

## ОТЗЫВ

официального оппонента Одиноквой Ольги Анатольевны на диссертационную работу Васильева Алексея Сергеевича «Математическое моделирование и численное исследование композитных материалов в области предельной прочности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

### **Актуальность темы диссертации**

Активное применение композитных материалов в различных отраслях промышленности приводит к необходимости математического моделирования и численного исследования данных материалов в области предельной прочности, а так же конструкций из этих материалов в области их предельных состояний. В силу большой распространенности и разнообразия свойств композитов, возникает необходимость в изучении их механических характеристик. При этом механические свойства композитного материала зависят от механических свойств входящих в его состав материалов.

Сложность расчетов конструкций из композитных материалов часто обусловлена структурной неоднородностью данных материалов, а так же совместной работой различных по своим характеристикам материалов в составе композита, наличием инородных включений, газовых пузырей и технологических отверстий.

Вместе с тем для композитов удовлетворительного совпадения результатов расчета с данными экспериментов в ряде случаев достигнуть не удастся, а разброс этих данных часто перекрывает результаты «уточнения». При этом многие особенности реальных композитов пока не учитываются в современных методах анализа. Некоторые особенности структуры композита все же учитывают, но при качественном усложнении математической модели и проектирования геометрии объекта. Геометрические параметры структуры композита, такие как расположение армирующих элементов, размеры и форма их сечений часто носит случайный характер. При этом армирующие элементы и волокна могут быть искривлены вследствие несовершенства технологий изготовления материала.

В силу сложности, а зачастую и невозможности аналитических описаний явлений, происходящих внутри композитного материала при нагружении конструкции, возникает необходимость в использовании численных методов для исследования и расчетов композитных конструкций. Такие расчеты можно выполнять методом конечных элементов с применением шагово-итерационных процедур на базе общих принципов механики деформируемого твердого тела и численных методов решения физически нелинейных за-



дач. Это позволяет проследить за характером напряженно-деформируемого состояния конструкций на различных этапах нагружения, включая предельные, при этом информация о физической нелинейности материалов конструкции содержится в матрице жесткости системы.

В связи с этим представляет научный и практический интерес методика, математическая модель и численные алгоритмы, разработанные автором, для проведения численных исследований композитных материалов и конструкций на различных этапах их работы под нагрузкой. При этом, не смотря на существование множества подходов для исследования композитных материалов, единой методики для этого на настоящий момент нет. В связи с этим тема данной диссертационной работы является актуальной.

### **Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов**

К наиболее значимым результатам диссертационного исследования можно отнести следующие:

- \* Выполнена систематизация математических моделей критериев прочности материалов и конструкций. Данные критерии описаны в первой главе. Их анализ и систематизация выполнены автором во второй главе диссертационного исследования.
- \* Разработана новая математическая модель, включающая аппроксимацию функциональных зависимостей диаграмм деформирования материалов в составе композита, а так же матрицу жесткости физически нелинейного композитного конечного элемента. Функциональные зависимости для диаграмм деформирования материалов приводятся в третьем разделе третьей главы. В четвертом разделе третьей главы представлена математическая модель на основе матрицы жесткости нелинейного композитного конечного элемента.
- \* Разработаны численные процедуры и спроектирован программный комплекс, реализующий представленную автором математическую модель на основе МКЭ. Программный комплекс содержит четыре программы, алгоритмы которых представлены и описаны в четвертой главе. Комплекс программ зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ.
- \* Предложена методика исследования НДС конструкций из композитных материалов в области предельной прочности, с учетом изменения механических характеристик этих материалов в результате нагружения в составе композита. Механизм действия методики описан в первом разделе шестой главы.
- \* Предложена и применена идея комбинирования объемов для определения приведенных механических характеристик при вычислении матрицы жестко-



сти композитного конечного элемента. Следует заметить, что при использовании данной идеи, количество материалов в составе композитного конечного элемента может быть достаточно большим.

\* Получены оригинальные результаты расчетов по математической модели данной диссертации, основанные на методе конечных элементов и разработанной автором матрице жесткости нелинейного композитного конечного элемента. В пятой главе выполняется тестирование предложенной методики, математической модели и программного комплекса, сравнение полученных результатов с экспериментальными исследованиями и расчетами для статически определимых конструкций. В шестой главе выполнено исследование статически неопределимой рамы из композитного материала.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, сформулированных в диссертации**

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, сформулированных в диссертации Васильева А.С., подтверждается корректным использованием численных методов, математического моделирования, оригинальных вычислительных алгоритмов для решения линейных и физически нелинейных задач численного исследования композитных материалов и конструкций. Обоснованность научных исследований так же подтверждается аналитическими и тестовыми результатами, результатами решения задач методом конечных элементов и сопоставлением результатов известных решений с результатами, полученными автором. Предложенные автором модели решения задач имеют допустимую погрешность.

Необходимо отметить так же реализацию разработанной методики и математической модели с помощью алгоритмов и программного обеспечения, разработанного автором, а так же достаточный объем теоретических и численных исследований.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается полученными результатами вычислительных экспериментов, аналитических и численных исследований при сопоставлении с экспериментальными исследованиями и расчетами в различных известных программных продуктах. Автором диссертационной работы выполнена апробация полученных результатов на конференциях и семинарах, в опубликованных работах и авторских свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ.

### **Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики**

Научная значимость диссертационной работы заключается в развитии исследований композитных материалов в области предельной прочности и кон-



струкций из этих материалов в области их предельных состояний. Автором предложена математическая модель, позволяющая сочетать в пределах конечного элемента достаточно большое число материалов с учетом нелинейности механических характеристик этих материалов. Предложенная математическая модель и методика могут быть успешно использованы при расчете различных конструкций из композитных материалов.

Практическая значимость результатов заключается в приведенных аппроксимационных зависимостях диаграмм деформирования материалов и разработанной матрицы жесткости нелинейного композитного конечного элемента. Данная матрица жесткости основана на идее комбинирования объемов всех материалов, входящих в состав конечного элемента.

Результаты исследований, а так же разработанные и зарегистрированные в Роспатенте программы для ЭВМ, представляют интерес и могут быть использованы в организациях, занимающихся проектированием и расчетом конструкций из композитных материалов

#### **Соответствие диссертации указанной специальности**

В диссертации получены оригинальные результаты одновременно в трех областях: математического моделирования, численных методов и комплексов программ. Разработана методика исследования напряженно-деформированного состояния конструкций из композитных материалов в области предельной прочности, с учетом изменения механических характеристик этих материалов в результате нагружения конструкции. По данной методике, для конструкции из композитного материала, смоделированной объемными конечными элементами при простых напряженных состояниях, расчетным путем можно определить напряженно-деформированное состояние на различных этапах нагружения, вплоть до предельного.

Диссертация «Математическое моделирование и численное исследование композитных материалов в области предельной прочности» соискателя Васильева Алексея Сергеевича, соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам паспорта специальности:

1. разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий;
2. реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента;



3. комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

### **Общие замечания и вопросы по диссертационной работе**

1. Матрица жесткости, разработанная автором, может учитывать работу достаточно большого количества материалов в составе конечного элемента. Однако в тестовых расчетах рассматриваются конструкции из композитного материала, имеющего в своем составе лишь два материала. Хотелось, чтобы автор применил данную матрицу жесткости для конечного элемента с действительно большим числом различных материалов. При этом не учитывается ориентация материалов внутри композитного конечного элемента, что, несомненно, является недостатком данной матрицы жесткости. Учет вышеперечисленных положений может оказать влияние на результаты при решении ряда задач расчета конструкций из композитных материалов.

2. Большинство расчетов, в том числе все расчеты в нелинейной постановке, выполнены для материала железобетона. Возникает разумный вопрос, почему именно железобетон использовался автором для проверки разработанной им математической модели и методики.

3. Методика и математическая модель, используемые автором, не позволяют учитывать адгезию, работу армирующих элементов между трещинами, и другие сложные эффекты, возникающие в композитных материалах при разрушении конструкции.

4. На странице 111 вертикальные перемещения балки  $v_0$  почему-то обозначено большой буквой, как автором обозначался объем  $V$ . На страницах 18, 22, 125 наблюдаются орфографические ошибки в словах.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Несмотря на приведенные замечания, диссертация выполнена на актуальную тему и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные решения линейных и физически нелинейных задач исследования композитных материалов в области предельной прочности и расчета конструкций из этих материалов. Выводы и рекомендации, а так же результаты исследований, полученные в данной диссертации, обоснованы и имеют практическое значение.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточно апробацию на научных семинарах и научно-технических конференциях, в том числе международных. По теме диссертационной работы опубликовано 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК,

3 статьи в материалах и трудах конференций, 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В автореферате и публикациях соискателя в полной мере отражено содержание диссертации, а так же наиболее существенные положения, выводы и рекомендации.

Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и рекомендации по использованию полученных результатов и научных выводов, считаю, что диссертация отвечает всем требованиям положения ВАК о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Васильев Алексей Сергеевич заслуживает присуждения искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент  
доктор технических наук, доцент  
ОДИНОКОВА Ольга Анатольевна,  
профессор кафедры «Промышленное  
и гражданское строительство»  
ФГБОУ ВО  
«Тихоокеанский государственный  
университет (ТОГУ)», г. Хабаровск

Одинокова Ольга Анатольевна \_\_\_\_\_

Дата 28.03.2016

Подпись О.А. Одиноковой подтверждаю:

Начальник отдела кадров ФГБОУ ВО ТОГУ \_\_\_\_\_

Маилова Е.В.

680042 г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 136

Телефон 8-909-878-72-40

e-mail: odi37@mail.ru