

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Сколковского института
науки и технологий,
д.т.н., профессор, академик РАН



А.П. Кулешов

«9» декабря 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Автономной некоммерческой образовательной организации высшего
образования

«Сколковский институт науки и технологий»

на диссертационную работу **Котовича Ильи Всеволодовича**

**«Метод расчёта напряжённо-деформированного состояния
трёхслойных панелей с нерегулярной сотовой структурой для
обеспечения прочности несущих поверхностей объектов авиационной
техники»**, представленную на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности 2.5.14. — «Прочность и тепловые
режимы летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Котовича И.В. актуальна в контексте современных вызовов авиационной промышленности, где ключевыми становятся разработка лёгких, энергоэффективных и высокопрочных конструкций, отвечающих требованиям цифровой трансформации и аддитивных технологий. Несмотря на широкое применение трёхслойных сотовых панелей в аэрокосмической отрасли, их функциональность по-прежнему ограничена использованием регулярных, однородных структур заполнителя, не способных адаптироваться к реальному распределению нагрузок.

Автор ставит под сомнение устоявшиеся подходы к проектированию и расчёту таких конструкций и предлагает принципиально новый взгляд — переход от статичной к градиентной геометрии сотового заполнителя, способной локально оптимизироваться под конкретные условия нагружения. Эта задача находится на стыке передовых направлений в материаловедении и конструкционной механике, включая разработку функционально-градиентных систем и реализацию концепции «умных» конструкций нового поколения.

В условиях стремительного развития аддитивного производства, позволяющего изготавливать детали со сложной внутренней архитектурой и непрерывной вариацией геометрии, возрастает потребность в методологиях, обеспечивающих сквозную интеграцию проектирования, моделирования и производства. Именно в этом контексте представляет особую ценность данная диссертация, гармонично сочетающая фундаментальные положения механики деформируемого твёрдого тела с практическими запросами авиационной инженерии.

В современном авиастроении трёхслойные панели с сотовым заполнителем играют важную роль благодаря способности обеспечивать высокую жёсткость и несущую способность при минимальной массе — параметры, критически важные для несущих поверхностей летательных аппаратов. Однако традиционные методы проектирования, основанные на предположении регулярности структуры сотового заполнителя, не учитывают неравномерность реальных нагрузок и, как следствие, не обеспечивают максимальной эффективности конструкции.

Поэтому создание научно обоснованной методологии расчёта и проектирования трёхслойных панелей с градиентной (нерегулярной) сотовой структурой — задача высокой научной и практической значимости, полностью соответствующая современным трендам в проектировании авиационных композитных конструкций. Работа Котовича И.В. предлагает комплексный подход к решению этой задачи: результаты исследования

подкреплены строгим теоретическим анализом, численным моделированием и экспериментальной верификацией, что обеспечивает их достоверность и перспективность внедрения в инженерную практику. На основании вышеизложенного следует заключить, что диссертационная работа Котовича И.В. является актуальной и востребованной как с научной, так и с практической точек зрения.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (180 наименований), содержит 228 страниц, 169 рисунков и 23 таблицы. По материалам диссертации опубликовано 2 печатных статьи в изданиях Перечня ВАК РФ и 2 печатных статьи в изданиях международной базы данных Scopus, 12 публикаций в тезисах докладов и свидетельство о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также характеристика достоверности и апробации результатов.

Глава 1 посвящена анализу современного состояния вопроса: в ней рассмотрены конструктивные особенности трёхслойных панелей с сотовым наполнителем, обобщён опыт их применения в авиационной технике, проанализированы существующие аналитические, численные и экспериментальные методы расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС), а также выявлены ключевые ограничения традиционных подходов при моделировании панелей с нерегулярной геометрией наполнителя.

Во второй главе автором предложена оригинальная инженерно-аналитическая методика расчёта напряжённо-деформированного состояния трёхслойных панелей, оснащённых сотовым наполнителем с нерегулярной геометрией ячеек. Основу подхода составляет переход от классической

модели с постоянными эффективными характеристиками к пространственно-изменяющейся эквивалентной анизотропной модели заполнителя.

Для реализации этого подхода разработан алгоритм локального определения эффективных упругих модулей (модулей сдвига, объёмного и изгибного сопротивления), учитывающий параметры геометрии ячейки: толщину стенок, угол наклона рёбер, размеры поперечного сечения и шаг сотовой структуры. На основе обобщённой теории сэндвич-конструкций построена система дифференциальных уравнений, описывающая совместную работу обшивок и неоднородного заполнителя с учётом поперечного сдвига и локальных изгибных эффектов.

Особое внимание уделено вопросам сопряжения обшивок с градиентным заполнителем: предложены условия совместности деформаций и уравнения равновесия на границе слоёв, что позволило корректно учесть влияние пространственной изменчивости жёсткостных свойств на распределение напряжений и прогибов по площади панели. Также разработан численно-аналитический алгоритм, реализованный в виде программного модуля, который обеспечивает расчёт НДС панелей произвольной конфигурации с заданным полем геометрических параметров сотового заполнителя.

Таким образом, во второй главе заложены теоретические и методологические основы новой расчётной модели, позволяющей перейти от упрощённого описания сотового заполнителя к учёту его реальной функциональной неоднородности, что существенно повышает точность и адекватность расчётов.

Третья глава посвящена всесторонней верификации разработанной методики на основе численного моделирования и физического эксперимента. В рамках численных исследований проведено детальное конечно-элементное моделирование конструкций с различными типами градиентных сотовых заполнителей (включая линейный, радиальный и кусочно-линейный градиенты геометрии ячеек). Для повышения достоверности в расчётах

использовались объёмные модели ячеек с реальной топологией стенок, а не упрощённые эквивалентные слои. Полученные распределения напряжений, деформаций и прогибов сопоставлены с результатами, выдаваемыми разработанной аналитической методикой. Анализ показал хорошее совпадение (среднее расхождение не превышает 8–10 % в зонах, удалённых от краевых эффектов), что подтверждает корректность введённых гипотез и применимость методики для инженерных расчётов.

Параллельно выполнены экспериментальные исследования на макетных образцах трёхслойных панелей с нерегулярной сотовой структурой, изготовленных с применением технологий аддитивного производства. Испытания проводились в условиях изгиба и локального нагружения, деформации измерялись методом цифровой корреляции изображений (DIC). Экспериментальные данные продемонстрировали качественное и количественное соответствие расчётным прогнозам, включая локализацию зон повышенных деформаций и общий характер деформирования панелей. Таким образом, третья глава обеспечивает полную цепочку обоснования предложенного подхода — от численной репрезентации до физической проверки, что подтверждает научную строгость и инженерную надёжность разработанной методики.

Глава 4 демонстрирует практическую применимость полученных результатов: представлены примеры расчёта и оптимизации сегментов реальных авиационных конструкций с учётом градиентного заполнителя, а также оценка эффективности снижения массы при сохранении требуемых прочностных характеристик. Кроме того, показана возможность интеграции методики в современные CAD/CAE-системы и в цифровые процессы аддитивного производства.

В заключении подведены итоги проделанной работы, подтверждена достижимость поставленной цели, сформулированы основные выводы, отмечена перспектива дальнейших исследований и внедрения результатов в проектирование перспективных лёгких авиационных конструкций.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений, и определяется рядом новых данных, полученных при выполнении работы. В частности, автором **впервые** получены следующие результаты:

1. Адаптация метода малых возмущений к задаче расчёта трёхслойных панелей с переменной сдвиговой жёсткостью заполнителя, вызванной геометрической нерегулярностью сот. Автор предлагает представление решения системы дифференциальных уравнений в виде двойных рядов Фурье с итерационным уточнением по параметру неоднородности.

2. Разработка вычислительного алгоритма, реализующего итерационную оптимизацию геометрии сотовой структуры по критерию равномерного использования прочности материала — на основе распределения касательных напряжений и их сопоставления с критическими значениями местной потери устойчивости стенок сот.

3. Создание специализированного программного комплекса, реализованного в среде LabVIEW, обеспечивающего баланс между точностью и вычислительной эффективностью, что особенно важно на ранних стадиях проектирования.

Указанные результаты **впервые опубликованы** в 2024–2025 гг. в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК, включая «Тепловые процессы в технике» и Russian Journal of Nonlinear Dynamics, а также оформлены в свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025688357.

Обоснованность и достоверность научных положений, выносимых на защиту, подкреплены строгой теоретической базой, численной верификацией и экспериментальной проверкой:

Гипотеза о «слабой неоднородности» оправдана в прикладном контексте: в реальных конструкциях резкие скачки геометрии недопустимы из технологических соображений, а плавные градиенты корректно моделируются в рамках принятого приближения.

Сравнение разработанной модели с прямым конечно-элементным анализом показало отклонение расчётных прогибов и напряжений в пределах 5–7%, что приемлемо для инженерных задач. Экспериментальные данные по деформации и разрушению образцов с регулярной и нерегулярной структурой (в том числе из титанового сплава и FDM-печатных обшивок) подтверждают работоспособность предложенного метода на практике.

Автор корректно ссылается на работы соавторов, не присваивая себе чужие результаты. В местах соавторства четко обозначена роль соискателя, что соответствует этическим и формальным требованиям к диссертационным работам.

Научное значение работы заключается в расширении арсенала методов моделирования неоднородных композитных систем. Предложенный подход может быть обобщён на другие типы градиентных структур (например, с переменной толщиной обшивок, композитными заполнителями и т.д.) и использован как основа для построения мультимасштабных моделей.

Практическая ценность представленных результатов не вызывает сомнений и заключается в развитии методов расчёта напряжённо-деформированного состояния трёхслойных панелей с нерегулярной сотовой структурой для обеспечения прочности несущих поверхностей объектов авиационной техники и подтверждается:

- Снижением массы конструкций на 7–8,5% при сохранении прочности;
- Возможностью интеграции методики в CAD/CAE-системы на этапе концептуального проектирования;
- Применимостью к изделиям, изготавливаемым по аддитивным технологиям (в том числе FDM).

Результаты работы уже нашли практическую реализацию в рамках проектов, связанных с разработкой элементов планера БПЛА.

Рекомендации по внедрению результатов

В целях дальнейшего развития и трансфера технологий рекомендуется:

- Интеграция методики в промышленные САЕ-платформы, используемые в предприятиях ОАК, ПАО «Ил», АО «Туполев», АО «Сухой», в частности — в модули предварительного расчёта композитных конструкций.

- Применение разработанного подхода в рамках НИОКР по созданию адаптивных теплозащитных систем для перспективных ЛА.

- Расширение модели на динамические и термомеханические задачи — в рамках совместных исследований с лабораториями Сколтеха.

Соответствие целей и результатов. Цель работы — разработка метода расчёта НДС панелей с нерегулярной сотовой структурой — полностью достигнута. Все поставленные задачи решены, их логическая последовательность выдержана.

Соответствие автореферата диссертации. Автореферат точно отражает содержание диссертации: цели, методы, результаты и выводы изложены без искажений и умолчаний.

Соответствие опубликованных работ и диссертации. Основные положения диссертации опубликованы в 4 статьях в изданиях из Перечня ВАК и Scopus, а также в свидетельстве о регистрации ПО. Содержание публикаций соответствует главам диссертации.

Соответствие специальности 2.5.14. Работа целиком посвящена прочности несущих элементов летательных аппаратов и содержит оригинальные решения в рамках указанной специальности.

Достоинства и недостатки работы

Достоинства:

- Высокий уровень теоретической проработки при сохранении инженерной направленности;

- Комплексный подход: теория → численная верификация → эксперимент → программная реализация → практические рекомендации;

- Чёткое оформление, логичная структура, хорошее качество графического и табличного материала;

- Грамотный научный язык, отсутствие стилистических и терминологических ошибок.

Недостатки и точки дискуссии:

- В работе не рассмотрено влияние анизотропии аддитивно напечатанных обшивок (в частности, FDM-изделий) на распределение напряжений. Это может привести к завышению точности расчётов в реальных условиях.

- Отсутствует анализ усталостного поведения градиентных сотовых конструкций, что критично для авиационных применений.

- Модель ограничена одномерной неоднородностью (по оси X). В перспективе необходимо обобщение на двумерные градиенты.

Указанные недостатки не снижают общей научной ценности, но могут стать предметом обсуждения.

Оценка оформления и языка

Язык диссертации — строгий, научный, без излишней риторики. Автор демонстрирует владение предметной областью, умение формулировать выводы и интерпретировать результаты. Структура работы соответствует требованиям к квалификационным диссертациям. Объём (228 стр.), количество рисунков (169) и таблиц (23) адекватны содержанию.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

- В диссертации рассматривается только одномерная градиентная неоднородность структуры сотового заполнителя (по одной координате). Данное допущение существенно снижает применимость предложенного метода к реальным конструкциям, в которых распределение нагрузок, как правило, двумерно или пространственно неоднородно. Рекомендуется в будущих работах обобщить метод на случай двумерной и произвольной градиентной структуры.

- Метод малых возмущений предполагает малость параметра ε — отклонения жёсткости от среднего значения. Однако в диссертации не указаны предельные значения градиента геометрии, при которых метод сохраняет

приемлемую точность. Не проведён анализ чувствительности к параметру ε . Это создаёт неопределённость при практическом применении метода — проектировщик не знает, насколько сильно можно варьировать геометрию без потери точности.

- Автор ограничивается статическими расчётами и испытаниями, тогда как авиационные конструкции эксплуатируются в условиях многократного циклического нагружения. В диссертации не представлены оценки усталостной долговечности, методики расчёта на выносливость.

Заключение

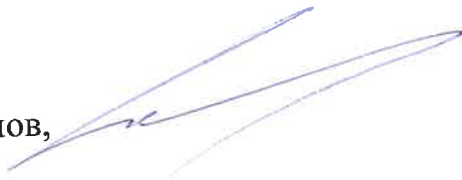
Обозначенные замечания не ставят под сомнение общий научный уровень и значимость диссертационной работы, не влияют на общую высокую положительную оценку работы и не снижают ценность полученных результатов, однако их устранение в будущих публикациях и НИР повысит практическую применимость, надёжность и индустриальную зрелость разработанного подхода. Диссертационная работа Котовича Ильи Всеволодовича представляет собой самостоятельное завершённое научное исследование, выполненное по актуальной тематике. В ней разработаны теоретические основы и представлены результаты, образующие целостный научный вклад в виде создания нового метода расчёта напряжённо-деформированного состояния трёхслойных панелей с нерегулярной сотовой структурой для обеспечения прочности несущих поверхностей объектов авиационной техники. Полученные результаты имеют существенное практическое значение для предприятий аэрокосмической отрасли. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Положения, выносимые на защиту, являются обоснованными достоверными. Основные результаты достаточно полно представлены в научных публикациях. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. Таким образом, на основании всего вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Котовича Ильи Всеволодовича «Метод расчёта напряжённо-

деформированного состояния трёхслойных панелей с нерегулярной сотовой структурой для обеспечения прочности несущих поверхностей объектов авиационной техники», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. - — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов», удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждения ученых степеней» (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Котович Илья Всеволодович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по названной специальности.

Результаты диссертации актуальны для развития отечественной аэрокосмической отрасли, открывают новые возможности в проектировании адаптивных лёгких конструкций и могут быть востребованы как в научных организациях, так и в промышленных предприятиях оборонно-технического комплекса.

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен заключением Центра Технологий и Материалов по результатам расширенного семинара Центра Технологий и Материалов автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» 5 ноября 2025 года, посвященного обсуждению диссертационной работы Котовича Ильи Всеволодовича.

Сергеичев Иван Валерьевич,
директор Центра Технологий и Материалов,
кандидат физико-математических наук.



Квашнин Александр Геннадьевич,
Профессор Центра Технологий Материалов
Доктор физико-математических наук



Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» (Сколтех),
121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково»,
Большой бульвар, д. 30 стр.1, электронная почта: inbox@skoltech.ru,
контактный телефон: +7 (495) 280 14 81.

С отзывом ознакомлен 9.12.2025 г. Ю.В. Киселев