

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19  
по диссертации Феклистовой Евгении Вячеславовны  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Моделирование процессов разрушения деформируемых тел: принципы алгоритмизации и анализ закономерностей» по научной специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите «17» декабря 2024 г. (протокол заседания № 8) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.19, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от «06» апреля 2022 г. № 35-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым - четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. N 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. N 1792-р.

Диссертация выполнена в Центре экспериментальной механики «Пермского национального исследовательского политехнического университета» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Вильдеман Валерий Эрвинович, заведующий кафедрой «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение», директор «Центра экспериментальной механики» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Официальные оппоненты:**

1. Сапожников Сергей Борисович, доктор технических наук 01.02.04: Механика деформируемого твердого тела, профессор, главный научный сотрудник кафедры технической механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

2. Федулов Борис Никитович, доктор физико-математических наук 01.02.04: Механика деформируемого твердого тела, профессор кафедры теории пластичности, ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

Сапожников Сергей Борисович и Федулов Борис Никитович являются специалистами в области численного моделирования и имеют публикации по специальности 1.2.2.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет", город Самара, отзыв ведущей организации утвержден Первым проректором – проректором по научной работе, доктором технических наук, профессором Ненашевым Максимом Владимировичем, заслушан на заседании кафедры «Прикладная математика и информатика» (протокол заседания № 4 от 12.11.2024) и подписан доктором физико-математических наук (01.02.04), профессором Радченко Владимиром Павловичем, Ученым секретарем ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», доктором технических наук Малиновской Юлией Александровной.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» выбран в качестве ведущей организации, поскольку тематика проведения исследований сотрудников данной организации соответствует представленной в работе теме и защищаемой области наук. На базе ФГБОУ ВО "СамГТУ" имеется диссертационный совет Д 212.217.03 на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

По теме диссертации соискателем опубликовано 17 научных трудов, в том числе 4 работы – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени и в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science, Scopus, соискателем получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах.

**Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:**

1. Вильдеман В.Э., Феклистова Е.В., Мугатаров А.И., Муллахметов М.Н., Кучуков А.М. Аспекты численного моделирования процессов разрушения упруго-хрупких тел // Вычислительная механика сплошных сред. – 2023. – Т. 16, № 4. – С. 420-429. DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.4.35 (БАК, SCOPUS) – (10/4)

*В работе приведены результаты сравнения численных решений задачи деформирования полосы из упруго-хрупкого материала с краевым концентратором напряжений, полученных с использованием различных алгоритмов. Построены расчетные диаграммы нагружения, продемонстрирована реализация критической стадии на макроуровне. Проанализирована кинетика процесса разрушения при*

*различной организации итерационной процедуры и разным количестве «разрушаемых» за итерацию элементов. Выявлено, что для более точного описания процесса деформирования и разрушения целесообразнее использовать автоматически подбираемую величину шага нагружения. Показано, что степень дискретизации расчетной области оказывает значительное влияние на результаты моделирования.*

*Вклад соискателя. Разработан и реализован на языке программирования APDL алгоритм, позволяющий моделировать процесс разрушения упруго-хрупкого тела, учитывающий различные особенности организации, проведение серии вычислительных экспериментов и их анализ совместно с научным руководителем Вильдеманом В.Э.*

2. **Feklistova E.V., Mugatarov A.I., Wildemann V.E., Agishev A.** Fracture processes numerical modeling of elastic-brittle bodies with statistically distributed subregions strength values // *Frattura ed IntegritaStrutturale*. – 2024. – Vol. 68, P. 325-339 DOI: 10.3221/LGF-ESIS.68.22 (WoS и SCOPUS) – (15/6).

*Представлены результаты вычислительных экспериментов по моделированию процессов разрушения упруго-хрупких тел с учетом статистического распределения значений пределов прочности структурных элементов. Проанализированы закономерности процесса разрушения при отсутствии распределения предела прочности. Рассмотрение процесса разрушения позволило выявить дополнительную несущую способность. Исследовано влияние диапазона распределения предела прочности на величину максимальной нагрузки, форму кривой нагружения и процессы накопления повреждений. Исследовано влияние размера концентратора напряжений на процесс разрушения.*

*Вклад соискателя. Создание программы для ЭВМ, визуализация результатов и их анализ совместно с научным руководителем Вильдеманом В.Э.*

3. **Feklistova E.V., Mugatarov A.I., Wildemann V.E.** Numerical study of the influence of the parameters of statistical distribution of the structural elements' ultimate strength on deformable bodies' fracture processes // *Frattura ed IntegritaStrutturale*. – 2024. – Vol. 70, P. 105-120; DOI: 10.3221/LGF-ESIS.70.06 (WoS и SCOPUS) – (16/7).

*Приведены результаты исследования влияния параметров статистического распределения предела прочности элементов конструкций на процессы разрушения деформируемых тел с концентраторами напряжений. Представлены диаграммы нагружения, поведение на макроуровне и кинетика процесса накопления повреждений с использованием различных законов распределения вероятностей и коэффициентов вариаций. Выявлены основные типы процесса накопления повреждений. Предложен подход, основанный на анализе решений краевых задач теории упругости для*

прогнозирования кинетики процесса разрушения, введены соответствующие параметры.

*Вклад соискателя. Разработка и реализация на языке программирования APDL дополнительной программы для вычисления параметров для прогнозирования типа накопления повреждений при разрушении упруго-хрупкого тела, проведение вычислительных экспериментов, визуализация и анализ результатов совместно с научным руководителем Вильдеманом В.Э.*

4. **Феклистова Е.В., Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э.** Численное исследование процессов разрушения деформируемых тел с концентраторами напряжений с учетом статистического распределения прочности структурных элементов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2024. – №4. – С. 70-83. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.07 (SCOPUS) – (14/8).

*На примере решения типовой задачи рассмотрено влияние геометрии концентратора напряжений и характерного размера конечного элемента на поведения тела на макроуровне, его несущую способность и кинетику процесса накопления повреждений. Показано, что увеличение размера концентратора напряжений приводит к снижению несущей способности тела, происходит качественное изменение вида зависимости максимальной нагрузки от коэффициента вариации значений пределов прочности с монотонно убывающей на немонотонную. Приведены результаты исследования кинетики процесса накопления повреждений. Отмечено, что рост среднеквадратического отклонения распределения пределов прочности конечных элементов приводит к изменению типа накопления повреждений с локализованного на дисперсный. Установлено отсутствие влияния размера концентратора напряжений на кинетику процесса разрушения.*

*Вклад соискателя. Проведении серии вычислительных экспериментов, визуализация и анализ результатов совместно с научным руководителем Вильдеманом В.Э.*

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024665735. Численное моделирование процесса разрушения упруго-хрупкого тела. Правообладатель: ПНИПУ (RU). Заявка №2024665244. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 05 июля 2024 г. / **Феклистова Е.В., Вильдеман В.Э.** – (Доля авторского вклада соискателя 75%)

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №202463004. Модуль учета деформационной анизотропии при численном моделировании процесса разрушения упруго-хрупкого тела. Правообладатель: ПНИПУ (RU). Заявка №2024682562. Дата гос. регистрации в Реестре программ для

ЭВМ: 02 октября 2024 г. / Феклистова Е.В., Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э. – (Доля авторского вклада соискателя 70%)

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024683014. Программа вычисления параметров для прогнозирования типа накопления повреждений при разрушении упруго-хрупкого тела. Правообладатель: ПНИПУ (RU). Заявка № 2024682714. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 03 октября 2024 г. / Феклистова Е.В., Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э. – (Доля авторского вклада соискателя 70%)

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана математическая модель для описания процесса разрушения твердых тел, учитывающая механизмы разрушения упруго-хрупких материалов с появлением анизотропии при частичной потере несущей способности, статистический разброс деформационных и прочностных характеристик, свойства нагружающих систем и позволяющая проводить анализ расчетных диаграмм нагружения и эволюции поврежденных зон;

разработан алгоритм численного решения физически нелинейных краевых задач, в котором реализованы: итерационная процедура пересчета напряженно-деформированного состояния при неизменных граничных условиях после редуцирования жесткости конечных элементов, дискретное нагружение с автоматическим выбором шага, выбор «разрушаемых» на каждой итерации конечных элементов, а также способ учета свойств нагружающих систем;

предложено и обосновано на основании проведенных вычислительных экспериментов описание закономерностей накопления повреждений в упруго-хрупких телах с учетом статистического распределения случайных прочностных характеристик элементов;

предложен способ оценки реализуемого типа накопления повреждений на основе численного решения краевых задач теории упругости.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы методы и подходы математического моделирования, механики деформируемого твердого тела, вычислительной механики, позволяющие получить качественно достоверные результаты исследования процессов разрушения упруго-хрупких материалов; изложена структурная схема организации алгоритмов численного моделирования процессов разрушения деформируемых тел: итерационная процедура пересчета напряженно-деформированного состояния, учет неодновременности разрушения

структурных элементов, выбор шага нагружение, физически обоснованная степень дискретизации области, способы учета свойств нагружающей системы, алгоритмы редуцирования жесткостей в критических поврежденных состояниях; изучены на основе результатов проведенных вычислительных экспериментов закономерности процессов деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел, связанные со статистическими характеристиками распределения и геометрией концентратора напряжений.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан подход к созданию эффективных алгоритмов численного моделирования процессов разрушения на основе представлений о кинетическом характере разрушения в условиях реализации квазиравновесного накопления повреждений, которые могут быть применены в научных исследованиях Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (г. Москва), Самарском государственном техническом университете (г. Самара), Пермском национальном исследовательском политехническом университете (г. Пермь), Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (г. Москва), и во многих других высших учебных заведениях, а также в учреждениях РАН: Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (г. Москва), Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского (г. Москва), Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре), Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь) и многих других научных и научно-исследовательских организациях, занимающихся родственными проблемами.

созданы и зарегистрированы пригодные для практического использования программы для численного моделирования процессов разрушения упруго-хрупких тел, учета возникновения деформационной анизотропии, расчета значений коэффициентов перегрузки в элементах структуры неоднородного тела.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

обоснованность результатов диссертационной работы определяется корректным применением современного математического аппарата механики деформируемого твёрдого тела, апробированных методов вычислительной математики и информационных технологий;

достоверность подтверждается качественным соответствием полученных результатов моделирования процессов разрушения экспериментальным и теоретическим данным других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в проведении анализа современного состояния проблемы моделирования процессов деформирования и разрушения твердых тел, особенностей организации алгоритмов, применительно к описанию данных процессов, разработке и реализации нового алгоритма (на языке программирования APDL) численного моделирования процессов разрушения, анализе результатов вычислительных экспериментов; интерпретации результатов и подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 декабря 2021 г. № 4334-В: в ней изложен и научно обоснован подход организации эффективных алгоритмов, имеющие важное значение для математического моделирования процессов накопления повреждений в элементах ответственных конструкций.

На заседании «17» декабря 2024г. диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Феклистовой Евгении Вячеславовне ученую степень кандидата физико-математических наук (протокол заседания № 8).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 14, против присуждения ученой степени – 0.

Председатель

диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

д-р физ.-мат. наук, профессор

  
(подп.)

\_\_\_\_\_/Трусов Петр Валентинович/

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

канд. физ.-мат. наук





\_\_\_\_\_/Кротова Елена Львовна/

«17» декабря 2024г.

М.П.