

В диссертационный совет 24.2.327.09  
на базе ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»  
(125993, г. Москва, Волоколамское  
шоссе, д. 4)

**Отзыв официального оппонента  
на диссертационную работу Волкова Антона Николаевича  
«Моделирование и расчет сложных трехслойных конструкций с  
дискретным заполнителем», представленную на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность  
и тепловые режимы летательных аппаратов**

**Актуальность темы выполненной работы.** Диссертация А. Н. Волкова посвящена расчету трехслойных конструкций с конусообразным дискретным заполнителем. Заполнитель дискретной структуры является промежуточным звеном между сотовыми и ферменными заполнителями, обеспечивая необходимую сдвиговую жесткость при малом удельном весе конструкции. Данный тип заполнителя обладает рядом преимуществ по сравнению с наиболее распространенными заполнителями в виде сот, гофр, вспененных материалов – в частности, форма ячеек данного заполнителя позволяет изготавливать конструкции сложной формы и эффективно отводить конденсат из внутреннего пространства панели. Также данный тип заполнителя достаточно прост в изготовлении. Вместе с этим, вопрос определения эффективных механических свойств данного заполнителя и панелей на его основе, остается малоисследованным. В связи с этим, диссертация А. Н. Волкова представляется выполненной на актуальную и важную в теоретическом и прикладном отношении тему.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

4. 12 2022

## **Структура и объем работы.**

Структура работы отражает перечень задач, решенных в работе.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и перечень задач, которые необходимо решить для ее достижения, описана научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации результатов и публикациях по теме работы.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней автором приводится информация о классификации заполнителей в трехслойных конструкциях, рассматриваются различные формы ячеек заполнителей, проанализирован обширный список работ, посвященных прочности и устойчивости трехслойных конструкций включая основные расчетные модели, типичные формы разрушения трехслойных конструкций, а также методы их проектирования. В разделе 1.1 приведены общие сведения о слоистых конструкциях с легкими заполнителями. В разделе 1.2 приведен анализ работ, посвященных исследованию прочностных параметров многослойных панелей с заполнителями с учетом технологических особенностей изготовления и условий эксплуатации. В разделе 1.3 рассматриваются различные методы по расчету конструкций с лёгкими заполнителями. В разделе 1.4 ставятся задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена расчету типовых ячеек трехслойной конструкции с конусообразным заполнителем. В разделе 2.1 описаны геометрические параметры заполнителя и получены геометрические соотношения, определяющие форму ячейки. Проведен анализ влияния параметров типовой ячейки трехслойной панели с конусообразным заполнителем на характер ее деформирования под действием равномерного давления. В разделе 2.2 описан предлагаемый автором подход к расчету трехслойных панелей с конусообразным заполнителем. Рассмотрено два подхода к определению напряженно-деформированного состояния пластины. Первый подход предполагает следующие гипотезы: обшивки являются тонкими и воспринимают растяжение-сжатие и сдвиг в плоскости, а заполнитель является

несжимаемым в поперечном направлении и работает на поперечный сдвиг. В основе второго подхода лежит теория изгиба пластин средней толщины Миндлина – Рейсснера. Оба подхода предполагают использование эффективных упругих свойств заполнителя. Далее автором рассмотрены специфические для конструкций с дискретным заполнителем формы разрушения – местная потеря устойчивости обшивки и отрыв заполнителя от обшивки и получены критерии прочности панели, соответствующие данным формам разрушения.

В **третьей главе** представлены методы определения приведенных геометрических и упругих параметров ячеистого конусообразного заполнителя и для трехслойных панелей на его основе. В разделе 3.1 получены аналитические выражения для определения его цилиндрической жесткости как функции, зависящей от продольной координаты. В разделе 3.2.1 рассмотрено определение приведенной толщины трехслойной панели с конусообразным заполнителем. В разделе 3.2.2 рассмотрен метод определения эффективной сдвиговой жесткости заполнителя путем проведения физических или виртуальных испытаний элемента панели на трехточечный изгиб. В разделе 3.2.3 приведены аналитические соотношения, позволяющие определить эффективные характеристики заполнителя и проведено их сравнение с результатами численного эксперимента, полученными по методу, представленному в разделе 3.2.2. В разделе 3.3 проведено сравнение аналитических методов расчета пластин путем сравнения их с численным решением методом конечных элементов. Установлено, что наиболее близкие результаты достигаются при использовании метода расчета трехслойных пластин Григолюка – Чулкова.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию процесса деформирования трехслойной конструкции с конусообразным заполнителем. Изготовлены экспериментальные образцы трехслойной пластины и проведены испытания на изгиб и сжатие по толщине образца. Результаты испытаний на изгиб сравниваются с численным расчетом и аналитическими расчетами по

различным методам, а результаты испытаний на сжатие – с аналитическими результатами согласно выражениям, приведенным в главе 3. Результаты расчетов с достаточной для инженерных расчетов точностью соответствуют результатам испытаний.

В заключении сформулированы выводы по работе.

#### **Научная новизна полученных в работе результатов.**

В диссертации получены следующие основные новые научные результаты.

1. Предложены методы определения эффективных упругих и геометрических параметров трехслойной конструкции с конусообразным дискретным заполнителем.
2. Получены новые аналитические выражения для функции цилиндрической жесткости конусообразного дискретного заполнителя.
3. Установлены особенности деформирования конусообразного дискретного заполнителя и обшивок панели с данным заполнителем, что позволило предложить методы расчета местной потери устойчивости обшивок панели.
4. Получены экспериментальные данные о жесткостных характеристиках трехслойных панелей с конусообразным дискретным заполнителем.

**Теоретическая значимость исследования** заключается в разработке методов определения приведенных упругих свойств конусообразного дискретного заполнителя, на основе физических параметров исходного материала и геометрии типовой ячейки; рассмотренных методах моделирования и расчета трехслойных конструкций с дискретным заполнителем.

**Практическая значимость работы** заключается в проведенном сравнительном анализе методов расчета напряженно-деформированного состояния трехслойных пластин с конусообразным дискретным заполнителем, позволившим выбрать наиболее точный метод расчета, полученных критериях несущей способности панели, учитывающих особенности деформирования панели с дискретным заполнителем – возможность местной потери устойчивости и отрыв заполнителя от обшивки. Основные результаты диссертационной работы могут применяться при аналитическом и численном

расчете трехслойных конструкций с дискретным конусообразным наполнителем. Благодаря установленным зависимостям упругих эквивалентных характеристик от различных параметров конусообразного дискретного наполнителя значительно облегчается проведение расчетов конструкций, основанных на принципе гомогенизации структуры наполнителя.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается сравнением аналитических результатов математического моделирования с результатами, полученными численными методами (методом конечных элементов) и с экспериментальными данными. При этом перед выполнением серии экспериментов схема закрепления и нагружения образцов и соответствующая испытательная оснастка были верифицированы путем проведения модельных испытаний тонкой пластины.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены в докладах на четырех международных конференциях и семинаре.

**Основные результаты опубликованы** в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ; 2 статьях в журналах, индексируемых в международной базе SCOPUS. Также автором получено 2 патента на изобретения.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 2.5.14 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

По содержанию диссертации имеются некоторые **замечания**:

1. В разделе 3.3 рассмотрено определение переменной цилиндрической жесткости наполнителя, хотя ранее в разделе 2.2 автор указывает на нерациональность подхода к расчету пластины с применением уравнений изгиба пластин переменной жесткости, так как это приводит к значительным вычислительным трудностям и не позволяет учесть эффекты поперечного сдвига.

2. В работе имеется ряд неточностей и редакционных недостатков, из-за чего ее достаточно сложно читать, в частности:

2.1. В разделе 2.1 при описании геометрических параметров наполнителя

был бы уместен рисунок.

2.2. В разделе 2.1.5 указано, что в таблице 2.5 приведены результаты для различного радиуса кривизны пластины  $R$ , но фактически представлены данные в зависимости от кривизны  $k$  – обратной к  $R$  величины.

2.3. В разделе 3.2.1 имеется ссылка на подраздел второй главы «Приближенный метод», однако такого раздела в второй главе нет и здесь имеется в виду раздел 3.2.1, посвященный определению приведенной толщины пластины.

2.4 В разделе 3.3 при сравнении результатов расчета при помощи различных методов отсутствуют ссылки на разделы в работе, где описаны данные методы, или на формулы, согласно которым проводились расчеты. Имеются только ссылки на источники в списке литературы, но для результата с номером 2, соответствующего методу Григолюка-Чулкова, указана ссылка [47], хотя этот метод описан не в этой работе, а в [96].

3. В ходе проведенных испытаний пластин определялись только жесткостные характеристики, а вопросы несущей способности остались незатронутыми. В частности, не проводилось экспериментальное исследование поведения пластины при характерных для дискретного заполнителя формах разрушения, таких как местная потеря устойчивости и отрыв заполнителя от обшивки.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и могут быть учтены автором при проведении дальнейших исследований.

### **Заключение.**

В целом работа А. Н. Волкова выполнена на актуальную и практически важную тему, содержит новые результаты, обладающие теоретической и прикладной ценностью. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 – п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (в

редакциях от 21.04.2016 №335 и 12.10.2018 №1168), а ее автор, Волков Антон Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент, главный научный сотрудник АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», доктор технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов



Азаров Андрей Валерьевич

27.11.2023

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения». Адрес: Россия, 141371, Московская область, Сергиево-Посадский г.о., г. Хотьково, ул. Заводская, д.34. Телефон: +7 495 993-00-11, Факс: +7 496 543-82-94, e-mail: [tsniism@tsniism.ru](mailto:tsniism@tsniism.ru)

Подпись Азарова Андрея Валерьевича заверяю

Секретарь НТС АО «ЦНИИСМ»



Г. В. Краснова

с отзывом ознакомлен

04.12.23



Волков С.М.