

## О Т З Ы В

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 твёрдого тела.

Работа Панченко Г.Л. посвящена дальнейшему развитию феноменологической связанной термомеханической модели материалов с учетом упруго-неупругого деформирования в условиях больших деформаций сплошной среды, установлению закономерностей как процессов нестационарного неизоэотермического квазистатического деформирования тел из термо-вязко-упруго-пластического материала, так и пространственного распределения остаточных напряжений и деформаций, полученных в конечной стадии этих процессов.

*Актуальность* проблематики, связанной с математическим моделированием деформирования тел из термо-вязко-упруго-пластического материала, обусловлена тем, что в ряде промышленных технологий используются интенсивные тепловые и механические воздействия на материалы обрабатываемых заготовок, приводящие, в конечном итоге, к наличию остаточных напряжений и деформаций, оказывающих существенное влияние на эксплуатационные качества изготавливаемых изделий. Эта проблема вызывает необходимость создания и развития более совершенных математических моделей, способных учитывать конечные деформации и такие свойства материалов, как упругость, пластичность, вязкость, их взаимное влияние и связь с тепловыми процессами. Это позволит перейти от эмпирического подбора режимов обработки к научно обоснованному прогнозированию, повысить точность расчетов, улучшить качество и эксплуатационные характеристики изделий, а также сократить затраты на дорогостоящие натурные эксперименты. По этой причине работа Панченко Г.Л. представляется современной и актуальной.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 282 ссылки. Общий объем работы составляет 338 страниц.

*Во введении* обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, перечисляются основные научные результаты, выносимые на защиту, а также кратко описывается структура диссертации.

*В первой главе* дается краткий обзор литературы и приводятся соотношения неизоэотермической модели больших деформаций материалов с упругими, пластическими и вязкими свойствами. Кинематика среды строится в пространственных координатах Эйлера. В качестве тензора полных деформаций используется тензор деформаций Альманси, его разделение на обратимую и необратимую составляющие следует из принятия мультипликативного разложения для тензора дисторсии. Для тензоров обратимых и необратимых деформаций записываются дифференциальные уравнения их изменения. Используются законы термодинамики для нахождения зависимости между напряжениями и деформациями. При этом принимается гипотеза о независимости свободной энергии от необратимых деформаций. Накапливаемые материалом необратимые деформации могут быть деформациями ползучести и пластическими деформациями. Они описываются одним тензором и различаются источником в дифференциальном уравнении изменения этого тензора. Источником деформаций ползучести является их скорость, для определения которой предлагается

использовать степенной закон ползучести Нортона. Скорости пластических деформаций связываются с напряжениями ассоциированным законом пластического течения и скорости деформаций ползучести являются для них начальными значениями. В качестве поверхности нагружения предлагаются классические условия пластичности Треска, Ивлева–Иплинского и Мизеса, а также данные условия с учетом вязких свойств. При конкретизации основных законов модели вводится упругий потенциал, который в случае изотропной среды зависит только от инвариантов тензора деформаций Альманси и температуры. Для упругого потенциала принимается его разложение в ряд Тейлора относительно свободного состояния. Из уравнения баланса энтропии и закона теплопроводности Фурье выводятся уравнения теплопроводности для областей обратимого деформирования, разгрузки и необратимого деформирования.

*Во второй главе* рассматриваются краевые задачи теории больших упруго-вязко-пластических деформаций для несжимаемого материала, расположенного между двумя жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями. Последовательно проанализированы три случая: проскальзывание только у внутренней поверхности, только у внешней и одновременное проскальзывание на обеих поверхностях при прямолинейном движении одной из контактных поверхностей. Здесь же рассмотрена задача о деформировании цилиндрического слоя под действием переменного градиента давления при возможном двустороннем проскальзывании. Решения получены в квазистатической постановке с точностью до слагаемых первого порядка по диагональным компонентам тензора деформаций и второго – по его недиагональным компонентам, что позволило вывести аналитические выражения для скоростей, перемещений, недиагональных компонент тензоров напряжений и деформаций. Процесс деформирования описывается поэтапно: упругое деформирование в условиях прилипания за счет сухого трения и в условиях проскальзывания, зарождение и развитие областей вязкопластического течения при возрастающей и постоянной нагрузках, торможение течения при постепенном снятии нагрузки.

*В третьей главе* исследуются неизотермические прямолинейные течения упруго-вязко-пластических материалов, где процессы деформирования неразрывно связаны с тепловыделением и теплопередачей. В отличие от изотермических задач второй главы, здесь учитывается, что материал значительно разогревается от трения о граничные поверхности. Предел текучести полагается зависимым от температуры. Рассмотрен ряд модельных задач, описывающих различные конфигурации нагружения. Изучено сползание тяжелого слоя материала с наклонной плоскости при условии прилипания на его нижней границе и нагревании его свободной поверхности. Исследованы сдвиг горизонтального слоя при силовых граничных условиях, деформирование материала в круглой трубе и в зазоре между коаксиальными цилиндрами под действием переменного градиента давления или движения внешнего цилиндра. В этих постановках учтено возникновение проскальзывания на контактных поверхностях. Проанализирована эволюция областей течения при монотонном росте нагрузки, выходе на постоянный режим и последующем торможении. Также рассмотрена задача о совместном движении упруго-вязкопластической среды и слоя смазки в трубе. Здесь материалы обладают разными термомеханическими характеристиками, и нагрев происходит как за счет трения смазки о стенку трубы, так и за счет пластического деформирования обоих слоев. Исследованы условия зарождения течения сначала в смазке, а затем в основном материале. Для решения систем уравнений во всех перечисленных задачах использовался алгоритм на основе метода конечных разностей.

*Четвертая глава* посвящена исследованию процессов деформирования материалов, при которых накапливаются необратимые деформации как ползучести, так и пластичности. В качестве примера таких технологических процессов приводятся холодная формовка или обтяжка, когда необратимые деформации накапливаются за счёт медленного процесса ползучести, однако при этом возможно возникновение локальных областей пластического течения. Наличие таких областей приводит к значительному перераспределению полей напряжений и влияет на процесс ползучести, поэтому при моделировании необходимо использовать теорию ползучести с одновременным учётом возможностей возникновения и развития зон пластического течения. Рассмотрены изотермические задачи о деформировании несжимаемого материала цилиндрического слоя при прямолинейном движении внутренней граничной поверхности и о ползучести и вязкопластическом течении материала полого шара в условиях всестороннего гидростатического сжатия. Рассмотрена неизотермическая задача о деформировании плоского тяжёлого слоя на наклонной плоскости при нагреве и охлаждении его свободной поверхности. Данная задача обобщена на случай термомеханического нагружения, когда к тепловому воздействию добавляются механические нагрузки — сжимающая и сдвиговая. Приложение механических нагрузок существенно меняет картину деформирования: если при одном лишь нагреве течение начиналось на нижней границе слоя, то при совместном действии термических и механических нагрузок пластическое течение инициируется на верхней границе. Получено решение неизотермической задачи о необратимом деформировании материала пробки в круглой трубе под действием переменного перепада давления. Рассматриваются два варианта постановки: с жёстким сцеплением материала со стенками трубы и с возможностью проскальзывания. В первом случае тепло выделяется только за счёт необратимого деформирования, во втором — дополнительный разогрев возникает из-за трения о стенку трубы. Показано, что учёт трения приводит к более сильному нагреву материала и более раннему началу пластического течения. Во всех задачах главы используется теория больших деформаций с последовательным накоплением необратимых деформаций ползучести и пластического течения, в неизотермических задачах учитывается зависимость параметров ползучести, предела текучести и коэффициента вязкости от температуры.

*В пятой главе* изучаются малые деформации материалов с упругими, пластическими и вязкими свойствами. Рассматривается сдавливание тяжёлого сжимаемого слоя упруго-пластической или упруго-вязко-пластической среды. Анализируется процесс возникновения и развития течения при использовании условий пластичности Кулона–Мора и Мизеса–Шлейхера. Исследуется ползучесть и пластическое течение материала толстостенной цилиндрической трубы под действием внутреннего давления. На основе закона ползучести Нортон и условия пластичности Треска изучается согласование механизмов деформирования при активном нагружении, постоянном давлении и разгрузке. Рассмотрена возможность возникновения повторного пластического течения в процессе разгрузки, когда напряжённое состояние вновь достигает поверхности нагружения. Рассмотрены процессы ползучести и пластического течения материала сферического слоя под действием всестороннего изменяющегося давления. Анализируется возникновение и развитие пластического течения, поведение материала при постоянном давлении и разгрузке. Также рассмотрено вязкопластическое течение. Сравнение расчетов демонстрирует, что вязкие свойства замедляют процесс течения, делают разгрузку постепенной, а также приводят к меньшим значениям остаточных напряжений и деформаций. Получено решение задачи о двух последовательных циклах нагружения цилиндрического упруговязкопластического

слоя внутренним давлением. Установлено, что давление, инициирующее течение при повторном нагружении, значительно выше, чем при первом, а уровень остаточных напряжений и необратимых деформаций после повторной разгрузки возрастает.

*В заключении* сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Основной *новый*, полученный *лично* автором, результат диссертационной работы заключается в дополнении неизотермической математической модели больших деформаций, связанном с возможностью одновременного учета накопления материалами необратимых деформаций ползучести и пластичности; в указании согласования законов ползучести и пластичности на движущихся упругопластических границах; в получении новых численно-аналитических решений краевых задач о прямолинейных вязкопластических течениях материалов; в постановках и в решениях ряда новых связанных краевых задач о неизотермическом вязкопластическом течении материалов, включая случай учета ползучести.

*Практическая значимость* диссертации состоит в том, что результаты работы могут быть применены в инженерной деятельности при проектировании технологических процессов и анализе напряжённо-деформированного состояния конструкций.

*Ценность* полученных результатов для практики состоит в том, что в настоящее время проектировщики технологических процессов часто используют коммерческие конечно-элементные коды для математического моделирования этих процессов, а представленные в диссертации решения одномерных задач могут помочь пользователям коммерческих кодов отработать методики моделирования процессов нестационарного квазистатического деформирования пластин из термо-упруго-пластического материала.

*Достоверность и обоснованность* научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обеспечиваются вследствие:

- использования классических и апробированных подходов неравновесной термодинамики и механики сплошных сред, которые составляют фундамент современной механики деформируемого твёрдого тела;
- использования математической модели больших упругопластических деформаций, которая является достаточно обоснованной, так как в частном случае малых деформаций из неё следуют соотношения классической модели Прандтля–Рейса;
- того, что при решении конкретных краевых задач не вводилось никаких дополнительных упрощающих гипотез, которые могли бы повлиять на точность или общность выводов;
- того, что многие из полученных зависимостей являются точными в рамках применяемой теории;
- того, что в тех случаях, где требовались численные расчеты, использовались общепризнанные и хорошо зарекомендовавшие себя численно-аналитические методы.

*Апробация* результатов работы осуществлялась путем их представления и обсуждения на более чем двадцати научных мероприятиях различного уровня в период с 2009 по 2025 год. По теме диссертации опубликовано 75 научных работ, из которых

29 изданы в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, а также базы данных Web of Science и Scopus.

Тема диссертации и её содержание соответствуют паспорту специальности 1.1.8 — механика деформируемого твердого тела.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

В качестве *замечаний* можно отметить:

1. Представляется нелогичным следующее построение диссертационной работы: в главе 5 приводится решение ряда задач деформирования упруго-пластической или упруго-вязко-пластической среды в предположении о геометрически линейной деформации, а в главах 2, 3, 4 — в условиях больших деформаций. По мнению оппонента, надо было бы изложение материала проводить в обратном порядке. Более того, хорошо было бы до получения решений хотя бы некоторых задач в условиях больших деформаций, предварительно получить их решения в условиях геометрически линейного деформирования с целью выявления эффектов учета геометрической нелинейности.
2. Было бы уместным провести сравнение эксплуатационных качеств используемой и развиваемой Панченко Г.Л. теории упруго-пластичности, основанной на мультипликативном тензоре дисторсии  $(1.6)_2$ , с аналогичными теориями, представленными в литературе. Пояснение: если использовать общепринятые обозначения, то важной гипотезой, принятой в рецензируемой работе, является разложение тензора дисторсии (обратного тензора градиента деформации  $\mathbf{F}^{-1}$ ) на упругую и пластическую составляющие  $\mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F}_p^{-1} \cdot \mathbf{F}_e^{-1}$ , которое другие авторы записывают в прямом виде  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \cdot \mathbf{F}_p$ . Возникает вопрос: где та изюминка в используемой теории упруго-пластичности, которая отличает рассматриваемый в диссертации подход от аналогичных подходов других авторов?
3. Изложение теоретических положений можно было бы существенно упростить при использовании тензора напряжений Кирхгофа  $\boldsymbol{\tau} \equiv J\boldsymbol{\sigma}$  в качестве тензора напряжений, а не тензора напряжений Коши  $\boldsymbol{\sigma}$  ( $J \equiv \det \mathbf{F} = \rho/\rho_0$ ). В частности, при этом отпала бы необходимость в странном выражении (1.43) для величины  $J^{-1}$ .
4. Формула (1.41) выражения для тензора напряжений Кирхгофа для гиперупругого материала в более привычных для оппонента обозначениях имеет следующий вид (см. формулу (83)<sub>2</sub> в [Korobeynikov, S.N. J. Elasticity, 93: 105-140 (2008)])

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{b} \cdot \frac{\partial W(\mathbf{e}^{(-2)})}{\partial \mathbf{e}^{(-2)}} = \frac{\partial W(\mathbf{e}^{(-2)})}{\partial \mathbf{e}^{(-2)}} \cdot \mathbf{b},$$

где  $W(\mathbf{e}^{(-2)})$  — энергия упругой деформации,  $\mathbf{e}^{(-2)}$  — тензор деформаций Альманси, а  $\mathbf{b} \equiv \mathbf{F}^{-T} \cdot \mathbf{F}^{-1}$  — левый тензор деформаций Пиолы. Как следует из вывода этой формулы в [Korobeynikov, S.N. J. Elasticity, 93: 105-140 (2008)], она справедлива только для изотропных гиперупругих материалов, однако из текста диссертации (стр. 37) можно сделать вывод, что автор диссертации пытается приписать эту формулу любым гиперупругим материалам (не обязательно изотропным).

5. Имеется ряд опечаток и неточностей в тексте. Например, на стр. 27 в формуле (1.5) тензор  $\mathbf{G}$  надо заменить на тензор  $\mathbf{s}$ , в первой части этой формулы знак

равенства «=» заменить на знак тождества « $\equiv$ », так как здесь даётся определение коротационной скорости, а выражение  $\mathbf{s} = \mathbf{z} \cdot \mathbf{s}^{(0)} \cdot \mathbf{z}$  также на стр. 27 заменить на выражение  $\mathbf{s} = \mathbf{z} \cdot \mathbf{s}^{(0)} \cdot \mathbf{z}^T$ .


**Заключение.** Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Панченко Г.Л. Эта диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема — создание теоретических основ и получение новых решений для класса связанных задач неизотермического деформирования материалов со сложными реологическими свойствами.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, относящейся к учёной степени доктора наук, а ее автор, Панченко Галина Леонидовна, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 — механика деформируемого твёрдого тела.

Оппонент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую их обработку.

Официальный оппонент  
главный научный сотрудник лаборатории механики композитов  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук  
д.ф.-м.н. (по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела),  
старший научный сотрудник Коробейников Сергей Николаевич  
04.05.2026 г.

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, пр-т Акад. Лаврентьева, 15,  
тел. +7(383)3331612,  
e-mail: s.n.korobeynikov@mail.ru

*Подпись Коробейникова С.Н.*  
*и.о. ученого секретаря ИГиЛ*  *и.и. Фаминина И.В.*