

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ФГБУН

"Институт прикладной механики
Российской академии наук" (ИПРИМ РАН),
д.т.н. Власов Александр Николаевич



(Handwritten signature)

«28» ноября 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Чжо Йе Ко
«Топологическая оптимизация плоских ребренных панелей на основе моделей
пластин переменной толщины», представленной к защите на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика
деформируемого твердого тела.

Актуальность и цель диссертационного исследования.

Диссертационная работа посвящена созданию и отработке метода топологической оптимизации плоских ребренных панелей на основе моделей пластин переменной толщины. В ней представлены аналитические, конечно-элементные и экспериментальные методы расчета плоских ребристых панелей на основе методов топологической оптимизации с учетом ограничений по жесткости и прочности.

Методы топологической оптимизации применяются как для получения оптимальной геометрии конструкции, так и для поиска нового облика и геометрических форм конструктивных элементов для их дальнейшей адаптации к применению в реальных конструкциях. Применение методов топологической оптимизации позволяет находить наилучшее распределение ограниченного объема материала при заданном объеме конструкции с целью повышения ее жесткости.

Развитие в настоящей работе методов приближенного аналитического расчета таких конструкций, обобщение метода на анизотропные и на много-материальные составные конструкции, а также результаты численных и экспериментальных исследований являются **актуальными**.

Целью диссертационного исследования является развитие подходов для создания эффективных металлических и металло-композитных конструкций на основе методов топологической оптимизации с учетом ограничений по жесткости и прочности.

Научная новизна работы определяется полученными результатами:

1. Предложена и реализована методика топологической оптимизации подкрепленных плоских панелей, в том числе композитных, работающих в условиях сложного напряженного состояния. В предложенной методике

Отдел документационного
обеспечения МАИ

29. 11 2023

функция фиктивной плотности используется для задания локальной толщины панели, а локальный угол армирования в слоях композита задается дополнительные узловыми переменными, вводимыми в задачу оптимизации. Методика позволяет получать оптимизированные варианты конструкций с наибольшей жесткостью.

2. Получены рекомендации по выбору наилучших настроек задачи оптимизации, связанных с выбором размера сетки, типа конечных элементов, начальных условий для толщины пластины и типа аппроксимирующей функции для дополнительных переменных модели.

3. Разработанная численная методика валидирована на основе примера аналитического решения для квадратной пластины, нагруженной сосредоточенной силой, смещенной относительно центра. Показана согласованность геометрии ребер жесткости, возникающих в численном решении, с результатами оптимизации, получаемыми в рамках аналитического подхода. Также показана высокая точность решений, получаемых для пластин переменной толщины, по сравнению с соответствующими моделями с прорисовкой ребер жесткости пластинчатыми элементами.

4. Получены новые результаты экспериментальных исследований для образцов оптимизированных подкрепленных панелей из материала PBT-G, синтезированных на установке 3д печати, а также результаты механических испытаниях на изгиб. Показано преимущество оптимизированной геометрии ребрения панелей по сравнению со стандартными регулярными вариантами.

Достоверность полученных результатов определяется применением строгих методов механики деформируемого твердого тела, теории упругости, теории дифференциальных уравнений. Сопоставление численных и аналитических результатов расчетов показало хорошую согласованность. Численное моделирование проведено в широко известном и хорошо зарекомендовавшем себя ПО COMSOL Multiphysics с использованием высокоплотной сетки и детализированных моделей.

Практическая значимость. Разработанные в диссертационной работе подходы и алгоритмы являются актуальными и практически востребованными в практике проектирования прикладной численной методики, позволяющей выбрать оптимальную геометрию силового набора ребренных плоских панелей, обеспечивающую повышение жесткости конструкции при заданных условиях нагружения.

Апробация результатов работы была проведена на российских и международных конференциях:

1) Чжо Йе Ко., Соляев Ю.О. Применение методов топологической оптимизации для выбора геометрии силового набора подкрепленных панелей. Международная конференция "Авиация и космонавтика" МАИ. 2020 г.

2) Чжо Йе Ко., Рабинский Л.Н. Оценка корректности решений задач топологической оптимизации подкрепленных панелей, полученных на основе теории пластин Миндлина-Рейсснера. Международная молодежная научная конференция. Секция "Механика и моделирование материалов и технологий". Москва. 2021 г.

3) Чжо Йе Ко., Соляев Ю.О., Рабинский Л.Н. Топологическая оптимизация оребренных панелей, нагруженных сосредоточенными силами. Международная конференция «Космические системы». МАИ. 2021 г.

4) Чжо Йе Ко., Соляев Ю.О., Рабинский Л.Н. Методика топологической оптимизации геометрии подкрепляющих элементов плоских панелей. Международная конференция «Композитные материалы и конструкции». МАИ. 2021 г.

5) Чжо Йе Ко., Соляев Ю.О., Бабайцев А.В. Топологическая оптимизация оребренных панелей, нагруженных различными силами. XI Международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте». Гомель. 2021 г.

6) Чжо Йе Ко., Бабайцев А.В., Чубаров В.С. Исследование остаточных деформаций в зависимости от условий печати. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред Материалы XXVIII международного симпозиума имени А.Г.Горшкова. 2022 г.

7) Чжо Йе Ко., Рабинский Л.Н. Топологическая оптимизация подкрепленных панелей на основе аналитических решений. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред Материалы XXIX международного симпозиума имени А.Г.Горшкова. 2023 г.

8) Чжо Йе Ко., Рабинский Л.Н. Соляев Ю.О. Теоретическое и экспериментальное обоснование подхода к оптимизации топологии переменной толщины для ребристо-жестких панелей. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред Материалы XXIV международного симпозиума имени А.Г.Горшкова. 2023 г.

Результаты работы представлены в 4 публикациях, в том числе, две работы опубликованы в журнале, индексируемом Scopus, и две публикации в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ.

Объём и структура включают в себя 150 страниц основного текста, введение, четыре главы, заключение и список литературы (125 источников).

В первой главе дается обзор известных работ, связанных с тематикой проводимых исследований, дается обоснование выбранному направлению исследований, целям и задачам диссертации.

Во второй главе представлена формулировка метода топологической оптимизации облегченных металлических и металло-композитных элементов авиационных конструкций, работающих в условиях сложнапряженного состояния. Приведен метод топологической оптимизации подкрепленных металлических и металло-композитных конструкций, основанный на введении функции фиктивной плотности для определения локальной толщины тонкостенных элементов конструкций, работающих в условиях сложнапряженного состояния.

В третьей главе приведены результаты решения задач топологической оптимизации для подкрепленных панелей, нагруженных сосредоточенными силами. Проводится поиск наилучшего распределения ограниченного объема

материала в заданном объеме конструкции для получения наиболее высокой жесткости.

В разделе 3.1 предложена методика топологической оптимизации геометрии подкрепляющих элементов плоских панелей, нагруженных сосредоточенными силами. Методика основана на численном решении задачи о деформациях панели переменной толщины. Параметром оптимизации является толщина панели, задаваемая через фиктивную функцию плотности. Целевой минимизируемой функцией является полная энергия деформаций панели.

В разделе 3.2 представлен метод оптимизации панелей переменной толщины, который был реализован в Comsol Multiphysics для оптимизации топологии пластин с ребрами жесткости. Также представлен метод параметрической оптимизации пластин с регулярной жесткостью (результаты этого метода сравниваются с топологической оптимизацией). Также представлены экспериментальные методики, которые были реализованы для изготовления и испытания оптимизированных пластин.

В разделе 3.3 рассмотрена тестовая задача для квадратной свободно опертой пластины, нагруженной смещенной поперечной силой. Решения ТО для такой задачи содержат несколько прямых ребер, ориентация которых зависит от относительного смещения точки нагрузки от центра пластины. Используя соответствующую модель балочного типа (в которой остаются только ребра и пренебрегается влиянием лицевого листа пластины), мы показываем, что подобное уникальное оптимальное решение для ребер может быть получено аналитически, чтобы можно было проверить численные решения ТО.

В разделе 3.4 рассмотрены эксперименты на оптимизированных пластинах, разработанных с использованием ТО и ПО для граничных условий (5) (фиксированные углы) и для случаев нагружения одной центральной или эксцентрической силой и двумя симметричными силами (рис. 13 а-д). Оптимизированные пластины были изготовлены с помощью технологии 3d-печати. Мы использовали полимерный материал PETG (FDplast) и FDM 3D принтер Original Prusa i3 MK3S.

В четвертой главе представлены результаты расчетов, реализованных с использованием предложенных методов ТО для составных конструкций. Рассмотрены примеры ТО для плоских металло-композитных панелей, в которых металлические элементы выполнены из сплава D16.

В заключении обобщены результаты, полученные в диссертационном исследовании. Кроме того, основные результаты по каждой главе кратко изложены в соответствующей главе. Диссертация и автореферат диссертации изложены хорошим научно-техническим языком. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертационной работы.

По диссертации и автореферату **имеется ряд замечаний:**

- 1) В первой главе упоминается, что рассматриваемый класс задач оптимизации требует регуляризации, так как приводит к сеточно-зависимым решениям, однако, далее в обзоре существующие методы регуляризации и оценка их эффективности обсуждаются очень кратко;

- 2) В постановках задачи оптимизации 2.35, 2.36 следовало бы указать, что энергия деформаций и решение задачи должно соответствовать теории пластин (аналогично постановке 2.10–2.20);
- 3) В соотношениях 3.2 и 3.3 используются разные обозначения для перерезывающей погонной силы (Q и V);
- 4) Из автореферата не ясно, какие физико-механические характеристики материала использовались для анализа моделей пластин, описанных в третьей главе диссертации, не даны данные по физико-механическим характеристикам материала;
- 5) В работе имеется ряд орфографических ошибок, подписи к графикам имеют разный стиль оформления.

Заключение.

Сделанные замечания не снижают теоретическую и практическую значимость полученных результатов. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями). Автор диссертации Чжо Йе Ко заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на научно-методическом семинаре «Отдела механики адаптивных композиционных материалов и систем». Утвержден на заседании Ученого совета Института прикладной механики Российской академии наук, протокол № 08/23 от 28.11.2023.

Отзыв составил:

Заместитель директора
по научной работе
ИПРИМ РАН, д.ф.-м.н.



Данилин Александр Николаевич

Контактные данные организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук.
Адрес: 125040, Россия, Москва, Ленинградский проспект, д.7, стр.1.

Телефон: +7 495 946-18-06

E-mail: iam@iam.ras.ru

Официальный сайт: <https://iam.ras.ru/>

Учёный секретарь
ИПРИМ РАН, к.ф.-м.н.



М.П.

Карнет Юлия Николаевна



С отзывом ознакомлен



29.11.2023