

ОТЗЫВ

официального оппонента на
диссертацию **ЕРМАКОВА Ивана Сергеевича** на тему

«ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТЯГИВАЕМЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВИДЕ КРУГОВЫХ ОТВЕРСТИЙ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы исследований. В широких отраслях специального и гражданского машиностроения неизбежно повышаются объемы применения новых волокнистых композитов, и расширяется номенклатура изделий из них. Композитные материалы со слоистой и пространственной структурой армирования используются, в частности, при создании несущих элементов космических и авиационных конструкций. Наиболее простыми и широко применяемыми формами композитных деталей остаются плоские элементы и намоточные оболочки с различными структурами армирования. В связи с этим объектом данного диссертационного исследования была выбрана именно композитная пластина, подвергнутая растяжению в плоскости. Поскольку в качестве способа крепления композитных элементов по-прежнему широко используются болты и заклепки, анализ влияния отверстий на прочность композитных панелей представляется **актуальной** задачей. Круговые отверстия наиболее просто изготовить в конструктивных элементах, и они несут не только функцию крепления, поэтому представляет интерес численный анализ (а точных аналитических решений для произвольных систем отверстий не существует) различных систем круговых отверстий, которые могут выполнять различные функции в реальных плоских деталях.

Таким образом, можно утверждать, что, несмотря на давнюю историю задачи о пластине с отверстием (Колосов, Инглис, Савин, Мухелишвили, Лехницкий и многие другие), она остается не до конца изученной и поэтому – **актуальной**.

Наиболее важен и сложен анализ влияния концентраторов напряжений на прочность структурно неоднородных композитов, но даже анализ концентрации напряжений, чему в основном посвящена рецензируемая работа, сопряжен с определенными вычислительными трудностями и представляет **научный и прикладной интерес**.

Отметим, что процесс проектирования композитных панелей авиационного назначения не ограничивается вопросами обеспечения несущей способности. Важные требования накладываются на весовые характеристики и на надежность соединения с другими элементами конструкций, и выполнить эти требования не представляется возможным без наделения композитных деталей отверстиями. Несмотря на большое внимание к расчетам композитных пластин с отверстиями, адекватных методов расчетов

явно недостаточно, что связано с высокой сложностью задачи. А для обеспечения требуемого уровня техногенной безопасности, ресурса, живучести композитных конструкций необходимо всестороннее изучение и описание процессов деформирования и разрушения именно в зонах концентрации напряжений, что является особенно сложным. Изложенное выше и анализ полученных новых результатов в области механики деформируемого твердого тела позволяют признать данную работу **актуальной**.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа содержит 60 рисунков и 21 таблицу. Общий объем диссертации 142 страницы. В библиографическом списке представлено 112 источников.

Во **Введении** обоснована **актуальность** темы диссертационной работы, сформулированы её цель, задачи, **новизна**, обоснованы **достоверность, теоретическая и практическая значимость** полученных результатов.

Первая глава посвящена аналитическому обзору работ, выполненных по сходным направлениям другими авторами. Описаны основные методы моделирования слоисто-волоконистых композитных пластин с круговыми отверстиями для анализа НДС (напряженно-деформированного состояния). Рассмотрены основные подходы к анализу НДС и сформулированы некоторые нерешенные задачи в данной области, делающие актуальной рассматриваемую работу.

Известные аналитические методы решения задач о НДС одноосно растягиваемых композитных пластин с круговым отверстием являются модификацией известных решений Савина-Лехницкого для бесконечной ортотропной пластины с эллиптическим отверстием. Попытки оценить наибольшие напряжения на контуре отверстий в пластинах конечных размеров или при наличии нескольких, близко расположенных отверстий, так или иначе, сводятся к интегральным уравнениям типа Коши, численное решение которых возможно лишь с помощью неких итерационных процедур. В общей постановке задача становится недоступной для современных аналитических подходов и требует привлечения численных методов.

При решении поставленной задачи с использованием широко распространенных конечно-элементных комплексов возникают проблемы обеспечения сходимости численных процедур к искомому точному решению задачи при последовательном измельчении сетки конечных элементов в зонах, близких к кромке отверстия. Из-за сложности построения сетки в этих зонах подтверждение сходимости при измельчении сетки представляется проблематичным. Поэтому надёжность многих численных решений для зон, близких к отверстию, остаётся под вопросом.

В главе 1 обсуждены постановки задачи о плоском и трехмерном напряжённо-деформированном состоянии ортотропной пластины, включающие формулировки геометрических и физических соотношений.

Приведен обзор наиболее распространенных подходов к оценкам прочности композитов с отверстиями, и оценена применимость различных критериев разрушения.

С учетом вытекающих из обзорного анализа выводов и отмеченных проблем для задач об одноосном растяжении композитных пластин с круговыми отверстиями в первой главе сформулирован подход к построению вычислительной методики, основанной на одновременном применении вариационно-разностного метода и метода конечных элементов. Предложенная методика включает процедуру подтверждения достоверности получаемых решений путем сопоставления результатов расчетов по двум вычислительным методам. Также изложена методика расчета на прочность композитных пластин с отверстиями, основанная на применении критерия разрушения в точке, находящейся на характерном удалении от вершины отверстия (point-stress-criterion).

Во **второй главе** описан метод численного решения задач об одноосном растяжении тонких композитных пластин с одним или двумя отверстиями. В вычислительных задачах механики анизотропных слоистых пластин с отверстиями известны серьёзные трудности с обеспечением устойчивости и сходимости расчетных процедур, которые автору удалось обойти. Решение поставленной задачи основано на вариационном принципе возможных перемещений, но с совместным применением центрально-разностных схем. Таким образом, численное моделирование осуществлялось с использованием двух вариантов моделей, основанных на вариационно-разностном методе и на методе конечных элементов. Сопоставимость результатов решений, полученных с использованием этих двух моделей, обосновывает достоверность полученных решений.

Во **второй части главы 2** представлены результаты, из которых следует, что коэффициент Пуассона не оказывает существенного влияния на распределение напряжений на контуре отверстия, а вот увеличение модуля сдвига приводит к повышению концентрации напряжений. Установлено также, что при продольном расположении двух одинаковых отверстий происходит снижение коэффициента концентрации напряжений по сравнению со случаем одного отверстия. Выявлено относительное расстояние между центрами двух поперечно расположенных отверстий, соответствующее наименьшему коэффициенту концентрации напряжений.

В **третьей главе** представлен метод численного решения задач об одноосном растяжении толстых и тонких круглых композитных пластин с отверстием. Поставлена задача о трехмерном напряжённо-деформированном состоянии цилиндрически ортотропной пластины, включающая формулировку геометрических и физических соотношений, уравнения равновесия и граничные условия. Описана модель численного интегрирования для случая плоской, круглой ортотропной пластины. Решение для нее строится разложением параметров НДС и приложенных нагрузок в ряды Фурье по окружной координате. Изложена процедура ортогональной прогонки применительно к рассматриваемой краевой задаче.

Для обоснования достоверности полученных результатов расчёты проводили с использованием четырех моделей: трехмерной вариационно-разностной, двухмерной с численным интегрированием, трехмерной и двухмерной конечно-элементной

Во **второй части главы 3** представлены результаты моделирования, из которых следует, что на участке, проходящем по кромке отверстия толстой пластины, имеет место

снижение напряжений от срединной поверхности к внешней поверхности. С учетом интенсивности этого снижения сделан вывод, что в реальных задачах расчеты можно проводить по плоской модели, так как она с достаточной точностью согласуется с объемной. Отмечено, что при испытаниях такого класса толстых пластин с применением визуальных систем измерения для получения точных результатов следует учитывать эффект неоднородности напряжений по толщине. Автор количественно оценил этот эффект для стеклопластиков и углепластиков с плоской и цилиндрической ортотропией.

Четвертая глава посвящена прочностным расчетам композитных пластин с отверстиями. Применяемая автором методика состоит из двух этапов. На первом – чисто расчетном этапе – рассчитываются напряжения в наиболее нагруженном сечении пластины, по которому и происходит разрушение. При этом плоское напряженное состояние пластины определяется по двум альтернативным моделям, что позволяет подтвердить основные результаты вычислений расчетом по другой модели. Таким образом, дальнейший расчет на прочность основан на достоверных, проверенных решениях. На втором этапе следует применить тот или иной критерий разрушения. На основе обзора критериев разрушения, проведенного в первой главе, автор выделил нелокальные критерии разрушения как наиболее простые и достаточно надежные. Суть их состоит в том, что начало разрушения связывается с достижением предела прочности не максимальными напряжениями на контуре отверстиями, а некоторыми эффективными напряжениями, за которые можно принять напряжения, усредненные по некоторому участку характерного размера, либо напряжение в точке, расположенной на характерном расстоянии от вершины отверстия. В работе принят критерий, основанный на напряжении в точке, удаленной от вершины отверстия на некоторое характерное расстояние, считающееся феноменологическим свойством материала. Применение такого критерия, как известно, позволяет (качественно, но не всегда – количественно) объяснить и снять основные противоречия теории прочности для градиентных полей напряжений, в частности, для пластин с отверстием. Первое противоречие: теоретический коэффициент концентрации напряжений всегда (и намного) больше коэффициента снижения прочности. Второе: теоретический (рассчитанный по теории упругости) коэффициент концентрации напряжений не зависит от диаметра отверстия, в то время как экспериментальный коэффициент снижения прочности, становится существенно меньше при уменьшении диаметра отверстия (масштабный эффект прочности). Третье: обычный расчет напряжений неприменим для трещиноподобных отверстий – коэффициент концентрации напряжений формально стремится к бесконечности, в то время как прочность снижается лишь в несколько (2-3-5?) раз.

Обычно вынужденно считается, что характерный размер (расстояние до расчетной точки) есть некое новое свойство материала с размерностью длины (характерный размер материала). Для его оценки необходимо определить критическое разрушающее напряжение для гладкого образца, а также разрушающие напряжения для пластины из рассматриваемого композита с отверстием любого радиуса (а лучше – с разными отверстиями). Это – «вечная» и никем до конца не решенная задача: как на основе расчетов напряжений предсказать снижение прочности.

Автор провел большое количество расчетов композитных пластин с одним, с двумя и тремя отверстиями. Расчеты сопоставлены с реальными экспериментами на растяжение, опубликованными зарубежными исследовательскими коллективами. Помимо этого автор провел собственные испытания стеклотекстолитовых образцов без отверстий и с отверстиями, вычислив по их результатам необходимые константы. С их помощью он спрогнозировал предельные растягивающие нагрузки для образца с двумя и восемью отверстиями, проведя полный цикл операций по разработанной методике и продемонстрировав навыки владения испытательной техникой. Учитывая сложность самой проблемы, можно считать, что расхождения проведенных расчетов и экспериментов лежат в приемлемых пределах.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

В Приложении представлен акт о применении результатов диссертационной работы в Отделе статической прочности Центра прикладных исследований АО «ЦНИИмаш» при проведении прочностных расчетов композитных пластин с отверстиями.

Научная новизна заключается в разработке оригинальных методик расчетов НДС в композитных пластинах конечных размеров с отверстиями, в сравнении различных методов расчета и в получении на их основе новых обоснованных результатов по влиянию на НДС упругих свойств композитов, а также числа отверстий, их размеров и взаимного расположения. Можно подтвердить, что:

- разработан и программно реализован алгоритм, основанный на вариационно-разностном методе,
- разработана методика подтверждения достоверности разных вычислительных моделей для решения задач о композитных пластинах с отверстиями;
- выявлены закономерности влияния на НДС свойств композитного материала, схем армирования, геометрических параметров отверстий;
- разработана методика расчета на прочность композитных пластин с отверстиями, путем введения характерного размера материала, определяющего расстояние от дна отверстия до точки вычисления напряжений.

Теоретическая и практическая значимость результатов состоит в:

- разработке методики расчёта НДС одноосно растягиваемых композитных пластин с отверстиями, основанной на 1) вариационно-разностном методе (с созданием алгоритма и программы) и 2) методе конечных элементов;
- исследовании влияния физико-механических и геометрических параметров на НДС композитных пластин;
- разработке методики расчета на прочность, основанной на применении «критерия напряжений в точке».

Практическую значимость работы подтверждает использование ее результатов в Отделе статической прочности Центра прикладных исследований АО «ЦНИИмаш».

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается их качественным согласием с экспериментальными

данными других авторов и с результатами собственных испытаний, но главное - достоверность результатов подтверждается предложенной процедурой сопоставления результатов, полученных на основе двух независимых вычислительных методов: вариационно-разностного и МКЭ.

Апробация работы и полнота опубликованных результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских научных конференциях и семинарах, в частности, - подробно, 17 апреля и 18 сентября 2024 г. - на Московском ежемесячном семинаре молодых ученых и студентов (МЕСМУС-184) по проблемам машиноведения имени акад. Ю.Н. Работнова в Институте машиноведения им. А.А. Благодного РАН.

Публикации по работе. Содержание и основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 7 статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК.

Оформление диссертации. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемыми к кандидатским диссертациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011). Материал в целом изложен последовательно, грамотным и понятным научным языком. Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации.

Замечания по содержанию и оформлению работы. При положительной в целом оценке диссертации необходимо высказать некоторые замечания и пожелания.

1. Проведен большой объем расчетов полей напряжений для оценки влияния различных параметров на коэффициент концентрации напряжений, но нужна ли такая точность вычисления напряжений, если они не имеют прямого отношения к снижению прочности, которое определяется значением напряжения в одной точке, отстоящей от кромки отверстия на некотором характерном, подобранном в эксперименте, расстоянии? Это к вопросу о самоценности уточненных процедур расчета напряжений.

2. Ценность с позиций проектирования таких элементов представлял бы анализ НДС в случаях разных диаметров отверстий. Интерес представляет определение расстояний в продольном и поперечном направлениях, при которых можно пренебречь взаимовлиянием отверстий.

3. Не ясна мотивация исследования толстой композитной круглой (!) пластины. Объект, тип ортотропии и форма нагружения являются довольно специфическими.

4. В подразделах 2.2, 2.3, 3.2, 3.3 стоило бы свести результаты исследований по влиянию на коэффициент концентрации напряжений тех или иных параметров в таблицы, для лучшего понимания и анализа, и уже по ним проводить выводы.

5. В подразделе 1.1 представлен обзор критериев разрушения в условиях концентрации напряжений, тем не менее, он заслуживает дополнения их сравнительным анализом, проведенным сравнительно недавно М.А. Леганом в своей докторской диссертационной работе «Градиентный критерий разрушения в зоне концентрации напряжений».

6. Большое разнообразие расчетных результатов следовало бы обобщить и четко сформулировать выводы по геометрии. Так какие же отверстия более опасны: расположенные в продольном или в поперечном ряду, одинаковых или разных диаметров и т.п.? Короче, не хватает некоторых наглядных геометрических (качественных) выводов.

7. Многочисленные частные результаты, выраженные в процентах, относятся только к конкретной геометрии, а интересно было бы проанализировать тенденции изменения коэффициентов концентрации в более общей постановке.

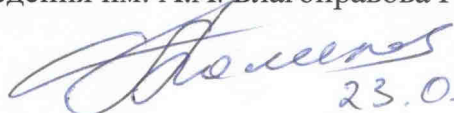
Отметим, что указанные замечания не затрагивают справедливость основных результатов, выносимых на защиту, и не отменяют общей положительной оценки диссертации, являясь во многом рекомендациями к дальнейшим исследованиям, так как относятся к общей проблеме связи теории упругости с вопросами прочности, т.е. к фундаментальной проблеме связи рассчитанных напряжений с их предельными значениями в условиях концентрации напряжений.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.

Диссертация **Ермакова** Ивана Сергеевича «Численное моделирование растягиваемых композитных пластин с концентраторами напряжений в виде круговых отверстий» соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и ее автор, **Ермаков Иван Сергеевич** за разработку нового, уточненного метода расчета НДС композитных пластин с отверстиями и метода оценки их прочности заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

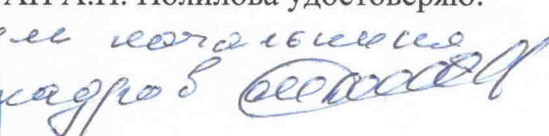
ОППОНЕНТ

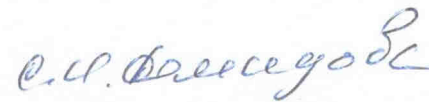
Доктор технических наук (шифр научной специальности 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела), профессор, главный научный сотрудник лаборатории безопасности и прочности композитных конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

 Полилов Александр Николаевич
23.09.2024

Подпись главного научного сотрудника лаборатории безопасности и прочности композитных конструкций ИМАШ РАН А.Н. Полилова удостоверяю:



 А.Н. Полилов

 А.Н. Полилов

Контактные данные оппонента:

тел.: +7 499 135 34 30; e-mail: polilovan@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела».

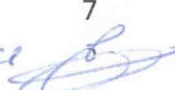
Адрес места работы: 101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, отдел «Прочность, безопасность и живучесть машин». Лаборатория безопасности и прочности композитных конструкций.

тел. дирекции: 8-495-628-87-30, e-mail: info@imash.ru , uchsecr@yandex.ru .

Я, Полилов Александр Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета, и на их дальнейшую обработку.



7

Сотзывом ознакомлен  Ермаков И.С. 27.09.2024