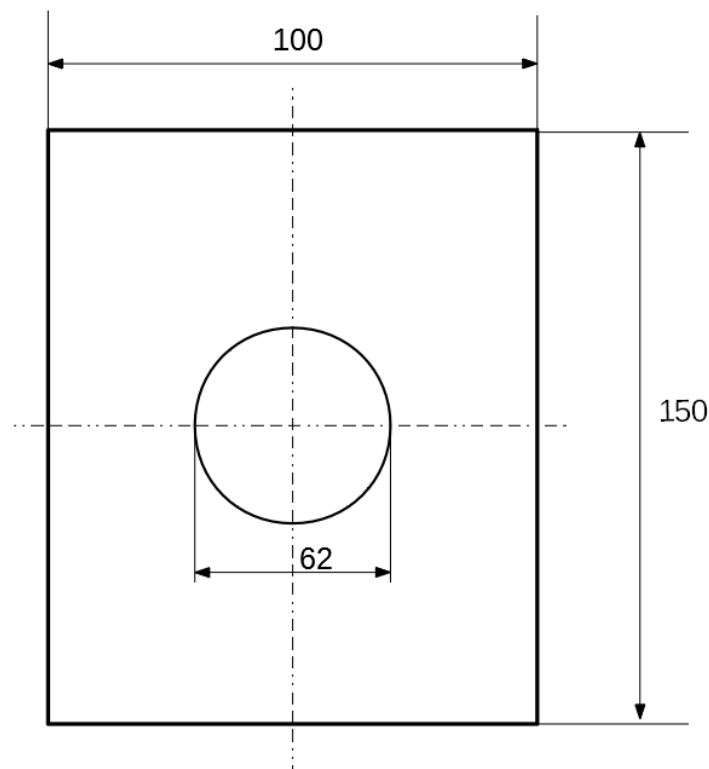


Рисунок 4 — Эскиз образца в виде пластины с предварительным дефектом

В процессе испытаний измерялись перемещения точек из плоскости образца в его середине (и, соответственно, в середине межслойного дефекта) с двух сторон: со стороны более тонкой области, соответствующей отслоившемуся слою, и со стороны более толстой части — основного пакета. Измерения проводились с помощью лазерных триангуляционных измерителей РФ603 90/100, работающих по принципу бесконтактного снятия перемещений. Схема размещения датчиков приведена на рисунке 5.

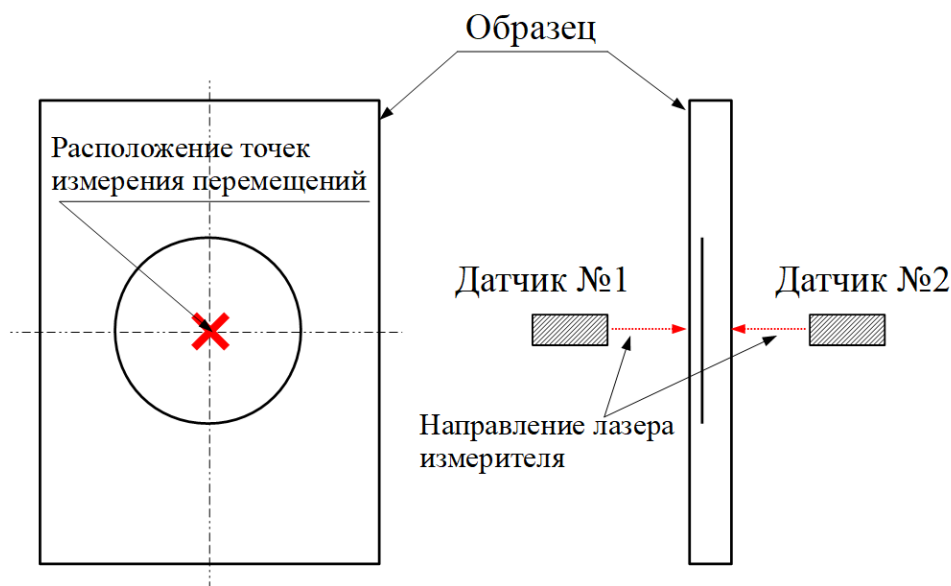


Рисунок 5 — Схема измерения перемещений точек образца из плоскости

Максимальная нагрузка для обоих образцов составила 14000 кгс. У обоих образцов визуально наблюдалось «выпучивание» (т. е. локальная потеря устойчивости) в зоне дефекта, а также рост зоны дефекта. После проведения испытаний с помощью прибора *Omniscan X3* с преобразователем *Olympus NDT 5L-64-NW1* с 64-элементной антенной фазированной решеткой установлены размеры зон межслойных дефектов.

Проведены испытания 50 композитных пластин (без дефекта и с дефектом в виде непроклея круглой формы) из препрега *ACM-102C 130UD* сжимающей нагрузкой до разрушения. Рассматривались образцы двух разных толщин: 34 и 20 монослоев. Для каждой толщины были добавлены круглые дефекты двух диаметров (30 мм и 62 мм). Укладки образцов, количество образцов, а также диаметр и расположение дефекта представлены в таблице 2. Последняя цифра в кодировке образцов с дефектом обозначает глубину залегания дефекта: 1 — близко к поверхности образца, 2 — посередине композитного пакета. Также для каждого типа обозначена относительная площадь дефекта $S_n = S_d/S$, где S_d — площадь дефекта, S — площадь образца, и относительная глубина расположения дефекта $A_n = n/N$, где n — количество слоёв от поверхности до расположения дефекта, N — количество слоёв в композитном пакете.

Испытания образцов проводились в электромеханической машине *Instron 5985*. Геометрические размеры образцов соответствуют требованиям стандарта испытаний композитных пластин на сжатие после удара *ASTM D7137/D7137M—07* и в процессе испытаний использовалась оснастка, соответствующая данному стандарту. В процессе испытаний измерялись перемещения из плоскости точек в середине образца (и, соответственно, в середине дефекта) с двух сторон образца с помощью измерителей лазерных триангуляционных РФ603-60/10. Для образцов ОД30.34.1.1, ОД30.34.1.2, ОД30.34.1.3, ОД62.34.1.1, ОД62.34.1.2 и ОД30.34.1.3 с использованием видеоэкстензометра получены поля перемещений точек поверхности образцов из плоскости в зависимости от нагрузки. В результате испытаний были получены разрушающие нагрузки испытанных образцов.

Таблица 2 — Образцы композитных пластин с круглым дефектом

Тип образца	Кол-во (шт.)	Диаметр дефекта, мм	Укладка (расположение дефекта обозначено символом «//»)	S_n	A_n
ОИЗ4	5	-	[+45,-45,0,90,0,0,+45,-45,0,0,90,0,0, +45,-45,0,0,0,0,-45,+45,0,0,90,0,0,-45, +45,0,0,90,0,-45,+45]	-	-
ОД30.34.1	5	30	[+45,-45,0,90,0,0,+45,-45,0,0,90,0,0, +45,-45,0,0,0,0,-45,+45,0,0,90,0,0,-45, +45,0,0,90,0,-45,+45]	0,061	0,15
ОД30.34.2	5	30	[+45,-45,0,90,0,0,+45,-45,0,0,90,0,0, +45,-45,0,0,0,0,-45,+45,0,0,90,0,0,-45,+45,0,0,90,0,-45,+45]	0,061	0,50
ОД62.34.1	5	62	[+45,-45,0,90,0,0,+45,-45,0,0,90,0,0, +45,-45,0,0,0,0,-45,+45,0,0,90,0,0,-45,+45,0,0,90,0,-45,+45]	0,260	0,15
ОД62.34.2	5	62	[+45,-45,0,90,0,0,+45,-45,0,0,90,0,0, +45,-45,0,0,0,0,-45,+45,0,0,90,0,0,-45,+45,0,0,90,0,-45,+45]	0,260	0,50
ОИ20	5	-	[+45,-45,0,90,0,90,0,+45,-45,0,0,-45,+45,0,90,0,90,0,-45,45]	-	-
ОД30.20.1	5	30	[+45,-45,0,90,0,90,0,+45,-45,0,0,-45,+45,0,90,0,90,0,0,-45,45]	0,061	0,15
ОД30.20.2	5	30	[+45,-45,0,90,0,90,0,+45,-45,0,0,-45,+45,0,90,0,90,0,0,-45,45]	0,061	0,50
ОД62.20.1	5	62	[+45,-45,0,90,0,90,0,+45,-45,0,0,-45,+45,0,90,0,90,0,0,-45,45]	0,260	0,15
ОД62.20.2	5	62	[+45,-45,0,90,0,90,0,+45,-45,0,0,-45,+45,0,90,0,90,0,0,-45,45]	0,260	0,50

В третьей главе выполнено численное моделирование проведённых испытаний методом конечных элементов. При сравнении с результатами испытаний на сжатие относительно толстых полос со сквозным непроклеем, наибольшую точность при определении критической нагрузки локальной потери устойчивости показали модели, выполненные с помощью трёхмерных конечных элементов (*SOLID185*). При сравнении с результатами испытаний на сжатие тонких пластин, наибольшая точность при определении критической нагрузки получена при послойном моделировании композитного пакета с помощью трёхмерных конечных элементов. Однако далее в работе для подобных пластин с межслойными дефектами решаются нелинейные задачи деформирования с учётом закритического поведения и роста дефекта, поэтому используются двумерные конечные элементы *SHELL181*. Показано, что использование двумерных конечных элементов с заданием им сечений с соответствующей укладкой значительно уменьшает время расчёта задачи при сохранении приемлемой точности решения.

Корректность методов *VCCT* и *CZM* рассматривалась при моделировании процесса расслоения образцов двойной консольной балки. Конечно-элементная модель реализована в программном комплексе *ANSYS*. Перемещения прикладывались

в противоположные стороны к краям балки с левого торца, где располагалось предварительное расслоение, жёсткая заделка реализовывалась с противоположного торца балки. На рисунке 6 представлены графики зависимости нагрузки P от перемещений U для образцов в виде двойной консольной балки ($G1-1-G1-8$), а также аналогичные графики, полученные с помощью конечно-элементного моделирования двумя методами, для $G_{IC}=G_{IC}^{ini}$ и $G_{IC}=G_{IC}^{prop}$.

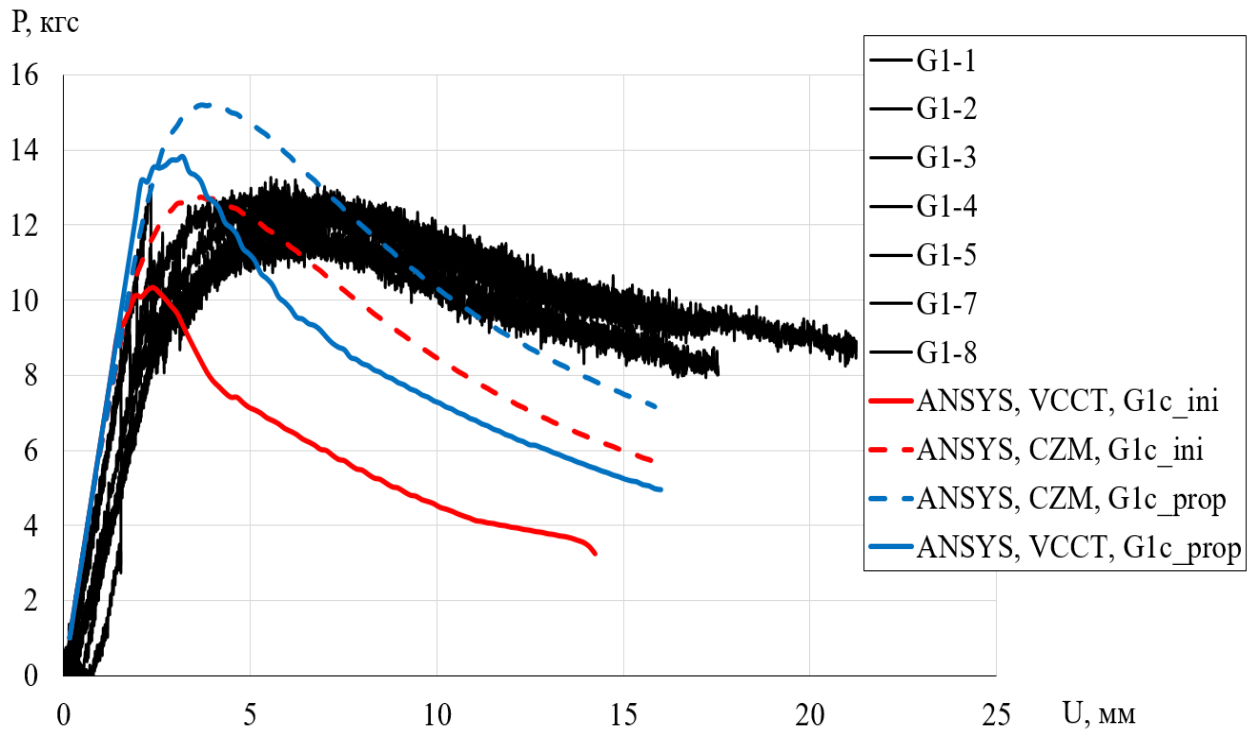


Рисунок 6 — Графики зависимости нагрузки P от перемещений U для двойной консольной балки

Определено, что методы $VCCT$ и CZM качественно моделируют процесс расслоения при испытаниях двойной консольной балки. Для обоих методов более точные результаты получаются при использовании вязкости разрушения распространения G_{IC}^{prop} . Наиболее близкой к кривым, полученным по результатам испытаний, получена кривая зависимости нагрузки от перемещений при использовании метода $VCCT$.

Проведено сравнение результатов испытаний полосы с дефектом в виде сквозного непрочлея на сжатие с результатами моделирования подобных испытаний с учётом локальной потери устойчивости, дальнейшего закритического поведения и роста дефекта. В конечно-элементном расчёте рост расслоения начинался не с момента потери устойчивости, как это было в испытаниях, а при несколько большей нагрузке, вследствие того, что при нелинейном статическом расчёте потеря устойчивости не происходит мгновенно, а перемещения из плоскости увеличиваются с ростом нагрузки, что далее приводит к росту дефекта. На рисунке 7 представлено сравнение площадей расслоения в зависимости от прикладываемой нагрузки, полученной в испытаниях для образцов С-3–С-5 с результатами, полученными с помощью конечно-элементного моделирования с использованием методов $VCCT$ и CZM для $G_{IC}=G_{IC}^{ini}$ и $G_{IC}=G_{IC}^{prop}$. Необходимо отметить, что в отличие от результатов испытаний, рост расслоения в конечно-элементном расчёте фиксировался равномерным по ширине образца и симметричным по длине.

Из результатов, представленных на рисунке 7, сделаны следующие выводы: 1) при моделировании процесса расслоения методом *VCCT* характер приращения площади дефекта ближе к полученному в ходе испытаний, чем при моделировании расслоения методом *CZM*; 2) средняя нагрузка, при которой величина площади межслойного дефекта в образцах достигает 1280 мм², составляет 4133 кгс, а для конечно-элементной модели, которая близко описывает характер процесса расслоения (метод *VCCT* с использованием вязкости межслойного разрушения страгивания G_{IC}^{ini}), величина площади межслойного дефекта достигает значения 1280 мм² при нагрузке 4850 кгс. Таким образом, разница в определении величины нагрузки, необходимой для роста сквозного межслойного дефекта до одной и той же величины составила 17%.

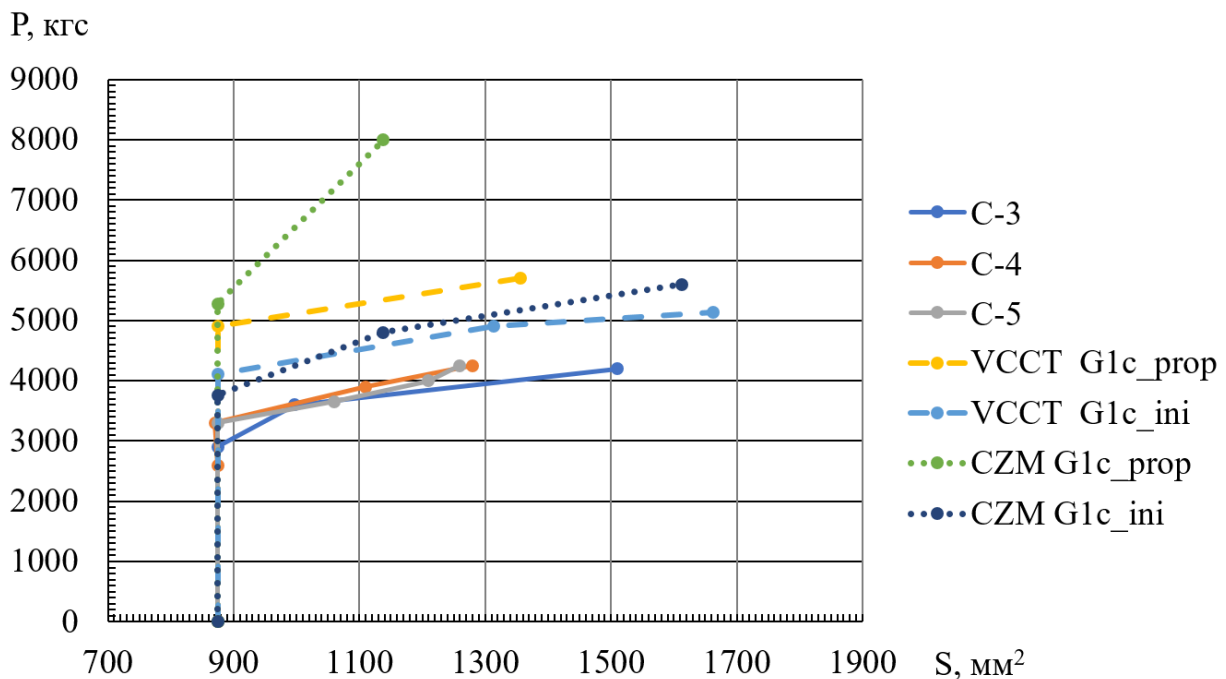


Рисунок 7 — Приращение площади расслоения в образцах в виде полосы со сквозным непроклеем при моделировании и испытаниях

Кроме того, нагрузки начала роста расслоения, полученные при $G_{IC} = G_{IC}^{ini}$ ближе к значениям, полученным в ходе испытаний, и для метода *VCCT*, и для метода *CZM*, что соответствует физическому смыслу данных величин.

Выполнено сравнение результатов моделирования пластины с дефектом в виде круглого непроклея на сжатие с учётом локальной потери устойчивости, дальнейшего закритического поведения и роста дефекта с результатами испытаний соответствующих образцов (Об2.1 и Об2.2). Проведено сравнение значений перемещений из плоскости центров отслоения (тонкой части) и основной (толстой) части образцов в зависимости от приложенной нагрузки, полученных по результатам испытаний, и аналогичных графиков, полученных по результатам моделирования (рисунок 8) в расчёте и при моделировании. Из рисунка 8 можно сделать следующие выводы: 1) использование G_{IC}^{ini} и G_{IC}^{prop} не влияет существенно на величину нагрузки потери устойчивости и характер закритического поведения конечно-элементной модели; 2) характер закритического поведения пластины с дефектом, полученный путем моделирования, согласуется с результатами натуральных испытаний; 3) разница между экспериментальными и расчетными величинами критической нагрузки

локальной потери устойчивости для образца О62.1 составила 31%, для образца О62.2 — 25%.

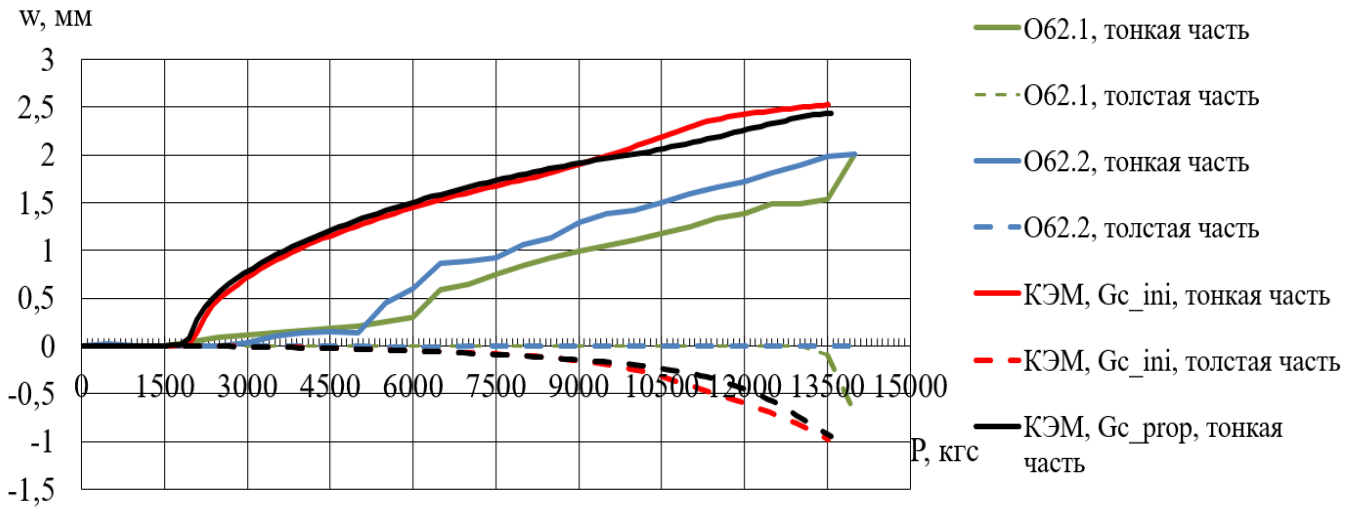


Рисунок 8 — Зависимости перемещений центров отслоения (тонкой части) и основной (толстой) части образцов О62.1 и О62.2 в зависимости от нагрузки

На рисунке 9 представлено сравнение зон роста межслойного дефекта, полученных по результатам испытаний для образца О62.1 (рисунок 9а) и образца О62.2 (рисунок 9б), с зонами роста расслоения, полученными из конечно-элементного моделирования при использовании параметров межслоевой вязкости разрушения G_{IC}^{ini} и G_{IC}^{prop} (рисунок 9в и 9г соответственно).

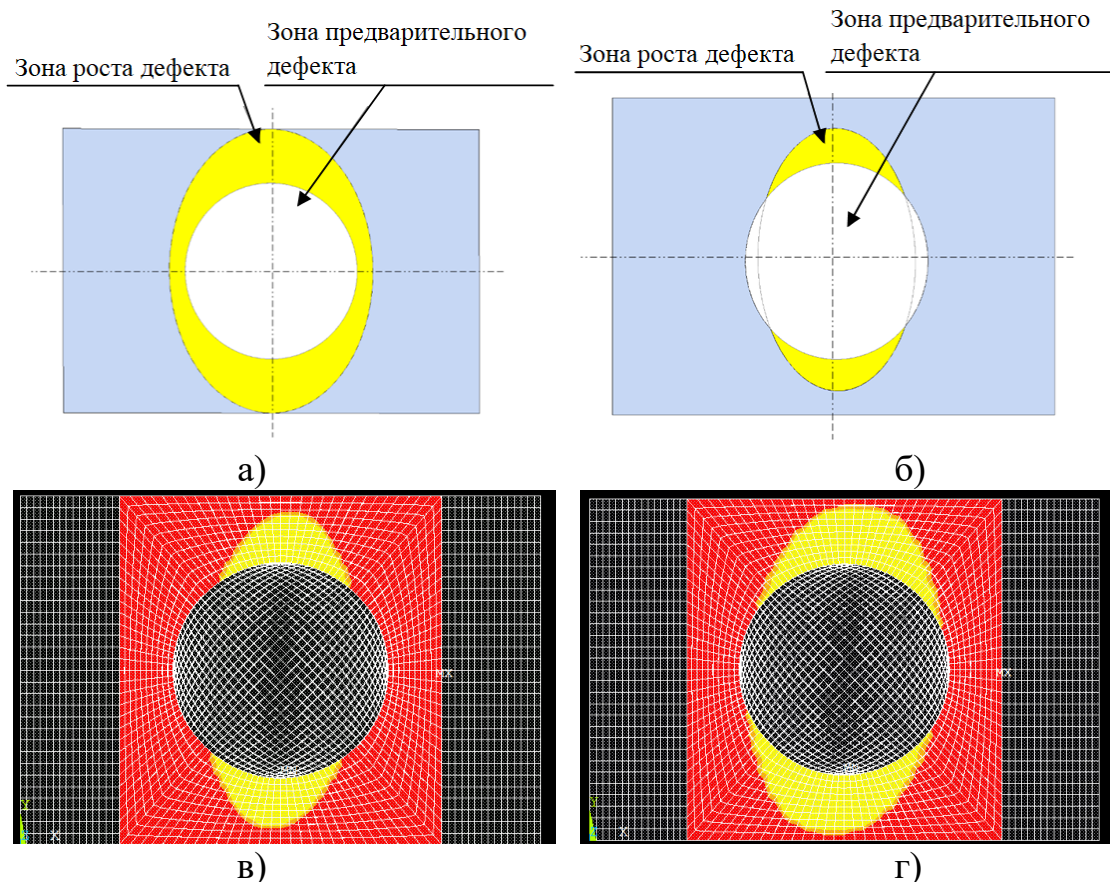


Рисунок 9 — Зоны роста межслойного дефекта, полученные по результатам испытаний: а) образец О62.1, б) образец О62.2; полученные с помощью конечно-элементного моделирования: в) с использованием G_{IC}^{ini} , г) с использованием G_{IC}^{prop}

Зоны роста расслоения из конечно-элементной модели соответствуют нагрузке 14000 кгс. Исходя из результатов, представленных на рисунке 9, можно сделать следующие выводы: 1) зоны роста расслоения у двух рассмотренных образцов (рисунок 9а и 9б) значительно отличаются; это может быть следствием затруднённости изготовления идентичных образцов из многослойного композита с предварительным дефектом; 2) при моделировании значение вязкости межслойного разрушения G значительно влияет на итоговый результат (рисунок 9в и 9г); 3) по итогам конечно-элементного моделирования процесса расслоения были получены результаты, качественно согласующиеся с экспериментальными данными.

Проведено сопоставление экспериментальных данных, полученных в процессе испытаний до разрушения образцов в виде пластины с круглым межслойным дефектом, с результатами моделирования. Выполнено сравнение данных о перемещении из плоскости, полученных с помощью измерителей лазерных (пример графиков перемещений представлен на рисунке 10), а также сравнение полей перемещений точек поверхности образцов из плоскости в зависимости от нагрузки (пример представлен на рисунке 11).

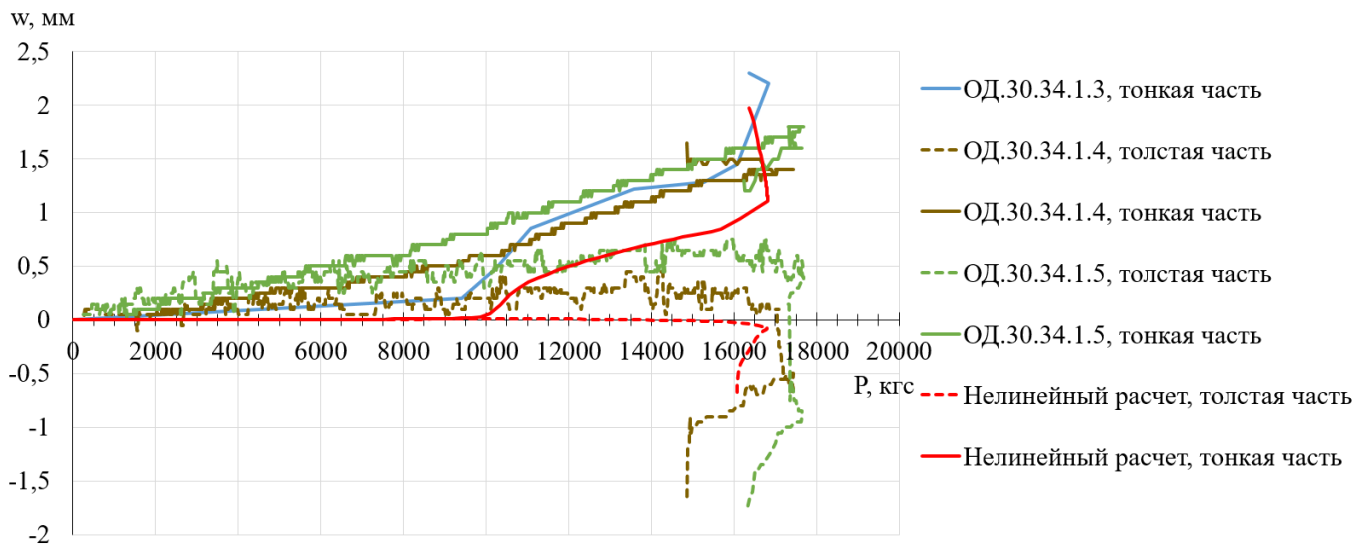


Рисунок 10 — Зависимости перемещений центров отслоения (тонкой части) и основной (толстой) части образцов ОД.30.34.1 в зависимости от нагрузки, полученные в испытаниях и при моделировании

Сравнение представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что поведение конечно-элементной модели с учётом потери устойчивости, закритического поведения и распространения дефекта соответствует поведению образцов в процессе испытаний.

Проведена оценка того, насколько данная конечно-элементная модель позволяет определить разрушающую нагрузку пластин с межслойным дефектом. Рассматривалось три механизма разрушения:

- потеря устойчивости толстой части образца после локальной потери устойчивости тонкой части образца, выражающаяся в резком падении нагрузки, при решении нелинейной задачи;
 - глобальная потеря устойчивости пластины как целого;
 - критерий максимальной интенсивности деформаций (в качестве деформации разрушения принята величина $\varepsilon_{ib} = 0,006$).

Для большинства типов образцов разница между экспериментальными и расчётными величинами разрушающей нагрузки не превышает 13%. Таким образом, была проведена валидация конечно-элементной модели композитной пластины с межслойным дефектом круглой формы, учитывающая её закритическое поведение и распространение дефекта под действием сжимающей нагрузки.

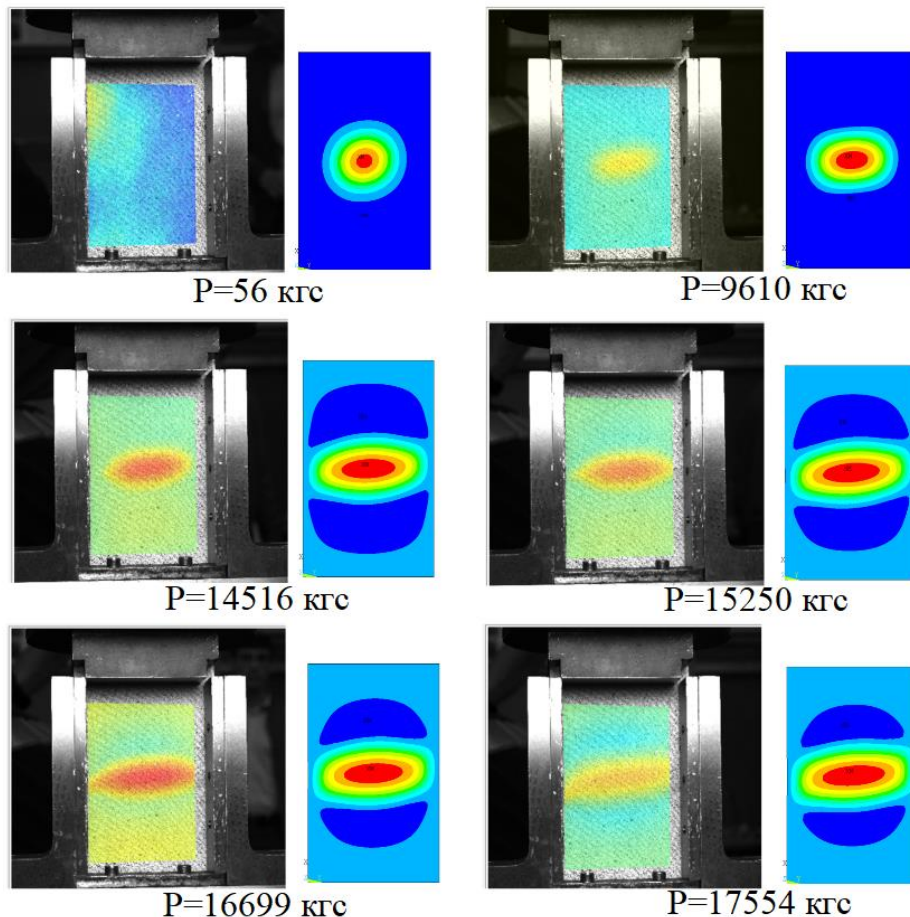


Рисунок 11 — Сравнение полей перемещений точек поверхности образца ОД62.34.1.2 из плоскости с полем перемещений из плоскости полученных с помощью КЭМ

Четвертая глава посвящена исследованию влияния межслойного дефекта на критическую нагрузку и несущую способность композитной пластины. Отмечается, что в зависимости от геометрических параметров межслойного дефекта S_n и A_n может возникнуть три типа первой формы потери устойчивости: локальная форма потери устойчивости в области дефекта, глобальная форма потери устойчивости пластины как целого и смешанная, или промежуточная форма потери устойчивости. Проведён анализ полученных автором экспериментальных данных о влиянии параметров межслойного дефекта на несущую способность композитной пластины под воздействием сжимающей нагрузки. Сделаны следующие выводы.

- Дефект, расположенный близко к поверхности образца, сильнее влияет на несущую способность более толстой пластины и оказывает меньшее влияние на несущую способность более тонкой пластины. Такие результаты могут быть связаны с тем, что более тонкие пластины за счёт меньшей толщины могут испытывать большие прогибы не разрушаясь. Прочность в таком случае обеспечивается основной, более толстой частью образца.

- Влияние межслойного дефекта, расположенного посередине толщины композитного пакета, на несущую способность пластин одинаковой толщины зависит от геометрических размеров дефекта: чем больше относительная площадь дефекта, тем больше снижается несущая способность.

- Для тонких пластин влияние межслойного дефекта на несущую способность пластины увеличивается с увеличением относительной глубины расположения.

С помощью валидированной конечно-элементной модели проведено численное параметрическое исследование влияния параметров межслойного дефекта на критическую нагрузку и несущую способность композитной пластины под воздействием сжимающей нагрузки. Сделаны следующие выводы.

- При расположении дефекта вблизи поверхности разрушение инициируется локальной потерей устойчивости в зоне дефекта с последующим вовлечением толстой части пластины. В этом случае наблюдается снижение несущей способности, которое практически не зависит от увеличения площади дефекта.

- При расположении дефекта на глубине около трети толщины пластины от поверхности наблюдается максимальная чувствительность конструкции к дефекту. В случае малого размера дефекта наблюдается форма потери устойчивости с одной полуволной и разрушение пластины происходит в результате потери устойчивости. В том случае, когда форма потери устойчивости смешанная, пластина плавно выходит из плоскости нагружения и разрушение происходит в закритическом состоянии по достижении максимальной интенсивности деформаций. В случае большого по размерам дефекта разрушение инициируется локальной потерей устойчивости в зоне дефекта с последующим вовлечением толстой части пластины. Для тонких пластин более характерна потеря устойчивости, приводящая к существенному снижению несущей способности.

- При расположении дефекта в середине толщины пластины доминирует глобальная форма потери устойчивости с одной или двумя полуволнами. В случае малого размера дефекта наблюдается форма потери устойчивости с одной полуволной и разрушение пластины происходит в результате потери устойчивости. С увеличением размера дефекта наблюдается форма потери устойчивости с двумя полуволнами, разрушение пластины происходит в закритическом состоянии по достижении максимальной интенсивности деформаций.

- Показано, что толщина пластины, помимо геометрических параметров дефекта, также является параметром, определяющим относительную несущую способность композитной пластины с межслойным дефектом. В случае, когда дефект расположен близко к поверхности пластины, влияние дефекта на несущую способность увеличивается с увеличением её толщины. Однако, когда межслойный дефект расположен достаточно глубоко по толщине пластины (от трети до половины толщины), его влияние на несущую способность увеличивается с уменьшением толщины пластины.

- Наиболее «опасным» случаем является случай, когда при достаточно малом размере дефекта он расположен достаточно глубоко по толщине композитной пластины, такой дефект может привести к значительному снижению несущей способности и разрушению из-за глобальной потери устойчивости пластины.

- Дефекты, вызывающие локальную потерю устойчивости, также значительно снижают несущую способность композитной пластины, особенно если это большой по размеру дефект, расположенный достаточно глубоко по толщине композитной пластины.

Результаты натуральных испытаний о влиянии межслойного дефекта на несущую способность композитной пластины и результаты численного параметрического исследования влияния параметров межслойного дефекта на несущую способность композитной пластины, выполненные с помощью параметрической конечно-элементной модели, валидированной по результатам этих испытаний, согласуются между собой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача оценки и исследования влияния межслойных дефектов на прочность и устойчивость композитных элементов конструкций летательных аппаратов.

1. В результате проведения натуральных испытаний образцов двойной консольной композитной балки экспериментально определены значения межслоевой вязкости разрушения G_{IC} для препрега *Torayca T800*. На основании полученных экспериментальных данных проведена оценка корректности подходов к моделированию процесса расслоения в рамках метода конечных элементов. Установлено, что методы *VCCT* и *CZM* достаточно точно моделируют процесс расслоения при испытаниях двойной консольной балки.

2. Проведены натурные испытания образцов, выполненных из многослойного углеродного материала, в виде полосы со сквозным непроклеем и пластины с круглым межслойным дефектом на сжатие. В процессе испытаний полосы со сквозным непроклеем рост межслойного дефекта фиксировался визуально на торцах полосы. Получены экспериментальные данные об увеличении площади межслойного дефекта в результате нагружения.

3. Построены параметрические конечно-элементные модели полосы с дефектом в виде сквозного непроклея и пластины с дефектом в виде круглого непроклея, учитывающих потерю устойчивости, закритическое поведение и рост дефекта. Проведено сравнение результатов испытаний на сжатие с результатами конечно-элементного моделирования. Для зон роста расслоения получено качественное соответствие результатов численного моделирования экспериментальным данным. Характер закритического поведения образцов имеет хорошее качественное совпадение с результатами моделирования.

4. Проведены испытания композитных пластин без дефекта и с дефектом в виде непроклея круглой формы из препрега *ACM-102C 130UD* сжимающей нагрузкой до разрушения. Получены экспериментальные данные о влиянии геометрических параметров межслойного дефекта на несущую способность композитной пластины.

5. Проведено сопоставление данных о перемещении из плоскости под действием сжимающей нагрузки до разрушения образцов, полученных в процессе испытаний с помощью измерителей лазерных триангуляционных и с использованием видеоэкстензометра, с перемещениями, полученными с помощью параметрической

конечно-элементной модели. Установлено, что поведение конечно-элементной модели соответствует поведению образцов в процессе испытаний.

6. Проведена валидация конечно-элементной модели относительно разрушающей нагрузки образцов. Для большинства типов образцов разница между экспериментальными и расчётными величинами разрушающей нагрузки не превышает 13%.

7. С использованием валидированной конечно-элементной модели проведены численные параметрические исследования влияния геометрических параметров межслойного дефекта на несущую способность композитной пластины. Получены зависимости разрушающей нагрузки пластины с межслойным дефектом от размеров дефекта, его расположения по толщине пластины и от толщины самой пластины.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы: необходимы дальнейшие натурные и численные испытания пластин и конструктивно-подобных образцов подкреплённых и трёхслойных панелей разного размера с межслойными дефектами различной формы и расположения, с учётом различных граничных условий с последующей оценкой корректности результатов конечно-элементного расчёта с использованием разработанной конечно-элементной модели.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Белоусов И.С. Моделирование испытаний на сжатие слоистых композитов с дефектами в виде расслоения / И.С. Белоусов, Л.П. Железнов, Т.В. Бурнышева // Вестник Московского авиационного института. — 2024. — Т. 31, №1. — С. 93-104

2. Белоусов И.С. Метод оценки расслоений в элементах многослойных композитных конструкций / И.С. Белоусов // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2024. — Т. 155, №11. — С. 14. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-11-2401

3. Белоусов И.С. Валидация моделирования процесса расслоения композитных панелей силовых элементов конструкций летательных аппаратов / И.С. Белоусов // Космические аппараты и технологии. — 2024. — Т. 8, № 4. — С. 211-221.

Другие публикации:

4. Белоусов И.С. Экспериментальное определение вязкости межслойного разрушения композитного материала / И.С. Белоусов, В.А. Беспалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2023. — Т. 89, №12 — С. 81 – 87.

5. Беспалов В. А., Бурнышева Т. В., Олегин И. П., Белоусов И. С. Численно-экспериментальный анализ влияния на прочность многослойных элементов конструкций дефектов типа расслоения // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сб. тр. 10 Всеросс. научн. конф. с межд. уч., Москва, 17–19.11.2020 г. — М.: ООО "Сам Полиграфист", 2020. — С. 69-73.

6. Белоусов И.С. Анализ влияния на прочность пластин из композиционных материалов дефектов типа расслоения // Наука. Технологии. Инновации: труды XXI всеросс. научно-техн. конф. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. — ч. 9 — С. 3-4.

7. Белоусов И. С., Беспалов В. А. Обзор существующих подходов к прогнозированию и моделированию расслоений в многослойных композитных

материалах // Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов: тезисы докл. школы-семинара СибНИА— Новосибирск: Изд-во СибНИА, 2021. — С. 11-12.

8. Белоусов И. С., Беспалов В. А. Моделирование процесса расслоения в композитных материалах // Проблемы прочности авиационных конструкций и матер.: тез. докл. школы-семинара СибНИА, Новосибирск: Изд-во СибНИА, 2021. — С. 7-8.

9. Белоусов И.С., Железнов Л.П., Бурнышева Т.В. Использование метода масштабированных конечных элементов для моделирования процесса расслоения в многослойных композитных материалах // Краевые задачи и математическое моделирование: темат. сб. науч. ст. — Новокузнецк: КГПИ КемГУ, 2023. С. 19-28.

10. Белоусов И.С., Железнов Л.П., Бурнышева Т.В., Олегин И.П. Применение метода масштабированных конечных элементов для решения задачи о расслоении композитной пластины // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сб. тр. 12 Всеросс. научн. конф. с межд. уч., Москва, 15–17.11.2022 г. — М.: ООО "Сам Полиграфист", 2022. — С. 51-62.

11. Белоусов И. С. Моделирование процесса расслоения в композитных материалах // Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов: тезисы докл. всеросс. научн.-практ. конф. — Новосибирск: Изд-во СибНИА, 2023. — С. 14.

12. Белоусов И.С. Исследование влияния геометрических параметров на устойчивость композитной пластины со сквозным непроклеем. // Наука Промышленность Оборона: труды XXIV Всеросс. научно-техн. конф. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. — Т. 1 — С. 6-17.

13. Белоусов И.С., Железнов Л.П., Бурнышева Т.В. Моделирование испытаний слоистых композитов с дефектами в виде расслоения // Авиация и Космонавтика: тез. 22 межд. конф., Москва, 20-24.11.2023 г. — Москва: Изд-во Перо, 2023. — С. 9-10.

14. Белоусов И.С., Железнов Л.П. Моделирование процесса расслоения в многослойных композитных материалах с помощью метода масштабированных конечных элементов // Прочность конструкций летательных аппаратов-2022: сб. ст. научн.-техн. конф. (тр. Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского), Москва, 8–12.12.2022 г. — Жуковский, ЦАГИ, 2023. — С. 18-24.

Отпечатано в типографии СибНИА

630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, д. 21/1. Тел./факс: 8(383)278-70-10.

Формат 60 × 84/16, объем 1,16 п.л., тираж 120 экз.

Заказ № 14-26, подписано в печать 27.04.2026 г.