

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

на диссертационную работу Белоусова Ильи Сергеевича «Влияние межслойных дефектов на прочность и устойчивость композитных элементов конструкций летательных аппаратов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

### **Актуальность темы диссертации**

В различных отраслях авиационной промышленности находят широкое применение элементы конструкций, выполненные из многослойных композиционных материалов (КМ). Такие материалы сами представляют конструкцию, поскольку при проектировании имеется возможность нужным образом сочетать полезные свойства отдельных слоев и получать материал, обеспечивающий высокую удельную жесткость и прочность изделия. Однако использование многослойных КМ требует учета присущих им специфических свойств, таких как возможность присутствия скрытых дефектов в виде нарушения сплошности материала по поверхностям раздела отдельных слоев (расслоений). К сожалению, расслоения являются распространенным видом дефекта, и достаточно часто это становится определяющим фактором возможности использования КМ. При обнаружении подобных дефектов в конструкции требуется принять решение о возможности их эксплуатации. Принятие таких решений весьма ответственно, поэтому разработку экспериментально-численных методов оценка влияния межслойных дефектов на несущую способность многослойных композиционных элементов конструкций летательных аппаратов можно считать задачей полезной и актуальной. В связи с этим актуальность диссертационной работы Белоусова И.С. не вызывает сомнений и является значительным вкладом в развитие экспериментально- численных методов исследования многослойных композиционных материалов с дефектами типа расслоений.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

В целом диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 152 наименований, общий объем работы составляет 161 страница и 4 приложения.

**Введение** диссертации посвящено обоснованию актуальности выбранной темы, рассмотрена степень разработанности темы исследования, традиционно сформулированы цель и задачи работы, представлены объекты и предмет исследования. Далее

сформулированы пункты, определяющие научную новизну, теоретическую и практическую значимость диссертационной работы, методологию и методы исследования, а также приведены основные положения, выносимые на защиту. Показано соответствие паспорту специальности.

Основные научные результаты изложены во второй, третьей и четвертой главах. Структура диссертации логично отражает последовательность решений поставленных соискателем задач, а именно экспериментальные исследования, численное моделирование и влияния межслойного дефекта на критическую нагрузку и несущую способность композитной пластины.

**Первая глава** носит обзорный характер, представлен обзор современных проблем и различных подходов исследования межслойных дефектов, процесса разрушения вследствие роста межслойных дефектов, методов экспериментальных исследований композитов с межслойными дефектами, моделирование расслоений в композитных пластинах методом конечных элементов. Центральное место в ней занимает раздел 1.3, в котором представлены экспериментальные исследования межслойных дефектов и их влияние на несущую способность элементов конструкций летательных аппаратов из композитных материалов. В разделе численных расчетов 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*).

**Во второй главе** представлены экспериментальные исследования с образцами в виде балок (полос) и пластин с разными по форме дефектами, проведенные автором на базе СибНИА им. С. А. Чаплыгина. Проведена серия экспериментальных работ с образцами двойной консольной балки из КМ для определения вязкости разрушения; с образцами полос из препрега Torayca T800 при сжатие со сквозным дефектом и без дефекта для определения локальной потери устойчивости дефекта. Представлена серия испытаний пластин с дефектом в виде круга.

**В третьей главе** диссертации для подтверждения экспериментальных исследований выполнено численное моделирование балок (полос) и пластин с межслойными дефектами методом конечных элементов. Автором предложено численное имитационное моделирование процессов локального деформирования, определения критической нагрузки и разрушения (подростание) межслойного локального дефекта в многослойных элементах конструкций.

**В четвертой главе** разработаны численные конечно-элементные модели многослойных композиционных пластин с разной укладкой волокон в слое. Приведены

численные исследования, для оценки влияния геометрических размеров и расположения по толщине пакета межслойного дефекта на критическую нагрузку и несущую способность композитной пластины.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы.

**Научные результаты** в диссертационной работе имеют широкий потенциал для применения в разделе науки - механика композиционных материалов, особенно результаты экспериментальных исследований. Поэтому необходимо отметить следующие новые результаты:

1. Получены новые экспериментальные данные по влиянию межслойных дефектов на несущую способность многослойных композиционных элементов конструкций при нагрузке.
2. Разработана и экспериментально подтверждена новая численная параметрическая модель многослойной композитной пластины с межслойным дефектом, позволяющая прогнозировать процесс расслоения и определения несущей способности пластины.
3. Получены новые результаты влияния параметров межслойного дефекта на критическую нагрузку и несущую способность композитных пластин при одноосном сжимающем воздействии.

**Достоверность и обоснованность** основных положений и выводов диссертационной работы основаны на общих подходах и методах исследований механики композиционных материалов и устойчивости тонкостенных элементов конструкций, использование современного оборудования для проведения экспериментальных работ и программных средств конечно-элементного моделирования, а также сопоставление результатов моделирования с результатами экспериментов.

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.

Основные результаты диссертационной работы опубликовано в 14 печатных работах, 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.

**Замечания по диссертации.** По содержанию диссертации можно поставить некоторые вопросы и сделать следующие замечания:

1) Одно из основных замечаний, работа написана очень не аккуратно, с множеством не допустимых ошибок в обозначениях: перемещения обозначены по разному при одинаковом значении ( $U$ ,  $w$ ); обозначение образцов совершенно не понятно и затруднительно для восприятия; нумерация рисунков не верная (стр.106); введено понятие вязкость разрушения без объяснения; «исследование сходимости критической нагрузки в зависимости от размера конечного элемента» (стр. 78) - есть понятие сходимость метода для определения критической нагрузки; метод SBFEM (стр. 104), «Несущая способность относительно пластины без дефекта, %» (стр.111) без пояснения и т.д.

2) В работе достаточно подробно представлены иллюстрированные графики, таблицы, но к сожалению графики перегружены и практически не понятны (рис.2.24, 2.31, 3.13 и другие) и таблицы представлены без должного анализа полученного материала, например автор поясняет «определяет нагрузку по графику зависимости нагрузки  $P$  от перемещения  $U$ » (стр.49), но в таблице 2.7 представлены только значения нагрузки при которой балка теряет устойчивость.

3) В работе использована шкала в единицах МКГСС, которую используют в основном на промышленных предприятиях, например кгс, кгс/мм<sup>2</sup> (таблицы 2.5, 2.6 и далее в тексте). С введением Международной системы единиц (СИ) система МКГСС утратила своё значение, тем более в научных работах (Н, МПа).

4) Эксперименты проведены с пластинами с дефектами и без дефектов. Совершенно не понятно, зачем проводили испытания образцов без дефекта (раздел 2.3)? Нет никаких выводов и сравнений.

5) Во второй главе три раздела 3.1-3.3 отведены на выбор конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Не понятна цель таких подробных описаний встроенных конечных элементов.

6) Третья и четвертая глава диссертационной работы посвящена численному моделированию элементов конструкций с межслойными дефектами в системе ANSYS. Одним из важных исследований межслойных дефектов – определение допустимых дефектов. К сожалению, в работе ничего не сказано о критериях допустимости дефектов.

7) На стр. 113 приведены «решения задачи устойчивости  $P_{кр}^{лин}$  и полученная по результатам решения нелинейной статической задачи  $P_{кр}^{нелин}$ ». Автору следовало бы более подробно прокомментировать получение этих результатов.

### **Заключение**

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и имеют рекомендательный характер. Диссертация представляет собой законченную научно -

квалификационную работу, посвященную исследованию на прочность и устойчивость композитных элементов конструкций летательных аппаратов с межслойными дефектами. Автореферат диссертации в целом правильно и полно отражает ее содержание.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Белоусов Илья Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Профессор кафедры «Информационные технологии и прикладная механика»  
ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»

Доктор технических наук по специальностям:

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Бохоева Любовь Александровна

Контактные данные:


Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», Российская Федерация, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1.

Тел.: +7 (964) 400-26-15, E-mail: bohoeva@yandex.ru, сайт: <https://www.esstu.ru>

Даю согласие на обработку указанных в отзыве персональных данных

Подпись д.т.н., проф. Бохо

Дата 03.06.2026

Поступил в совет 15.06.2026 

Согласован с коллегами 18.06.2026   
Белоусов И.С.