

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Ле Вьет Туана

«Расчётная оценка повреждаемости композитных авиационных панелей при множественном низкоскоростном ударе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Диссертационная работа Ле Вьет Туана посвящена проблеме обеспечения прочности авиационных конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия неблагоприятных погодных факторов – твёрдых осадков.

Повреждения, вызванные ударными воздействиями частиц града и других низкоскоростных твёрдых частиц (в том числе – частиц грунта при эксплуатации летательных аппаратов с грунтовых взлётно-посадочных полос), в композитных конструкциях вызывают более опасные последствия и труднее диагностируются, чем в традиционных металлических конструкциях. Опасность дефекта при дальнейшей эксплуатации зависит не только от параметров воздействий, но и от структуры композиционного материала, и в силу качественного разнообразия таких материалов в авиационных конструкциях изучена недостаточно полно. Этим определяется **актуальность** диссертации.

**Содержание работы.** Диссертация общим объемом 231 страница включает 153 страницы основного текста, список литературы и приложения. Содержит 96 рисунков и 69 таблиц, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 141 наименования и 7 приложений. Диссертация оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011. Содержание диссертации изложено логично, соблюдено единство стиля и оформления. Материалы исследований представлены и иллюстрированы в достаточном объеме.

**Во введении** отражена актуальность темы диссертационной работы, представлена основная характеристика работы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, практическая значимость результатов и приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор известных результатов в области обеспечения прочности авиационных конструкций при ударных воздействиях, изложены современные методы анализа контактных взаимодействий конструкции с воздействующими телами. Анализируются

особенности разрушения при ударе слоистых конструкций из волокнистых полимерных материалов и известные критерии разрушения, применимые к слоистым композитам. Приведен обзор существующих программных продуктов, используемых в прочностных расчётах конструкций, и реализованных в них моделей ударного взаимодействия.

**Во второй главе** разработана теоретическая цифровая модель микроструктурных напряжений при контакте многослойного волокнистого композита со сферическим индентором. Проведен параметрический анализ контактного взаимодействия при варьировании радиуса индентора и схемы армирования многослойной пластины. Рассчитаны зоны повреждений по критериям Хоффмана, Цая-Ву, Цая-Хилла и Галилея-Лейбница (максимального напряжения). Результаты сопоставлены с известными экспериментальными данными – фотограмметрией повреждения слоёв стеклоэпоксидного композита, армированного тканью, при сопоставимых условиях. Установлено согласование расчётных и экспериментальных результатов.

**В третьей главе** решается контактная задача взаимодействия частицы града с композитной пластиной с учётом изгибных колебаний пластины, испытывающей удар. Конкретизировано математическое описание свойств ударяющей частицы на основе двух моделей деформирования – линейно-упругой и упруго-пластической. Моделирование процесса разрушения пластины основано на результатах главы 2. Получено достаточное согласование результатов численного расчёта с данными эксперимента на баллистической установке.

**Четвёртая глава** содержит описание методики и результатов экспериментального исследования образцов льда на одноосное сжатие, проведенных для обоснования выбора модели деформирования ударяющих частиц, и разрушения композитных панелей при ударах ледяных частиц со скоростями порядка 100-170 м/с. Состояние пластин после удара оценивалось методом ультразвуковой дефектоскопии. Получена оценка порогового значения энергии ударяющей частицы, превышение которого приводит к повреждению. В завершение главы приведено сравнение результатов эксперимента и численных результатов, рассчитанных для условий, близких к условиям эксперимента, и результаты расчёта повреждений элементов конструкций криволинейной формы – обшивки крыла на передней кромке. В результате комплексного расчётно-экспериментального исследования выявлены особенности распределения повреждений по слоям обшивки.

**В заключении** сформулированы основные результаты выполненного исследования, выводы по работе и перспективы дальнейшей разработки темы. **В приложения** вынесены данные вспомогательного характера, представленные в виде таблиц, графиков и диаграмм, а также сведения об использовании результатов в промышленности и в образовательном процессе.

Работа написана ясным языком с использованием профессиональной терминологии и качественно оформлена.

**Оценка научной новизны, достоверности и практической значимости результатов.**

**Наиболее существенным результатом** диссертации является разработка методики прогнозирования ударной и абразивной прочности конструкций планера самолёта при воздействии ледяных частиц с учётом их деформативных свойств, охватывающей определение физико-механических свойств воздействующих частиц, расчёт деформирования элементов конструкций при ударном воздействии и расчёт разрушения композиционного материала на микроструктурном уровне.

Следующие результаты работы обладают **научной новизной**:

- 1) экспериментально определены физико-механические свойства частиц льда (града) – эффективный модуль упругости при различных скоростях деформации, что существенно для построения модели контактного взаимодействия частиц с элементом конструкции;
- 2) разработана численная модель контактного взаимодействия частиц льда с волокнистым композиционным материалом, позволяющая получать расчётные оценки деформаций композитных конструкций, напряжения в материале с учётом его микронеоднородности и определять зоны повреждения материала при множественном ударе;
- 3) расчётным и экспериментальным путём определены пороговая скорость и пороговая энергия воздействующих частиц, превышение которых приводит к повреждению панели крыла транспортного самолёта;
- 4) выявлено различие степени и виды повреждения слоёв многослойной композитной панели по мере удаления от внешней поверхности, контактирующей с ударяющими частицами.

**Практическая ценность диссертации** заключается в возможности применения результатов для обоснованного выбора конструкторских решений, направленных на уменьшение опасности повреждения конструкций планера самолёта при попадании в град. Практическая значимость диссертации подтверждена двумя актами об использовании в работах ФАУ

«СибНИА им. С.А. Чаплыгина» и Новосибирского государственного технического университета.

**Степень обоснованности выводов и рекомендаций.** Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректным применением апробированных методов и постановок задач механики конструкций и механики композиционных материалов и подтверждается согласованием теоретических результатов с результатами физических экспериментов, в том числе – экспериментов, выполненных автором, с использованием современных экспериментальных методов и сертифицированного оборудования.

Автореферат даёт достаточно полное представление о диссертации. Основные положения и результаты исследования опубликованы в 7 научных статьях, в том числе в 2 изданиях, рекомендованных ВАК.

В качестве **замечаний** необходимо отметить следующее.

1. Недостаточно освещены вопросы экономичности расчёта, в частности, не приведены дополнительные затраты вычислительных ресурсов при моделировании воздействия частиц льда методом гидродинамики сглаженных частиц. Целесообразность его использования для крупногабаритных конструкций при большом числе частиц требует дополнительного обоснования.

2. В главе 3 неясен критерий перехода льда от хрупкого состояния к пластическому. Каким образом учитывается вязкость льда при температурах, близких к таянию?

3. На стр. 86 предлагается использовать явное интегрирование по времени уравнений движения частиц льда, однако использование неявной схемы позволило бы дополнительно уменьшить число итераций при интегрировании.

4. В главе 5 разрушение композиционного материала, в частности – расслоение, определяется по критерию Мизеса, хотя для хрупких анизотропных материалов существуют более совершенные критерии. Чем обоснован выбор именно этого критерия?

5. Представляется целесообразным в дальнейшем развитии темы дополнить анализ повреждённости материала оценкой остаточной прочности конструкции при эксплуатационных воздействиях.

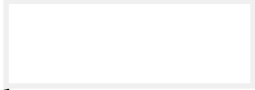
Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают оценку научной и практической значимости проведенного исследования, направленного на разработку расчетно-экспериментальных методов обеспечения статической прочности авиационных конструкций из

композиционных материалов и подтверждённого результатами вычислительного и физического эксперимента, и носят характер рекомендаций к дальнейшим исследованиям.

### Заключение

Оценивая работу в целом, следует отметить ее высокий научный уровень, обоснованность решений, доказательность изложения их в тексте диссертации, актуальность и ценность результатов, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Диссертация Ле Вьет Туана «Расчётная оценка повреждаемости композитных авиационных панелей при множественном низкоскоростном ударе» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача расчётно-теоретической и экспериментальной оценки повреждаемости композитных элементов конструкций при воздействии частиц льда (града), имеющая существенное значение для обеспечения прочности объектов авиационной техники. Тем самым диссертационная работа соответствует критериям раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции. Автор работы, Ле Вьет Туан, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент,  10.06.2024  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий научно-исследовательской лабораторией  
математического моделирования  
Кузбасского гуманитарно-педагогического института  
Кемеровского государственного университета,  
Каледин Валерий Олегович

Кузбасский гуманитарно-педагогический институт федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет»

Юридический адрес:

650003, г. Кемерово, ул. Красная, 6;

(3842)58-12-26;

rector@kemsu.ru; www.kemsu.ru

Почтовый адрес:

654041, г. Новокузнецк, ул. Циолковского, д. 23;



(3843)77-60-54;

khpi@khpi.ru; https://кгпи.рф

Подтверждаю согласие на включение в аттестационное дело и обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации Ле Вьет Туана.

Подпись д.т.н., профессора Кале  
Начальник кадровой службы

Е.А. Гардер

Получил в совет 18.06.2024  Гардер Е.А.  
С отзывом ознакомлен 18.06.2024  Ле Вьет Туан