

САМАРСКИЙ
ПОЛИТЕХ
Опорный университет

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический
университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

ул. Молодогвардейская, 244,
гл. корпус, г. Самара, 443100
Тел.: (846) 278-43-11, факс (846) 278-44-00
E-mail: rector@samgtu.ru
ОКПО 02068396, ОГРН 1026301167683,
ИНН 6315800040, КПП 631601001

№ _____
На № _____ от _____


«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор –
проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Самарский
государственный

технический университет»,
физико-математических наук, профессор

 Ненашев М.В.

 _____ 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Феклистовой Евгении Вячеславовны
на тему «Моделирование процессов разрушения
деформируемых тел: принципы алгоритмизации и анализ закономерностей»,
представленную в диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19,
созданный на базе Пермского национального
исследовательского политехнического университета,
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

1. Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором изложена общая характеристика работы, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 148 наименований. Содержит 132 страницы текста, включая 44 рисунка и 3 таблицы, и приложения, содержащего копии свидетельств о государственной регистрации программ. По объёму и структуре работа соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней». Изложение диссертационной работы соответствует заявленной теме и подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность. Развитие методов повышения ресурса ответственных элементов конструкций и деталей машин, оценка их живучести в условиях накопления повреждённости и микродефектов требует развития и модификации методов математического моделирования напряжённо-деформированного состояния (НДС) с учётом процессов разрушения деформируемых материалов. Различные варианты «локальных теорий прочности», ориентированных на оценку критического состояния материала по силовым или деформационным критериям разрушения в конкретных точках объёма конструктивного элемента, не позволяют выполнить расчёты кинетики уже повреждённого элемента (его живучести). Краевые задачи с учётом повреждённости материала, а тем более с макродефектами типа трещин, не допускают аналитического решения и требуется использовать методы дискретной математики, в частности, метод конечных элементов. Однако с точки зрения алгоритмизации такого рода методик прочностного анализа требуется разработка новых подходов, включающих способы пошагового нагружения и итерационных процедур уточнения напряжённо-деформированного состояния в конечных элементах (КЭ) в связи с «выходом из строя» разрушившихся элементов, учёта неоднородности материала и стохастического характера распределения прочностных характеристик по объёму интегрирования, выбора характерного размера при дискретизации области, формирование комплекса критериев для оценки «работоспособности» КЭ и т.д. Поэтому возникает необходимость в определённой мере новой методологии математического моделирования, модернизации численных методов и их алгоритмизации для выявления достаточно тонких закономерностей для описания кинетики накопления повреждений и механизмов разрушения материала элементов конструкций.

Исходя из вышеизложенного, считаем, что выполненные исследования являются актуальными как с точки зрения дальнейшего внутреннего развития методов математического моделирования в области деформирования сред с повреждённостью, так и с точки зрения использования результатов в инженерной практике при разработке и использовании численных методов и алгоритмов для решения прикладных задач.

3. Научная новизна результатов и выводов. Прежде чем сформулировать элементы новизны, отметим следующий немаловажный факт. Работа носит междисциплинарный характер, поскольку для решения поставленных задач требуется комплексное применение положений механики деформируемого твёрдого тела, методов вычислительной математики,

частично – физики твёрдого тела (физики конденсированных сред), современных информационных систем с возможностью имплементации в них разработанных программных сред, привлечения методических и аппаратных средств для проведения численных исследований поставленных задач, методов обработки и анализа расчётных данных. Такая постановка задач собственно и является предметом исследований в рамках специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Если проанализировать заявленную научную новизну и положения, выносимые на защиту, то после изучения научного содержания диссертации можно отметить, что со всеми её пунктами просто нужно согласиться (но с учётом уточнений в формулировках в соответствии с замечаниями, пункт № 10), поэтому отметим лишь интегральные (укрупнённые) результаты исследований, обладающих, на взгляд специалистов СамГТУ, новизной.

Но сначала отметим следующий факт. После классических экспериментов, проведённых в 1813 г. Дюло (Duleau), впервые описавшем нерегулярности деформаций, наблюдаемые в процессе испытаний в режиме «жёсткого нагружения» (а именно такой режим рассматривается в диссертации), опубликованы десятки статей, в которых приводились новые экспериментальные данные о явлении прерывистости деформаций как на стадии упрочнения диаграммы деформирования, так и на стадии закритического деформирования (на ниспадающей её ветви). При «жёстком нагружении» задаётся история деформирования, а нагрузка является регистрируемой переменной (откликом на кинетику деформаций), что и приводит к появлению нерегулярностей (прерывистости) и для напряжений на диаграмме «напряжение — деформация» или «нагрузка — перемещение». Эти эффекты известны под названием эффекта Савара – Массона (Savart (1837 г.) — Masson (1841 г.)), а в дальнейшем этот эффект более известен как эффект Портвена – Ле Шателье (Portevin — Le shatelier (1923 г.)). При изучении этого экспериментального результата ему в основном давались «теоретические» обоснования с позиций физики твёрдого тела. Рецензируемая диссертационная работа — одна из первых математических работ в области механики деформируемого твёрдого тела, в которой сделана довольно успешная попытка построения новых математических моделей для описания эффектов прерывистости (сингулярности) на диаграмме деформирования с позиций механики разрушений на локальном уровне с учётом совокупности критериев

прочности, процессов разрушения неоднородной среды с появлением деформационной анизотропии на закритической стадии, статистического распределения прочностных характеристик материала, введением (хотя и дискуссионного характера) прочностной константы материала с размерностью длины и жёсткостных свойств нагружающей системы (применения «жёстких» испытательных машин). Именно в этом и состоит основная фундаментальная новизна работы в области математического моделирования — одной из компонент триады специальности 1.2.2. Здесь отметим, что в десятках публикаций их авторы пытались объяснить прерывистость диаграмм именно условиями применения «жёстких» испытательных машин, возможностями регистрирующей аппаратуры для измерения деформаций, её локальной неоднородности, фазовым составом материала (чистотой испытуемого материала) и другими свойствами, в основном физического характера.

В настоящее время у разработчиков коммерческих программных комплексов в области механики деформируемого твёрдого тела наблюдается повышенный интерес к задачам численного моделирования процессов разрушения, но все эти попытки укладываются в стандартные подходы, в основе которых лежат априорные варианты задания размеров КЭ, учитываются изменения всех параметров по объёму интегрирования с применением параметрических критериев разрушения. Однако при решении краевых задач предельного состояния (и особенно закритического деформирования) возникают чисто математические эффекты при численном решении краевых задач, не связанные с «физическими» постановками исходных краевых задач. Здесь можно отметить зависимость расчётных значений НДС от шага нагружения, чтобы избежать «лавинообразного» разрушения КЭ, тонкий учёт граничных условий в процессе кинетики накопления повреждённости и разрушения КЭ, влияние нагружающей системы в режиме «жёсткого» нагружения и т. д. Несмотря на использование диссертантом в качестве «решателя» пакета ANSYS с соответствующими процедурами для описания разрушения, соискателем разработан и реализован ряд новых вычислительных процедур и алгоритмов, совместимых с основным пакетом ANSYS, к которым относятся итерационная процедура пересчёта при неизменных граничных условиях напряжённо-деформированного состояния после редуцирования жёсткости конечных элементов путём организации

соответствующего итерационного алгоритма, алгоритмы выбора максимального числа «разрушаемых» за итерацию конечных элементов, величины шага нагружения, а также степени дискретизации расчётной области, учёта свойств нагружающих систем, возникновения анизотропии при частичной потере несущей способности, а также статистического разброса деформационных прочностных свойств материала. Поэтому ко второму компоненту специальности 1.2.2 — численным методам — вопросов не имеется, также как и к комплексам программ, которые реализуют новые вычислительные модули и алгоритмы, которые представлены в форме свидетельств о государственной регистрации представленных трёх программ для ЭВМ (хотя их описание и структура в диссертации и не описаны).

Несомненно, самостоятельную ценность представляют новые результаты численного решения краевых задач, из которых можно отметить оценку влияния коэффициента вариации статистического распределения прочностных констант элементов на вид диаграмм нагружения тела с концентратором напряжений и выделение трёх типов накопления повреждений: локализованного, рассеянного и смешанного; новые численные результаты, отражающие влияние концентратора напряжений и характерного размера конечного элемента на процесс разрушения неоднородного тела и другие, приведённые в выводах по главам и в заключении.

4. Соответствие паспорту научной специальности.

Рассматриваемая диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по следующим направлениям исследований:

– П.1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений (физико-математические науки).

– П.2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

– П.3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

– П.4. Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей.

– П.5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

5. Теоретическая и практическая ценность результатов. С точки зрения внутренней логической завершенности работы соискателем сделан существенный вклад в решение задач математического моделирования процессов разрушения сплошных сред и деформируемых элементов конструкций, разработке новых алгоритмов и программного обеспечения для их реализации, что подтверждается полученными тремя свидетельствами программ для ЭВМ. Собственное теоретическое значение имеют и результаты многочисленных расчётов на основе параметрического анализа поставленных задач.

С точки зрения внешней логической завершенности работы (связи с прикладными задачами) разработанный математический аппарат, алгоритмы, программное обеспечение обладают достаточно общим характером, поэтому имеют широкий спектр применения, например, в машиностроении при оценке живучести элементов конструкций и других областях исследований.

Очевидно, что все теоретические результаты будут полезны в научных исследованиях академических институтов, организациях Высшей Школы, отраслевых научно-исследовательских институтах, занимающихся подобными проблемами, и в инженерной практике промышленных предприятий.

6. Апробация работы и полнота опубликованных результатов. Основные положения рецензируемой работы в достаточной мере опубликованы в рецензируемых научных журналах и изданиях, включая публикации в журналах из перечня ВАК Минобрнауки и в высокорейтинговых (Q_2) изданиях из базы данных Web of Science и Scopus, материалах ряда Международных и Всероссийских научных конференций. Соискатель обладает 3 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Поэтому считаем, что рецензируемая диссертационная работа в достаточной мере опубликована и апробирована.

7. Диссертация и автореферат в основном написаны понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно полно, подробно раскрывает постановку, методы и результаты решения рассмотренных задач. Автореферат в целом отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

8. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций. Приведённые в диссертации теоретические результаты получены на основе корректного применения математического аппарата механики деформируемого твёрдого тела, апробированных методов вычислительной математики и информационных технологий, кроме этого, достоверность результатов подтверждается качественным соответствием полученных результатов моделирования процессов разрушения упруго-хрупких тел экспериментальным данным в этой области и результатам других авторов.

Полученные результаты не противоречат известным результатам в частных случаях и в определённой мере обобщают теоретические результаты, полученные ранее другими авторами.

9. Рекомендации по использованию результатов работы. Результаты диссертационной работы Феклистовой Евгении Вячеславовны могут быть использованы как в учебном процессе, так и в научных исследованиях Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (г. Москва), Самарском государственном техническом университете (г. Самара), Самарском национальном исследовательском университете им. С.П. Королёва (г. Самара), Тульском государственном университете (г. Тула), Пермском национальном исследовательском политехническом университете (г. Пермь), Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (г. Москва), Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов) 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 УрОРАН (г. Пермь) и многих других научных и научно-исследовательских организациях, занимающихся родственными проблемами.

10. Замечания по содержанию и оформлению работы. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. Тем не менее, по диссертационной работе Феклистовой Е.В. имеются нижеследующие замечания.

1. Название диссертационной работы слишком широкое, поскольку нигде не указаны ограничения на свойства деформируемых материалов, спектр которых достаточно широк: упругость, пластичность, вязкоупругость,

ползучесть. Диссертантом фактически исследованы лишь упруго-хрупкие материалы, в основном линейные, либо нелинейные, поскольку основные определяющие физические соотношения, связывающие напряжения и деформации, записаны в виде функциональной зависимости (2.3). При этом нелинейность в зависимости «напряжение–перемещение» в рассмотренных задачах связана либо со стохастическим распределением пределов прочности, либо с последовательным «выходом из строя» локальных конечных элементов (КЭ) и ослаблением эффективного сечения, воспринимающего нагрузку. Исходный же материал во всех задачах — упруго-линейный. Следовало бы во всех пунктах общей характеристики работы указать это, поскольку никакие неупругие материалы в диссертации не рассматривались. Это же относится и к выводам работы. Считаем, что это замечание нужно учесть при подготовке заключения по диссертационной работе.

2. Все результаты получены соискателем для одного и того же типа элемента конструкции: растягиваемой пластины с концентратором напряжений в форме полуэллипса, с детерминированными упругими механическими характеристиками либо со стохастически распределенными пределами прочности. Поэтому, строго говоря, все результаты носят частный характер применительно именно к этому конструктивному элементу. Как поведут себя алгоритмы, например, если в качестве концентратора использовать V-образный вырез с углом раскрытия один–три градуса, неизвестно. Поэтому с обобщением результатов на «все случаи жизни» нужно соблюдать осторожность. (Доказанное примерами нельзя считать полностью доказанным – Г.В. Лейбниц).

3. Дискуссионным является предположение о том, что характерный размер КЭ является прочностной характеристикой материала. Это все же не свойство материала, а свойство исследуемой конструкции с тем или иным концентратором. Здесь в конечных элементах, примыкающим к границе концентратора, возникает остро неоднородное напряженно-деформируемое состояние (НДС), и для разрушения КЭ необходимо применять осреднение НДС по его объему для включения этих осредненных данных в те или иные критерии разрушения материала этого элемента. Такой подход применяется в «нелокальных» (градиентных) теориях упругого/неупругого деформирования

опять же в целях осреднения НДС в выбранных характерных областях конструкции или материала (при учете его дискретного строения).

4. Судя по алгоритму этапов исследования (стр. 20, п. 8), нагружение образца (пластины) осуществлялось в режиме «жесткого» нагружения (задавалось перемещение в рамках выбранного шага нагружения) при бесконечно малой скорости нагружения, поскольку на каждом шаге нагружения итерационно уточнялась НДС и процессы разрушения КЭ. Но эффекты прерывистости деформаций/напряжений экспериментально не наблюдаются на диаграммах «напряжение–деформация», «нагрузка–перемещение» (по крайней мере при упругопластическом деформировании) как на стадии упрочнения, так и на стадии закритического деформирования, при больших скоростях нагружения $\dot{\varepsilon} = const$ или $\dot{u} = const$ (ε и u — деформация и перемещение, соответственно). Это еще один «ограничитель» для полученных результатов и выводов.

5. В выводах по разделу 3 (стр. 65) указано: «Выдвинуто предположение о наличии у материала параметра размерности длины, подбор (?) которого следует производить по результатам натуральных экспериментов для данного типа материала». Тогда возникают вопросы: какова методика определения этого параметра, какой тип определяющего эксперимента должен быть, осуществимо ли его определение в реальных условиях?

Здесь же (стр. 65) идет речь о реализации итерационной процедуры на каждом шаге до достижения устойчивого состояния. О какой устойчивости процесса (состояния) идет речь: математической (с соответствующим критерием устойчивости) или эвристической численной сходимости процедуры?

Аналогичная информация о «... достижении решением устойчивого состояния» приведена на стр. 43 диссертации и в других местах.

6. К сожалению, в диссертации отсутствует глава, посвященная разработанному программному обеспечению реализации вычислительных процедур и алгоритмов (платформа программирования, язык, структура и т.д.), что не позволяет оценить «внутреннюю» новизну программных продуктов с точки зрения информационных технологий и программирования. Считаю, что при представлении диссертационной работы в диссертационном совете этот вопрос нужно осветить.

7. Из диссертации не ясно, имелась ли возможность сравнительного анализа полученных диссертантом результатов с результатами из независимых источников и с экспериментальными данными (существуют ли такие данные для элементов конструкций с упруго-хрупкими материалами?).

8. Самарский государственный технический университет является ведущей организацией по диссертации, однако в диссертации отсутствуют ссылки на работы Самарской научной школы в области разрушения, разупрочнения на стадии закритического неупругого деформирования, моделирования кинетики накопления поврежденности в элементах конструкций с концентраторами напряжений типа произвольно ориентированных в пластине трещин (Астафьев В.И., Радаев Ю.Н., Степанова Л.В., Радченко В.П., Горбунов С.В. и др.).

Имеются в незначительном количестве опечатки, текстуальные неточности.

Разумеется, отмеченные недостатки носят частный характер и ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку работы Феклистовой Евгении Вячеславовны.

11. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаем, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Совокупность научных исследований можно классифицировать как разработку математического аппарата, алгоритмов численного решения и программного обеспечения для численного решения задач математического моделирования процессов разрушения и кинетики деградации материала элементов конструкций, что, в частности, имеет существенное значение для развития комплексных исследований в области деформируемых материалов и живучести элементов конструкций с использованием математического моделирования.

Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных теоретических результатов и вносит существенный вклад в теорию и практику математического моделирования.

Исходя из вышеизложенного, считаем, что диссертационная работа Феклистовой Е.В. «Моделирование процессов разрушения деформируемых тел: принципы алгоритмизации и анализ закономерностей» соответствует специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и

комплексы программ, имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года, требованиям п. 8-11 Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденного приказом ректора ПНИПУ от 28.05.2024 г. № 27-О, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор – Феклистова Евгения Вячеславовна – заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании кафедры «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета 12 ноября 2024 года (Протокол №4).

Отзыв подготовлен:

заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета,
доктор физико-математических наук (01.02.04),
профессор

Радченко
Владимир Павлович

Профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета,
доктор физико-математических наук (05.13.18),
профессор

Жданов Александр
Иванович

12 ноября 2024 года

Подписи Владимира Павловича Радченко и Жданова Александра Ивановича заверяю,

Ученый секретарь ФГБОУ ВО, «Самарский государственный технический университет»,
доктор технических наук,



Малиновская
Юлия Александровна

Служебный телефон:
8(846)3370443,
E-mail: radchenko.vp@samgtu.ru.

Служебный адрес:
443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244,
Главный корпус СамГТУ,
кафедра «Прикладная математика и информатика».