

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Келлера Ильи Эрнстовича

на тему «Особенности развития локализации деформации в металлах с существенной зависимостью от скорости деформации и их описание

в рамках теории вязкопластичности»,

представленную на соискание ученой степени доктора

физико-математических наук по специальности

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

1. Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников из 518 наименований. Содержит 330 страниц текста, включая 66 рисунков. По объему и структуре работа соответствует требованиям «Положения» к оформлению диссертаций. Изложение диссертационной работы подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность темы диссертации. Актуальность работы И.Э. Келлера обусловлена как внутренней логикой развития соответствующего раздела механики деформируемого твердого тела в области разработки методов исследования реологического поведения материалов, чувствительных к скорости деформации и порождающих ряд неклассических явлений и эффектов локализации вязкопластической деформации, и методов решения краевых задач с такого рода физическими уравнениями состояния, так и внешней логикой развития, обусловленной прикладными потребностями экспериментального исследования отмеченных выше материалов, да и чисто инженерными потребностями при использовании явления сверхпластичности. В частности, с точки зрения практики технологические задачи формообразования крупногабаритных изделий в режиме ползучести (сверхпластичности) с постоянными скоростями деформирования уже используются в современном

отечественном и зарубежном авиастроении. Например, до 50–70 % деталей корпуса самолёта в фирмах Boeing и Airbus формируются в режимах сверхпластичности. Однако строго теоретического обоснования управления силовыми и кинематическими параметрами такой технологии до настоящего времени не имеется. Причиной этого, в том числе, является и неполная разработанность этого теоретического раздела и методов описания многих тонких эффектов при деформировании с заданными законами скоростей деформаций. Поэтому разработка математической теории пластичности с аномальной реологией и аномальными модами локализации деформации; построение частных моделей вязкопластичности с заданной структурой и произвольными материальными параметрами или функциями, обеспечивающие группы симметрий уравнений механики; разработка методов классификации моделей вязкопластичности в соответствии с качественными особенностями локализации деформации и методов решения краевых задач на их основе безусловно является востребованной и актуальной задачей механики деформируемого твёрдого тела.

Актуальность тематики рецензируемой диссертационной работы подчёркивается тем, что практически в каждом номере журналов International Journal of Plasticity, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Acta Metallurgica и других имеются публикации, посвящённые моделированию процессов вязкопластического деформирования материалов на разных структурных уровнях (макро-, микро-, мезо- иnanoуровнях) и анализу локализации пластических деформаций.

3. Основные результаты и научная новизна. Предваряя детальный анализ полученных результатов и оценку их новизны, отметим, что дополнительная сложность описания затронутых диссертантом вопросов на макроуровне механики деформируемого твердого тела состоит в интегрировании знаний из физики твердого тела, металловедения, металлофизики для детального анализа процессов образования макропластической деформации. Сискатель в качестве основного подхода для раскрытия поставленных проблем сделал упор на математическую

теорию устойчивости процесса пластического течения (хотя это и не единственный подход).

Одним из положительных моментов диссертации является детальная «проработка» научной литературы отечественных и зарубежных ученых по тематике диссертации, дающей полное представление о состоянии проблемы.

Изложим основные элементы новизны работы.

1. Необходимо отметить, что введение функции $m(\ln \xi) = \partial \ln \tau / \partial \ln \xi$ позволило с позиций устойчивости детально исследовать качественные различия развития локализации пластической деформации при одноосном растяжении полосы в зависимости от знака m и с единых позиций проанализировать существующие критерии устойчивости А.А. Илюшина, А.Ю. Ишлинского, Е. Харта, а также подробно устанавливать области устойчивости (в том числе, с учетом жесткости нагружающей системы) в координатах «модули упрочнения для напряжений – параметр m ».

2. Новые результаты получены диссидентом в главе 3, в которой исследованы состояния материала, обеспечивающих условия существования разнообразных автомодельных решений, описывающих эволюцию свободной границы вязкопластической полосы в условиях её квазистатического растяжения. Используя слабо нелинейное приближение, заключающееся в выделении одного или нескольких параметров и представлении решения задачи в виде асимптотического ряда, И.Э Келлер учитывал физическую нелинейность уравнений состояния, обобщив тем самым существующие аналогичные подходы с линейными полевыми уравнениями (Д. Кортевег, Г. Де Фриз), хотя следует отметить, что все построенные решения справедливы лишь для степенной функции описания нелинейности $\tau \sim \xi$.

Тем не менее, получены следующие результаты: показано, что первый член асимптотического ряда возмущения свободной границы удовлетворяет уравнению параболического типа, описывающего быструю эволюцию этой границы; найдены автомодельные стационарные решения локализованного и распределенного характера в текущих лагранжевых переменных с указанием диапазона изменения параметра m , где эти решения реализуются, причем в

зонах локализации профиль границы имеет унимодальную или мультимодальную форму, а для одного значения t представляет собой шейку, ограниченную двумя сглаженными ступеньками; получены уравнения, описывающие медленную эволюцию свободной границы и позволяющие выяснить устойчивость найденных профилей.

3. Заслуживают быть отмеченными результаты, полученные при постановке задачи и её решении в «полноценno» нелинейной постановке (существенная зависимость $\ln \tau$ от $\ln \xi$ с локальной аномалией, в пределах которой может иметь место немонотонность и даже негладкость этой зависимости). Поскольку уравнения в нелинейной формулировке для достаточно широкого класса вязкопластических сред (кроме линейно-вязкой и идеально-пластической) исследованы лишь в некоторых частных случаях, диссертант рассмотрел запись полевых уравнений в терминах функции комплексного переменного, в изостатических координатах и в виде квазилинейной системы, что позволило ему выполнить полноценное аналитическое исследование, причем наиболее удобной формой для этого является запись в виде квазилинейной системы. Для неё соискатель выполнил групповую классификацию по произвольной материальной функции и нашел единственное (конечномерное) расширение точечных симметрий, выделяемое материальной функцией степенного вида (за исключением показателя степени ноль и единица). Для этого случая построена оптимальная система однопараметрических подалгебр, позволяющая определить разные классы инвариантно – групповых решений, и представлены некоторые формы решений, соответствующие представителям этих подалгебр. Аналогичные исследования выполнены и в пространстве R^3 .

4. Существенные результаты получены при исследовании интегрируемости однородной квазилинейной системы уравнений равновесия и совместности вязкопластической среды для случая плоской деформации (формулы (5.1) диссертации). Для решения этой задачи автор использовал геометрические методы, последовательно сводящие эту систему к нелинейной задаче на собственные числа и поиску полной интегрируемости

уравнений в характеристических координатах. Главным итогом здесь является установление нелинейных определяющих соотношений вязкопластичности с немонотонной зависимостью интенсивности напряжений от интенсивности скоростей деформаций, которые гарантируют максимальное расширение группы симметрий уравнений равновесия и совместности и существование бесконечного числа инвариантно – групповых решений. Данные соотношения могут представлять собой предельный случай моделей, описывающих автоволновые процессы при деформировании металлов, полимеров, горных материалов. Существование модели, обладающей полностью интегрируемой системой полевых уравнений, представляется важным для численного решения широкого круга краевых задач, а также нахождения некоторых автомодельных аналитических решений, описывающих существенно двумерные процессы распространения очагов локализации пластической деформации. Учитывая, что в научной литературе известны лишь два частных вида функции $\tau(\xi)$, обеспечивающих полную интегрируемость системы (5.1) (линейно-вязкая жидкость – $\tau = 2\mu\xi$ и идеально пластическое тело – $\tau = \tau_* = \text{const}$), полученные диссертантом результаты можно трактовать как существенное обобщение в решении проблемы полной разрешимости системы (5.1).

В заключение отметим, что все сформулированные в автореферате и диссертации положения, выносимые на защиту, а также положения заключения отражают действительное состояние диссертационной работы и они аргументировано и с достаточной строгостью (в рамках принятых гипотез и ограничений) доказаны.

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, апробированностью использованных математических методов их решения, непротиворечивостью полученных решений существующим теоретическим и экспериментальными работами других авторов.

В частных случаях обобщённые решения, полученные диссидентом И.Э. Келлером, совпадают с решениями других широкоизвестных ученых (А.А. Ильюшин, А.Ю. Ишлинский и другие). Кроме этого, некоторые теоретические исследования задачи (например, групповая классификация уравнений пункта 4.4.1 диссертации) исследовались дополнительно с помощью пакетов компьютерного моделирования, в результате чего теоретически изложенные результаты были подтверждены результатами компьютерных исследований.

5. Теоретическая и практическая ценность. При анализе теоретической и практической значимости полученных результатов следует отметить, что с точки зрения внутренней логической завершенности работы диссидентом сделан серьёзный шаг в области математической теории вязкопластичности с нелинейной немонотонной зависимостью напряжений от скоростей деформаций, характерной в частности для режимов сверхпластичности превращения, получение ряда новых аналитических решений для некоторых задач о распространении волн локализации вязкопластической деформации, физического обоснования моделируемых процессов и определённой систематизации возможных решений на основе группового анализа. Теоретические результаты являются определённым обобщением в математической теории пластичности материалов с реологическими свойствами.

С другой стороны, с точки зрения внешней логической завершённости работы (её связи со смежными отраслями науки и производством), очевидно, что полученные результаты имеют прозрачные пути использовании, во-первых, в планировании соответствующих экспериментальных исследований и интерпретации полученных результатов, во-вторых, при численном моделировании процессов формообразования изделий в условиях сверхпластичности (ползучести) при минимальных силовых нагрузках в режиме «жёсткого нагружения» (при заданных скоростях деформаций или перемещений): обработка металлов давлением, формообразование корпусных деталей в авиастроении – об этом речь шла выше – и другие технологии.

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) и в материалах ряда. Международных и Всероссийских научных конференций. Работа выполнялась в рамках проектов РФФИ, проектов Минобрнауки РФ в области фундаментальных исследований РАН, госконтрактов Минобрнауки РФ и грантов Правительства РФ, которые проходят тщательную научную экспертизу при их одобрении, и докладывалась на ряде научных семинаров в ведущих академических институтах гг. Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Перми. Поэтому считаю, что рецензируемая диссертационная работа И.Э. Келлера 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 И.Э. Келлера можно квалифицировать как по оформлению диссертации, так и по существу работы.

По существу работы можно сделать следующие замечания.

1. Во-первых, следует отметить излишне большой объем введения и первой (вводной) главы, которые занимают почти треть диссертации, а также огромное число работ в библиографическом списке (518 наименований!), которые приведены на 50 страницах, так что объем первой главы вместе со списком литературы занимают почти половину диссертационной работы. При этом автор включил в обзор и работы с его участием, причем без комментариев новизны полученных в них результатов. Кроме этого, и первые два параграфа главы 2 (стр. 107–116) носят также обзорный характер. Поскольку цели главы 2 в ее начале не сформулированы, рецензенту

приходится с большим трудом находить начало собственных исследований диссертанта.

2. При исследовании процессов устойчивости однородного одноосного деформирования в условиях растяжения диссертант волевым решением на основное движение полосы (идеальный прямоугольный контур) накладывает симметричное геометрическое возмущение на свободную от нагрузок границу. Однако возникает вопрос: каким образом физически может реализоваться возмущение свободной границы в эксперименте при строго калиброванных геометрических параметрах плоского образца и прикладываемых силовых факторах? Тем не менее экспериментаторы наблюдают исследуемые диссертантом теоретические эффекты. Логичнее было бы решать эту задачу, исходя из того, что в условиях сверхпластичности (высокотемпературной ползучести) наблюдается большой разброс реологической деформации (по мнению Ю.Н. Работнова, разброс для скорости деформации ползучести в 20-50% – это нормальный результат для экспериментальных данных). И эта неоднородность деформации и приводит к возмущению свободных границ, которое возникает естественным «физическим» образом при растяжении пластины.

3. Некоторые задачи, поставленные диссидентом и сведённые к разрешающим уравнениям, не доведены до логического конечного результата (построения решения) либо исследованы частично (пункты диссертационной работы 3.2, 4.1.2, 4.2.3, 4.2.4, 5.5.3).

4. К сожалению, диссидент обошёл (в полном объёме) вниманием проблемы применимости полученных результатов к построению реологических соотношений на феноменологическом уровне (например, идентификацию параметров). Например, при исследовании динамики автоволновой системы (пункт 5.7.1, стр. 256 диссертации) с математической точки зрения для существования стационарного решения уравнения релаксационных колебаний требуется наличие сингулярности на кривой зависимости напряжения от скорости деформаций, схематический вид которой приведён в диссертации на рис. 5.10. Однако такой вид феноменологической кривой в реальности вряд ли возможен. Остается за

кадром вопрос применимости разработанных подходов и методов к решению краевых задач для материалов с явной зависимостью характера деформирования от скорости деформации, насколько эти подходы «технологичны» с точки зрения механики деформируемого твёрдого тела в условиях неоднородного напряжённого состояния и перераспределения напряжений. Здесь же уместно отметить, что не совсем удачно использован термин «вязкопластичность». На самом деле диссертант исследовал нелинейное течение (хотя и аномальное) пластического материала, поскольку учитывалось гидростатическое давление и не учитывались упругие деформации.

Имеются замечания по оформлению диссертационной работы и автореферата и «подаче» материала.

5. Научную новизну результатов в автореферате и диссертации нужно было подать «концентрировано», чётко, по пунктам, а не размыто и пространно. Перечисление краткого содержания диссертации по главам во введении самой диссертации излишне, это прерогатива автореферата. Некорректность фразы на стр. 6 автореферата: «Достоверность результатов обеспечивается **анализом** существующих экспериментальных и теоретических работ по теме диссертации, **обсуждением результатов работы на профильных семинарах...**» не требует подробных комментариев. Уже на стр. 8 автореферата в положениях, выносимых на защиту, диссертант использует класс «*N*-образных функций», однако понять, что они из себя представляют, можно только после прочтения диссертации.

6. Отметим технические неточности. Рисунки 1.3–1.5 на стр. 36, 37 диссертации практически не прокомментированы; непонятно, что означают параметры D , D_0 , x , из-за низкого качества рисунков неясен индекс у величины ε и что означают значения этой величины. Диссертант не всегда придерживается одних и тех же обозначений. Так на стр. 113 одно и тоже обозначение n используется и для номинального напряжения и для показателя степени в законе упрочнения $\sigma = a\varepsilon^n$. Разные обозначения используются для границы области в статических и кинематических граничных условиях: в формулах (4.2) и (4.3) $w = w(x, t)$, а ранее в формулах

(1.68), (1.69) – $g = g(\bar{x}, t)$; неудачное обозначение для производной по времени $\left(\frac{\delta b}{b}\right)^*$ на стр. 114, и аналогичное – на стр. 126.

Имеются некоторые опечатки, например, «клаплас скорости» (стр. 99), а на стр. 149 диссертант ссылается на известное решение С.Н. Аристова, но не указал работу, в которой оно приведено.

Разумеется, отмеченные недостатки носят частный характер и ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку работы И.Э. Келлера.

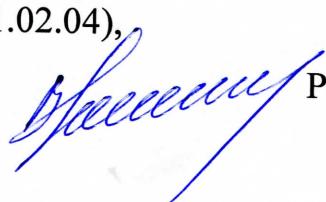
9. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Диссидентом решен ряд важных проблемных задач моделирования процессов неупругого деформирования и построения физических определяющих уравнений вязкопластических материалов с существенной (в том числе, немонотонной) зависимостью напряжения от скорости деформации и получены решения ряда краевых задач для таких материалов, обобщающих известные частные решения. Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объёме полученных теоретических результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твердого тела.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа И.Э. Келлера «Особенности развития локализации деформации в металлах с существенной зависимостью от скорости деформации и их описание в рамках теории вязкопластичности» 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. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук ВАК Минобрнауки, а её автор – Илья Эрнстович Келлер – заслуживает

присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

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

 Радченко В.П.

Подпись В.П. Радченко заверяю

Ученый секретарь СамГТУ

доктор технических наук

профессор

 Деморецкий Д.А.

5 ноября 2014 года



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»