

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Яковлевой Екатерины Михайловны
на тему «Краевые задачи о смешанном нагружении тел с разрезами
с учетом накопления рассеянных повреждений в связанной постановке»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела

1. Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников из 160 наименований. Содержит 124 страницы текста, включая 55 рисунков и 18 таблиц. По объему и структуре работа соответствует требованиям «Положения» к оформлению диссертаций. Изложение диссертационной работы подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность. Состояние современного машиностроения, энергетического и аэрокосмического промышленных комплексов характеризуется увеличением нагруженности элементов конструкций при одновременном требовании снижения их материалоемкости, поэтому в ряд актуальных задач выдвигается проблема использования всех внутренних резервов сопротивления материалов в поле внешних нагрузок. Классические подходы, базирующиеся на критериальных зависимостях типа временного предела сопротивления и коэффициентах запаса (в строительной индустрии – 1,7, а в авиационной промышленности – 2,2÷2,5), не решают сформулированной задачи, поскольку дают представление лишь о начале процесса разрушения. Поэтому проблема описания закритической стадии деформирования с учетом рассеянного накопления повреждённости, в том числе и в окрестности трещин, в условиях нелинейного неупругого деформирования диктуется внутренний логикой развития соответствующего раздела механики деформируемого твёрдого тела в области развития методов построения реологических моделей разупрочняющегося материала и накопления повреждённости и их применения в краевых задачах механики разрушения. Диссертационная работа Е.М. Яковлевой в рамках этого направления посвящена определению напряжённо-деформированного состояния вблизи кончика трещины в материалах со степенным законом упрочнения на основе аналитического разложения полей напряжений и

деформаций в окрестности вершины трещины, а также решению аналогичной задачи в условиях «квазилинейные уравнения ползучести – повреждённость». Поэтому актуальность построения высших приближений асимптотических разложений, в определенной мере обобщающих результаты «классических» работ в этом направлении Дж. Хатчinsonа, Дж. Райса, Дж. Розенгрема и более поздние работы многих других авторов, в теоретическом плане не вызывает сомнений.

Актуальность тематики рецензируемой работы диктуется и внешней логикой развития данного раздела теорий пластичности и ползучести, обусловленной прикладными (инженерными) потребностями решения задачи сокращения материоемкости металлических изделий и продления их ресурса за счёт учета свойств разупрочнения материала, которое, как правило, в элементах конструкций локализовано в малых областях. Поэтому актуальность исследования критического деформирования элементов конструкций с различным углом наклона трещины и различными типами нагружения – безусловно востребованная с точки зрения практики проблема.

3. Основные результаты и научная новизна.

1. Основная заслуга диссертанта в научном плане состоит в разработке методологического подхода к реализации численного построения асимптотических решений класса краевых задач по определению напряжённо-деформированного состояния у вершины трещины, включая среды с повреждённостью, в самом широком спектре типов смешанного нагружения и различных углов наклона трещины для условий плоского деформированного и напряженного состояний на основе определяющих уравнений нелинейной теории упругости, теории пластичности (в рамках деформационной теории) и квазилинейных уравнений установившейся ползучести в комбинации с кинетическими уравнениями для скалярного параметра повреждённости. Все остальные ниже следующие результаты частного порядка являются следствием реализации этого подхода.

2. В главе 2 предложена новая постановка краевой нелинейной задачи со степенным законом упрочнения для определения собственных значений в вершине полубесконечной трещины в условиях трещины в условиях плоского деформированного состояния для смешанного нагружения бесконечного тела и реализован численный метод решения этой задачи. Предложенный метод позволяет теоретически найти весь спектр

собственных значений (вообще говоря, их бесконечное счётное множество), но диссертант здесь при разных видах смешанного нагружения (для типов деформирования от сдвига до чистого нормального отрыва), определил лишь одно собственное значение, отличное от классического, соответствующего задаче Хатчинсона – Райса – Розенгrena. Тем не менее, это позволило получить новые качественные результаты для полей напряжений, отличающиеся от известных.

3. В третьей главе впервые детально исследована задача о неподвижной трещине в среде с повреждённостью на основе квазилинейных уравнений установившейся ползучести и кинетического уравнения для параметра повреждённости в условиях смешанного деформирования, результатом которого является получение нового асимптотического решения. Это позволило найти новое асимптотическое поведение напряжений у вершины трещины в среде с повреждённостью, при этом установлено, что найденные новые собственные значения определяют асимптотику дальнего поля напряжений в связной задаче о трещине в среде с повреждённостью. Одним из важных результатов является то, что новая промежуточная асимптотика позволила Е.М. Яковлевой построить конфигурации полностью разрушенного материала при различных показателях степенной аппроксимации и значениях коэффициента смешанности нагружения.

Одним из важных результатов этой главы является следующее. На основе детального численного анализа соискатель установил, что если в качестве условия на бесконечности принять условие асимптотического сближения с известным решением Хатчинсона – Райса – Розенгrena (собственные значения $\lambda = \frac{n}{n+1}$), т.е. вне области активного накопления повреждений, решение выходит на асимптотику Хатчинсона – Райса – Розенгrena, то границы полностью разрушенного материала для двухчленного и трёхчленного асимптотических разложений параметра сплошности существенно различаются друг от друга и по форме и по геометрическим параметрам область, что немедленно позволяет сделать вывод, что разложения для функций напряжений Эри и параметра сплошности не имеют асимптотической природы. При найденных же автором диссертации новых собственных значениях, соответствующим областям с промежуточной асимптотикой напряжений, асимптотические

разложения для функций напряжений Эри и параметра сплошности приводят к границам области полностью разрушенного материала, сходящимся к предельному контуру, что убедительно проиллюстрировано результатами расчётов, приведённых на рис. 19–26 диссертационной работы.

Результаты, полученные на основе общей идеологии решения задач в главе 4 для плоского напряжённого состояния (смешанное нагружение тонкой пластины с разрезом), повторяют качественно основные выводы в главах 2 и 3, но реальные расчётные поля напряжений и области полностью разрушенного материала имеют свои особенности, которые можно увидеть из анализа рис. 27 – 46.

С этой точки зрения интересны новые результаты, представленные на рис. 42-45 диссертации, где соответствующие области полностью разрушенного материала для двучленного и трехчленного асимптотических разложений параметра сплошности близки по форме и размерам, чего не скажешь об этой же области для уточнённого решения Хатчинсона – Райса – Розенгrena (рис. 46 в диссертации) с «классическим» значением собственного значения задачи.

4. Следует отметить и результаты главы 5, где решены рассмотренные ранее нелинейные задачи для случаев плоского деформированного и плоского напряжённого состояния методом возмущений (методом малого параметра). Здесь докторант использовал разложения по малому параметру для показателя нелинейности n в степенном законе и функции $f(\theta)$, описывающей условие распределения напряжений, и как следствие – зависимости для компонент тензора напряжений. Установлена тенденция сходимости ряда для $f(\theta)$ с использованием членов по четвертой степени малого параметра для случая плоского деформированного состояния и до членов второй степени – для плоского напряжённого состояния к численному решению. С одной стороны, это даёт дополнительную положительную информацию о адекватности результатов расчёта численными методами, полученных в главах 2 – 4, а с другой, – даёт возможность быстрого и эффективного решения нелинейных задач на собственные значения объединением численного решения с асимптотическим подходом, поскольку численная реализация требует начального приближения.

Кроме отмеченных новых теоретических результатов в области методов решения краевых задач механики разрушения, полученные новые собственные значения рассматриваемых задач могут быть полезны при интерпретации экспериментальных исследований с точки зрения многомасштабного, многоуровневого описания процессов разрушения в окрестности вершины трещины.

В заключение отметим, что все сформулированные в автореферате и диссертации положения, выносимые на защиту, а также положения заключения отражают действительное содержание диссертационной работы и они аргументированы и с достаточной строгостью (в рамках принятых гипотез и ограничений) доказаны, хотя по их изложению имеются и замечания, о которых речь пойдёт ниже.

4. Достоверность результатов диссертации сомнений не вызывает. Основные положения диссертации в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленных диссертантом целей. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок «физических» и математических задач, непротиворечивостью полученных результатов существующим теоретическим и качественным результатам экспериментальных работ других авторов, строгостью использования основных положений механики деформируемого твёрдого тела, теории обыкновенных дифференциальных уравнений, асимптотического анализа, методов возмущений и вычислительных информационных технологий. Выполнено сравнение результатов численного решения с решениями, построенными методом малого параметра для ряда частных задач.

5. Теоретическая и практическая ценность. При анализе теоретической и практической значимости полученных результатов следует отметить, что с точки зрения внутренней логической завершенности работы диссертантом сделан серьёзный шаг в области механики разрушения материалов и конструкций с дефектами типа трещин в условиях нелинейного реологического деформирования, поскольку разработанный подход определения собственных значений рассмотренных задач и численная процедура решения краевых задач дают более глубокие результаты для распределения полей напряжений и области полностью разрушенного материала в области вершины трещины по сравнению с существующими методами решения аналогичных задач.

С другой стороны, с точки зрения внешней логической завершённости работы (ее связи со смежными отраслями науки и производством), очевидно, что полученные результаты имеют прозрачные пути использования, во-первых, при планировании соответствующих экспериментальных исследований и интерпретации полученных результатов, во-вторых, в инженерной практике при назначении ресурса конструкций, в которых имеются локальные зоны разупрочнения материала, в-третьих, расчётные данные, полученные в диссертационной работе, естественным образом пополняют и расширяют соответствующую базу расчётных данных при разных видах смешанного нагружения, которую можно использовать другими авторами для сравнительного анализа.

6. Апробация работы. Основные положения рецензируемой работы в достаточной мере опубликованы в научных журналах (в том числе, и в требуемом минимуме журналов из перечня ВАК, включая публикации в ведущих академических изданиях и изданиях из базы данных Web of Science) и в материалах ряда Международных и Всероссийских научных конференций (хотя тезисы докладов и не приведены в автореферате). Работа выполнялась в рамках проектов РФФИ и проектов Минобрнауки РФ по программе повышения конкурентоспособности ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева», которые проходят тщательную научную экспертизу при их одобрении, полностью она докладывалась на ряде научных семинаров в ведущих академических институтах и университетах Российской Федерации. Поэтому считаю, что рецензируемая диссертационная работа Е.М. Яковлевой в достаточной мере опубликована и апробирована.

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

8. Замечания по содержанию и оформлению работы. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. Тем не менее замечания по диссертационной

работе Яковлевой Е.М. можно квалифицировать как по оформлению диссертации, так и по существу работы.

По существу работы можно сделать следующие замечания.

1. С точки зрения теории дифференциальных уравнений (ДУ) переход от двухточечной краевой задачи (2.12), (2.13) (аргумент $-\pi \leq \theta \leq \pi$) к начальной задаче Коши (2.12), (2.14) некорректен, поскольку на самом деле, исходя из физических соображений о моделируемом процессе, привлекаются дополнительные условия (2.14) для искомой функции внутри интервала изменения аргумента при $\theta = 0$. Условия (2.14) не вытекают из граничных условий (2.13). Аналогично методу начальных параметров (который широко применяется для линейных ДУ) при сведении ДУ (2.12) к нормальной системе ДУ на границах при $\theta = \pm\pi$ возникают по 4 соотношения, связывающие искомую функцию и её первые три производных. В этой системе из 8 уравнений 4 неизвестные определены (они задаются (2.13)), а 4 – нет. Поэтому решение необходимо строить таким образом, чтобы в конечном итоге все эти 8 уравнений выполнялись. Диссертант же задаёт начальные данные в точке $\theta = 0$ и требует выполнения только двух условий типа $f(\theta = \pi) = 0, f'(\theta = \pi) = 0$ или $f(\theta = -\pi) = 0, f'(\theta = -\pi) = 0$.

Фактически диссертант получил переопределённую задачу и с точки зрения теории ДУ её можно отнести к классу так называемых нагруженных дифференциальных уравнений (по терминологии А.М. Нахушева), когда в области интегрирования накладываются дополнительные ограничения на искомую функцию в виде её следа на некотором множестве аргумента, с возникающими проблемами разрешимости, корректности и единственности решения.

Поэтому, по всей видимости, соискатель в диссертации построил лишь одно из возможных решений. Здесь же следует отметить, что в главе 5 показана сходимость решения по методу возмущений к численному решению именно начальной задачи Коши, которая поставлена в соответствие исходной двухточечной краевой задаче.

Тем не менее, построенные решения с точки зрения механики деформируемого твердого тела приемлемы, поскольку часть граничных условий выполняется.

2. Непонятно, почему на графиках для интенсивности напряжений $\sigma_e = \sigma_e(\theta)$ на рис. 1 автореферата (в диссертации этот график отсутствует) наблюдаются многочисленные разрывы первой производной от этой функции, хотя для компонент тензора напряжений единственный разрыв производной имеет лишь компонента $\bar{\sigma}_{rr}$, а остальные компоненты вообще не имеют разрыва первой производной.

3. К сожалению, текстуально заключения в диссертации и в автореферате не совпадают по форме подачи основных полученных результатов.

4. Хотелось бы выяснить, чем объясняется немонотонность рассчитанных собственных значений λ как функции от параметра смешанности нагружения M^P в таблицах 1–5 и некоторых последующих.

5. В автореферате отсутствует пункт «Положения, выносимые на защиту», но в диссертации он имеется и по приведённым позициям имеются замечания: при их формулировке нужно было акцентировать внимание на сами полученные результаты, а не на процесс их получения.

В этом пункте (и далее в диссертации) соискатель часто использует фразу «нахождение всего спектра собственных значений», но фактически найдено лишь одно собственное значение при каждом значении M^P , а в последних двух главах – 2-3 значения. Весь спектр собственных значений (а это бесконечное счётное множество) диссертант не построил. Другое дело, что разработанный метод теоретически позволяет это сделать!

6. Имеется некоторое логическое противоречие между построениями глав 2, 3 и 4. В главе 2 используются конечные нелинейные определяющие условия (к какой области исследования это относится, не поясняется: нелинейная упругость, деформационная теория пластичности?), в главе 3 сразу используются квазилинейные уравнения установившейся ползучести (в дифференциальной форме), в главе 4 – и те, и другие. Никаких пояснений выбора уравнений не даётся.

7. Имеются замечания по представленным графикам, которые выполнены с определённой небрежностью, что затрудняет их анализ. Например, что означают переменные X_1 и X_2 непонятно. Ни в подрисуночной подписи, ни в тексте диссертации никаких пояснений не имеется. На рис. 5–12 и далее по тексту диссертации в подрисуночных

подписях фигурирует напряжение σ_{ij} и по оси ординат $\tilde{\sigma}_{ij}$. Что они ($\tilde{\sigma}_{ij}$) означают, не поясняется. К тому же, по всей видимости, величины $\tilde{\sigma}_{ij}$ каким-то образом нормированы, но это также не поясняется. В связи с этим количественный анализ компонент тензора напряжений выполнить невозможно, доступен только анализ на качественном уровне. Что означают цифры на рис. 19-26, также непонятно и нет комментариев.

8. Соискатель зачастую без должного обоснования вводит некоторые гипотезы. Например, почему $f'''(\theta = 0) = 0$ в (2.14), $f''(\theta = 0) = 0$ в (2.15)? Многие формулы вообще не поясняются. Так, на стр. 60 указывается, что показатели степени в (3.29) связаны соотношением $s_3 - s_1 = 2(s_2 - s_1)$, но величина s_1 в (3.29) отсутствует. Для читателя совершенно неочевидно равенство $A_3 / A_1 = (A_2 / A_1)^2$ на стр. 60. Не соблюдается единая система обозначений. Так, для компонент напряжений могут использоваться разные обозначения типа σ_{rr} и σ_{RR} . Имеются немногочисленные опечатки в тексте диссертации.

Разумеется, отмеченные недостатки носят частный характер и ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку работы Е.М. Яковлевой.

9. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Диссидентом выполнено теоретическое решение ряда задач, в результате которых получены новые данные о закономерностях механического нелинейного поведения материала в области вершины трещины, приведены постановки и решения новых краевых задач механики разрушения, получен спектр новых собственных чисел, с использованием которых получены более общие результаты по сравнению с существующими на сегодняшний день.

Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных теоретических результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твердого тела.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа Е.М. Яковлевой «Краевые задачи о смешанном нагружении тел с разрезами с учетом накопления рассеянных повреждений в связанный постановке», является завершённым научным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне, соответствует специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» и имеет важное научное и практическое значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор – Екатерина Михайловна Яковлева – заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:
заведующий кафедрой
«Прикладная математика и
информатика» ФГБОУ ВО
Самарский государственный
технический университет,
доктор физико-математических
наук (01.02.04), профессор

Радченко Владимир Павлович

Подпись Владимира Павловича Радченко
заверяю

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

14 сентября 2016 года



Малиновская Ю.А.

Служебный телефон:
8(846)3370443
E-mail: radch@samgtu.ru

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