

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Котовича Ильи Всеволодовича

«Метод расчета напряжённо-деформированного состояния трёхслойных панелей с нерегулярной сотовой структурой для обеспечения прочности несущих поверхностей объектов авиационной техники»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

В современном авиастроении всё более широкое применение находят лёгкие и высокоэффективные конструкции, среди которых особое место занимают трёхслойные панели с сотовым заполнителем. Они позволяют значительно снизить массу конструкции при сохранении высокой жёсткости и достаточной несущей способности, что особенно важно для несущих поверхностей летательных аппаратов, где критичны как прочностные, так и массогабаритные характеристики, что подтверждает актуальность темы диссертационной работы.

Однако традиционные подходы к проектированию таких конструкций предполагают регулярность геометрии сотового заполнителя, что не всегда соответствует реальным условиям эксплуатации и не позволяет адаптировать конструкцию к реальному распределению нагрузок. В связи с этим разработка методологии расчёта трёхслойных панелей с нерегулярной (градиентной) сотовой структурой, учитывающей локальные изменения геометрии и свойств заполнителя, представляет собой важную научную и инженерную задачу, полностью соответствующую современным тенденциям в области проектирования авиационных конструкций.

Диссертация содержит ряд научно обоснованных и достоверных результатов, полученных с применением современных методов теоретического анализа, численного моделирования и экспериментальной верификации.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«10» 12 2025 г.

В Главе 1 автор проводит обстоятельный анализ современного состояния исследований в области применения сотовых конструкций в авиационной технике. Рассмотрены работы отечественных и зарубежных учёных, посвящённые расчёту и проектированию трёхслойных панелей с регулярным и нерегулярным заполнителем. Особое внимание уделено методам оценки эффективных упругих характеристик сотового заполнителя и подходам к моделированию НДС многослойных систем. На основе обзора сформулированы цели и задачи исследования, обоснована необходимость разработки нового метода расчёта НДС с учётом переменной геометрии ячеек.

В Главе 2 разработана оригинальная математическая модель НДС трёхслойной панели с нерегулярной сотовой структурой. Автором предложен подход к определению эффективных упругих характеристик сотового заполнителя, адаптированных к задачам проектирования переменных структур. В рамках теории Тимошенко-Рейсснера первого порядка построена система дифференциальных уравнений, решаемая методом малых возмущений с представлением решения в виде двойных рядов Фурье. Предложен итерационный алгоритм численной реализации модели, позволяющий учитывать слабую неоднородность структуры в рамках корректной физической постановки задачи.

В Главе 3 представлена программная реализация предложенного метода в виде специализированного расчётного комплекса, ориентированного на проектирование трёхслойных панелей, в том числе изготавливаемых по аддитивным технологиям. Приведены результаты конечно-элементного анализа и экспериментальных исследований, подтверждающие достоверность разработанной модели. Автором проведено сравнение расчётных и экспериментальных данных по прогибам, напряжениям и критическим нагрузкам, показавшее хорошую сходимость результатов. Также продемонстрирована возможность выбора рациональной геометрии сотового заполнителя по критерию равномерного использования прочности материала.

В Главе 4 отражена практическая реализация полученных научных решений. Приведены результаты изготовления и испытаний опытных образцов с

регулярной и нерегулярной сотовой структурой, выполненных из титанового сплава и с применением аддитивных технологий (FDM-печать и композитные материалы). Показано, что использование адаптивной структуры позволяет снизить массу конструкции на 7–8,5 % при сохранении несущей способности. Результаты экспериментов подтверждают эффективность предложенного метода расчёта и его пригодность для инженерного проектирования лёгких и прочных конструкций.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке нового метода расчёта НДС трёхслойных панелей с нерегулярной сотовой структурой, основанном на методе малых возмущений и представлении решения в виде двойных рядов Фурье. Обоснован и реализован подход к определению эффективных упругих характеристик сотового заполнителя с переменной геометрией ячеек.

Создан специализированный программный комплекс для расчёта и оптимизации трёхслойных панелей с градиентным сотовым заполнителем. Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретически и подтверждены экспериментально. Результаты численного моделирования сопоставлены с данными собственных экспериментальных исследований. Обоснованность применённых гипотез (модель Тимошенко-Рейсснера, метод усреднения, слабая неоднородность) подтверждена параметрическим анализом и сопоставлением с конечно-элементными решениями. Достоверность результатов также подтверждается публикациями соискателя в рецензируемых научных журналах и докладами на международных и всероссийских конференциях.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанного метода при проектировании лёгких и эффективных несущих конструкций летательных аппаратов, в том числе изготавливаемых по аддитивным технологиям. Предложенный расчётный комплекс позволяет:

- оптимизировать геометрию сотового заполнителя под конкретные условия нагружения;

- снижать массу конструкции без потери прочности;

- повышать ресурс и надёжность несущих поверхностей за счёт выравнивания распределения напряжений.

Основные результаты опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах из Перечня ВАК и базы Scopus, а также в свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ. Материалы диссертации докладывались на международных и всероссийских конференциях, что подтверждает их научную и практическую актуальность.

Результаты диссертации могут быть использованы в конструкторских бюро и научно-исследовательских организациях авиационной отрасли, а также при подготовке специалистов в области прочности и проектирования композитных конструкций.

Замечания по диссертации и автореферату

Несмотря на высокое качество выполнения работы, считаю необходимым обратить внимание автора на следующие моменты:

- В автореферате отсутствует чёткое разграничение между результатами, полученными лично автором, и теми, которые были получены при участии научного руководителя или соавторов. Желательно уточнить долю личного вклада в каждом из перечисленных научных положений.

- В диссертации недостаточно подробно рассмотрены пределы применимости предложенного метода. В частности, не указаны условия, при которых допущения, лежащие в основе модели (малые возмущения, слабая неоднородность и др.), перестают быть корректными. Это важно для практического применения метода.

- Не представлен анализ влияния погрешностей изготовления (особенно при аддитивном производстве) на точность расчётов. В условиях, когда геометрия соты может отличаться от проектной, вопрос устойчивости метода к отклонениям параметров становится критичным.

Эти замечания являются рекомендательными и не снижают научной ценности работы.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов», в частности пункту 2: «Обеспечение прочности объектов авиационной, ракетной и космической техники на основе современных аналитических и численных методов...». Все исследовательские задачи, методы и результаты ориентированы на решение проблем прочности несущих конструкций авиационной техники.

Автореферат в полной мере отражает основные положения диссертации, включая цели, задачи, методы исследования, научную новизну и практическую значимость. Выводы и рекомендации, представленные в автореферате, корректно отражают содержание основного текста диссертации.

Таким образом, диссертационная работа И.В. Котовича «Метод расчёта напряжённо-деформированного состояния трёхслойных панелей с нерегулярной сотовой структурой для обеспечения прочности несущих поверхностей объектов авиационной техники» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной под руководством кандидата технических наук, доцента Ежова Алексея Дмитриевича, содержащей новое решение актуальной научной задачи — разработку метода расчёта и оптимизации трёхслойных сотовых конструкций с переменной геометрией ячеек, имеющей существенное значение для специальности 2.5.14 «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов». Считаю, что автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14.

Диссертационная работа И.В. Котовича выполнена на высоком научном и методическом уровне, носит завершённый характер, логически структурирована, содержит систематизированный анализ литературы, обоснованные теоретические положения, апробированные экспериментально, и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявленным к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Котович

Илья Всеволодович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Доктор технических наук, профессор,
Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А. Н. Туполева –
КАИ, заведующий кафедрой
«Прочность конструкций»


3.12.25 В.А. Костин

Адрес электронной почты: VAKostin@kai.ru

Телефон: +7 (843) 231-03-27

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ – КАИ)

Почтовый адрес организации: 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»: <https://kai.ru/>

Адрес электронной почты организации: kai@kai.ru

Телефон: +7 (843) 231-01-09



с ознакомлением  10.12.2025г.