

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Панченко Галины Леонидовны «Процессы интенсивного формоизменения материалов со сложными термомеханическими свойствами», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация Г.Л. Панченко посвящена анализу напряженно-деформированного состояния тел, изготовленных из материалов со сложными термомеханическими свойствами (упругопластических, термоупругопластических, вязкоупругопластических и термовязкоупругопластических материалов). Существенной особенностью работы является постановка и решение задач с учетом нелинейных эффектов, обусловленных большими обратимыми и необратимыми деформациями.

Актуальность темы диссертации определяется потребностями современной металлургии и машиностроения в адекватных результатах математического моделирования технологических процессов, сопровождающихся интенсивным необратимым формоизменением элементов конструкций. Промышленные технологии изготовления элементов конструкций требуют проведения предварительных теоретических расчетов для прогнозирования результатов технологических операций. Для того, чтобы обеспечить высокую точность таких расчетов, необходимо обеспечить хорошее соответствие термомеханических свойств материалов, используемых при расчетах, их реальному поведению. Этим объясняется необходимость учета пластических и вязких свойств материалов при моделировании, учета нелинейных эффектов, обусловленных большими деформациями, учета взаимовлияния тепловых и механических процессов.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

- разработана математическая модель для описания напряженно-деформированного состояния тел, изготовленных из упругопластических,

термоупругопластических, вязкоупругопластических и термовязкоупругопластических материалов, при больших деформациях;

- сформулированы и решены при больших деформациях новые краевые задачи о прямолинейных вязкопластических течениях материалов в телах, имеющих форму полых цилиндров, с учетом возможного проскальзывания в окрестностях ограничивающих их поверхностей;

- получены при больших деформациях решения связанных задач о неизотермическом вязкопластическом деформировании плоских слоев, деформировании цилиндрических тел при движении в жесткой круглой трубе (включая решение при наличии слоя смазки) и при движении цилиндрического слоя, заключенного между двумя жесткими поверхностями, с учетом тепловыделения, обусловленного трением и вязкопластическими свойствами материалов;

- получено решение связанной краевой задачи о больших деформациях слоя из термовязкоупругопластического материала, расположенного на наклонной плоскости, под действием силы тяжести с учетом изменения температуры его свободной поверхности.

- решена связанная задача о деформировании пробки конечной длины, изготовленной из термовязкоупругопластического материала, в круглой трубе под действием изменяющегося со временем перепада давления для случаев жесткого сцепления со стенкой трубы и проскальзывания в окрестности стенки трубы;

- решена задача о больших радиально-симметричных деформациях полого вязкоупругопластического шара под действием давления, приложенного к внутренней границе;

- разработаны численные алгоритмы, позволяющие получить решение связанных задач термовязкоупругопластичности в меняющихся со временем областях деформирования;

- разработаны подходы к расчету остаточных напряжений для указанных задач.

Практическая значимость результатов диссертации определяется возможностью применения полученных результатов к предсказательному моделированию технологических операций обработки материалов давлением (прокатка, волочение, штамповка, прессование). Перспективным представляется использование полученных результатов для верификации программных комплексов конечно-элементного прочностного анализа.

Достоверность результатов диссертации определяется использованием апробированных корректных подходов механики и термодинамики деформируемых сплошных сред, апробированных численных и аналитических методов решения краевых задач.

Диссертация прошла апробацию на международных и Всероссийских научных мероприятиях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Структура и содержание диссертации. Диссертация Панченко Г.Л. содержит 338 страниц и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 282 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, описана степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи исследования и новизна, приведены теоретическая и практическая значимость результатов работы, а также представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит вывод соотношений неизотермической математической модели больших деформаций для материалов, которые одновременно обладают упругими, пластическими и вязкими свойствами. Вязкие свойства материалов учитываются как на стадии пластического течения (вязкопластичность), так и на стадии, ему предшествующей и при разгрузке (ползучесть).

Тензор полных деформаций Альманси представляется как нелинейная комбинация двух симметричных тензоров обратимых и необратимых деформаций. Выводятся уравнения переноса (изменения) для этих тензоров. Из закона сохранения энергии получен аналог формулы Мурнагана, связывающий

напряжения с обратимыми деформациями. Из уравнения баланса энтропии выводятся уравнения теплопроводности, имеющие различный вид в областях обратимого деформирования, в областях разгрузки и в областях необратимого деформирования.

С принятием гипотезы о независимости свободной энергии от необратимых деформаций проведена конкретизация модельных соотношений для изотропных сжимаемых и несжимаемых материалов. Выписаны разложения упругого потенциала в ряд Тейлора по инвариантам тензоров деформаций и температуре. Это позволило получить формулы для напряжений в различных случаях: для обратимого деформирования, для областей с необратимыми деформациями и разгрузки.

Необратимые деформации не разделяются на отдельные составляющие, по-разному задается источник в дифференциальном уравнении их изменения. Скорости деформаций ползучести определяются из степенного закона ползучести Нортона, а скорости пластических деформаций – из ассоциированного закона пластического течения. Поверхность нагружения может задаваться классическими условиями (Треска, Мизес, Ивлева) или их обобщениями на вязкопластический случай. Важным является условие непрерывности скоростей необратимых деформаций на упругопластической границе, где механизм меняется с ползучести на пластичность и наоборот.

Во второй главе в рамках модели больших деформаций получены численно-аналитические решения изотермических краевых задач о деформировании упруговязкопластического материала, находящегося в зазоре между двумя жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями с возможным проскальзыванием у контактных поверхностей. Рассматриваются четыре типа задач. В первых двух анализируются случаи, когда проскальзывание материала происходит только на внутренней или только на внешней поверхности, а деформирование материала происходит при прямолинейном движении одного из цилиндров. В третьем, более сложном варианте, проскальзывание допускается сразу на обеих границах при движении одной из поверхностей. Во всех этих

случаях при возрастающей скорости движущейся поверхности рассмотрено упругое деформирование, возникновение и развитие у внутренней границы области вязкопластического течения, течение материала при постоянной скорости цилиндра, а также торможение течения и разгрузка при равнозамедленном движении граничной поверхности.

Четвертая задача отличается тем, что деформирование материала вызывается не движением одного из цилиндров, а изменяющимся градиентом давления. Особенностью этого случая является то, что касательное напряжение представляет собой сумму двух различных степенных функций радиуса. Это приводит к качественно новому поведению: пластическое течение может начинаться у обеих граничных поверхностей, формируя две области течения, разделенные упругой зоной. В этом случае подробно прослеживается развитие областей течения при возрастающем и постоянном градиенте давления, торможение течения при убывающем градиенте, заканчивающееся разгрузкой и расчетом остаточных деформаций и напряжений.

В третьей главе рассматриваются связанные задачи о больших деформациях, в которых процессы деформирования и теплопередачи неразделимы. Основное внимание уделяется учету нагрева материала, вызванного как внутренним трением при вязкопластическом течении, так и внешним трением о жесткие поверхности. Предел текучести материала принимается зависящим от температуры, что делает задачи существенно нелинейными.

Получено решение краевой задачи о сползании тяжелого упруговязкопластического слоя по наклонной плоскости под действием собственного веса и нагрева его верхней границы. Показано, что вязкопластическое течение зарождается на нижней границе слоя.

Получено решение задачи о чистом сдвиге горизонтального слоя, нагружаемого касательным напряжением на верхней границе. Процесс включает этапы упругого деформирования при условии прилипания и проскальзывания материала на нижней границе с нагревом от трения, зарождения и развития

вязкопластического течения. Рассмотрены течение и его торможение при постоянном и убывающем напряжении, разгрузка и охлаждение материала.

Приводятся решения задач о движении материала в круглой трубе, материала со смазкой в круглой трубе и слоя материала, расположенного между двумя жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями, под действием переменного градиента давления. Нагрев происходит за счет трения о граничные поверхности. Исследованы этапы упругого деформирования, возникновения и развития областей вязкопластического течения, а также последующее торможение течения при уменьшении градиента давления и остывание.

Рассмотрено деформирование материала в зазоре между двумя цилиндрами при движении внешнего цилиндра. Нагрев возникает из-за трения о внутреннюю, а затем и о внешнюю стенку. Исследованы зарождение и развитие вязкопластического течения у внутренней стенки при возрастающей и постоянной скорости цилиндра, развитие течения и его торможение при снижении скорости движения цилиндра, разгрузка и остывание.

Для решения задач использовался конечно-разностный метод.

В четвертой главе рассматриваются процессы интенсивного деформирования материалов, в которых необратимые деформации могут накапливаться как за счет медленной ползучести, так и за счет пластического течения.

Получено решение изотермической краевой задачи о деформировании цилиндрического слоя материала, расположенного между двумя коаксиальными жесткими цилиндрами. Внутренний цилиндр движется с переменной скоростью (равноускоренно, затем с постоянной скоростью, затем равнозамедленно до остановки), внешний закреплен. Сначала необратимые деформации накапливаются за счет ползучести. При достижении напряженным состоянием поверхности нагружения на внутренней стенке зарождается область вязкопластического течения, которая расширяется вглубь материала. Исследовано движение упругопластической границы, разделяющей области с разными механизмами необратимого деформирования. После остановки цилиндра наблюдается релаксация напряжений.

Рассмотрена задача о деформировании тяжелого слоя на наклонной плоскости. Свободная поверхность слоя нагревается, затем температура поддерживается постоянной, а потом слой остывает. Перед вязкопластическим течением материал накапливает необратимые деформации ползучести. Зависимыми от температуры полагаются предел текучести, коэффициент вязкости и параметры ползучести материала.

Получено обобщение предыдущей задачи на случай одновременного действия тепловой и механической нагрузок (сжимающей и сдвиговой) на верхней границе слоя. Из-за механического нагружения вязкопластическое течение начинается не на нижней, а на верхней границе слоя.

Исследовано деформирование материала, образующего пробку конечной длины в круглой трубе, под действием переменного перепада давления. Рассмотрены два варианта граничных условий на стенке: жесткое сцепление и проскальзывание с трением и нагревом. Во втором случае течение начинается раньше, материал разогревается сильнее, и упругопластическая граница продолжает расти даже при постоянном перепаде давления.

Получено решение изотермической задачи о деформировании полого шара под действием всестороннего гидростатического сжатия. Необратимые деформации первоначально накапливаются за счет ползучести. При достижении напряженным состоянием поверхности нагружения от внутренней границы начинает расти область вязкопластического течения. Исследованы этапы роста этой области при увеличивающемся и постоянном давлении, торможение течения при снижении давления до нуля. Рассчитаны распределения необратимых деформаций, перемещений и остаточных напряжений, а также исследована их релаксация после полной разгрузки.

Пятая глава посвящена исследованию процессов деформирования материалов, обладающих упругими, пластическими и вязкими свойствами, но, в отличие от предыдущих глав, здесь рассматриваются малые деформации.

Рассмотрена задача о сжатии и сдвиге тяжелого сжимаемого слоя упругопластической или упруговязкопластической среды. Использовались

различные условия пластичности, также обобщенные на случай учета вязких свойств.

В случае, когда накапливаемые материалом необратимые деформации могут быть как деформациями ползучести, так и пластического течения, рассмотрено деформирование толстостенной цилиндрической трубы под действием внутреннего давления с использованием кусочно-линейного потенциала ползучести и деформирование полой сферы в условиях всестороннего гидростатического сжатия в случаях идеального пластического и вязкопластического течений.

Исследовано повторное нагружение толстостенной трубы из упруговязкопластического материала равномерным внутренним давлением. Обнаружено, что для возобновления пластического течения при втором нагружении требуется значительно большее давление, чем в первом цикле. Повторное течение начинается сразу во всей зоне, где были накоплены пластические деформации при первом нагружении. Показано, что уровень остаточных напряжений и деформаций после второго цикла оказывается выше, чем после первого.

Все задачи в диссертации решены в квазистатической постановке.

В заключении представлены основные научные результаты.

Замечания.


1. В диссертации для каждой задачи приведены сведения о параметрах материалов, используемых при проведении расчетов, однако неясно, соответствуют ли эти значения параметров каким-либо конкретным материалам, не указаны литературные источники, из которых взяты эти значения параметров.
2. Было бы полезно выполнить сравнение полученных результатов с результатами решения аналогичных задач в предположении о малости деформаций, что позволило бы осуществить количественную оценку эффектов геометрической нелинейности.

3. Также целесообразно было бы выполнить для частных случаев сравнение результатов расчетов с решениями, которые были получены ранее другими авторами.
4. Для некоторых задач, решение которых получено в главе 4, приведенные в работе результаты расчетов не подтверждают возникновение больших деформаций. Например, для задачи о ползучести и вязкопластическом течении материала цилиндрического слоя при прямолинейном движении внутренней граничной поверхности (параграф 4.1) необратимые деформации не превышают 5% по абсолютной величине, как видно из рисунка 4.3. А для задачи о ползучести и вязкопластическом течении материала полого шара в условиях всестороннего гидростатического сжатия (параграф 4.5) необратимые деформации не превышают 0.4% по абсолютной величине, как видно из рис. 4.31.
5. В названии диссертации говорится об интенсивном формоизменении материалов со сложными свойствами. Однако основное содержание диссертации связано не с моделированием механического поведения материалов, а с решением краевых задач механики и термодинамики для тел, изготовленных из этих материалов. Более точным был бы, например, такой вариант названия: «Процессы интенсивного формоизменения тел, изготовленных из материалов со сложными термомеханическими свойствами».
6. В формулах (1.6)-(1.8) на с. 28 диссертации присутствует тензор Y , смысл которого не поясняется.
7. На с. 47 диссертации (параграф 2.1) имеется утверждение: «В задачах такого типа диагональные компоненты тензора деформаций имеют более высокий порядок малости, чем недиагональные компоненты». Было бы целесообразно обосновать это утверждение.
8. В формулах (4.82), (4.83) на с. 237, 238, видимо, следует заменить обозначения H_1, H_2, p_1, p_2 на H_1, H_2, p_1, p_2 , соответственно.

Заключение

Несмотря на приведенные замечания, диссертационная работа Панченко Галины Леонидовны является законченным научным исследованием, содержащим новые фундаментальные результаты в области механики деформируемого твёрдого тела. Диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор, Панченко Галина Леонидовна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук (специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), профессор, заведующий кафедрой математического моделирования и вычислительной математики факультета прикладной математики и кибернетики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

 Зингерман Константин Моисеевич

15.05.2022.

Адрес: 170100, г. Тверь, ул. Желябова, д. 33.

Тел.: (4822)580522, доб. 119; E-mail: Zingerman.km@tversu.ru

Подпись К.М. Зингермана удостоверяю.

И.о. проректора по научной деятельности



Чемарина Ю.В.

М.П.