

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Антона Юрьевича Янца «Двухуровневая математическая модель для описания неупругого деформирования поликристаллов: приложение к анализу сложного нагружения в случае больших градиентов перемещений», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела)

Построение и аттестация адекватных определяющих соотношений – одна из важнейших и «вечных» проблем механики деформируемого твёрдого тела. В последние два–три десятилетия наряду с широким использованием в практических расчётах феноменологических моделей типа теории течения наблюдается активный интерес к физическим теориям пластичности. Этот интерес связан не только с потребностями науки (понять физику явлений пластичности и вязкопластичности; грамотно использовать это понимание для более адекватного описания пластического и вязкопластического деформирования поликристаллических материалов на макроуровне), но и с потребностями практическими – появлением новых материалов и новых технологий, требующих исследования эволюции микроструктуры материала. Диссертационная работа А.Ю. Янца посвящена анализу, модификации и эффективному применению двухуровневой математической модели неупругого деформирования моно- и поликристаллических материалов, построенной на основе физической теории упруговязкопластичности; этим определяется актуальность темы диссертации.

Рассматриваемая работа вполне соответствует квалификационным требованиям – автор демонстрирует свободное владение математическим аппаратом, необходимым для анализа геометрически нелинейных моделей материалов; умение грамотно сформулировать и обосновать предлагаемую им модификацию двухуровневой модели неупругого поведения моно- и поликристаллических материалов; способность разработать и реализовать алгоритм идентификации исследуемой модели и провести с использованием этой модели разнообразные виртуальные эксперименты для обоснования её адекватности и для проверки выполнимости постулатов теории упругопластических процессов.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 149 наименований.

Во введении отмечается широкое применение технологических процессов, в которых реализуется интенсивная пластическая деформация в условиях сложного нагружения, и кратко перечисляются основные виды моделей, используемых для описания таких процессов; подчёркиваются достоинства подхода (развиваемого в том числе в научной школе, к которой принадлежит автор), основанного на многоуровневом моделировании. Кроме того, во введении кратко перечисляются основные характеристики диссертационной работы – актуальность тематики; цель, задачи и методы исследования, новизна и практическая значимость полученных результатов, личный вклад автора.

Содержание диссертационной работы естественно представить в виде двух разделов - подготовительного (главы 1 и 2), включающего обзор литературы и некоторые «заготовки» для предлагаемого автором варианта модели; и основного (главы 3 и 4), включающего описание и анализ модифицированной двухуровневой модели неупругого деформирования моно- и поликристаллических материалов, а также результаты обширных численных экспериментов с использованием этой модели.

Начало первого раздела (п. 1.1 – 1.3) посвящено краткому изложению теории упругопластических процессов (ТУП) А.А.Ильюшина и обсуждению возможности введения девятимерных евклидовых пространств напряжений и деформаций в случае использования несимметричных мер напряженного и деформированного состояний (это «заготовки» для второго раздела). В небольшом п.1.4 перечислено несколько видов феноменологических теорий пластичности и высказано утверждение о преимуществах физических теорий пластичности по сравнению с ними. Отметим, что далее в работе под феноменологическими моделями автор обычно подразумевает конкретные варианты ТУП.

По содержанию главы 1 (и введения) имеются следующие замечания. Обзор математических моделей и экспериментальных работ по сложному нагружению излишне лаконичен и неполон (мало ссылок на современные работы). При сопоставлении феноменологических и физических теорий пластичности автор порой излишне преувеличивает сложности построения и идентификации моделей феноменологических по сравнению с физическими (см. стр. 29, 30 и др.).

Обзор основных физических теорий пластичности (глава 2) представлен гораздо полнее и обстоятельнее, чем феноменологических, – прослежена история развития этих теорий (от простейших, не учитывающих упругие деформации и упрочнение, до современных); выполнен анализ типичных гипотез, принимаемых при их построении; детально рассмотрены

различные подходы к формулировке закона упрочнения (изменения критических касательных напряжений при неупругом деформировании). Довольно обстоятельно автор обсуждает и обосновывает достоинства гипотезы упрочнения (развиваемой в школе П.В.Трусова) в форме (2.19), задающей изменение критических касательных напряжений за счёт вклада различных механизмов в аддитивной форме; при этом в качестве первого, главного слагаемого в (2.19) рекомендуется брать выражение, аналогичное хорошо известному соотношению (2.18).

По названному обзору можно сделать следующие замечания. Мало внимания уделено временным эффектам на макроуровне при использовании на мезоуровне соотношений вязкопластичности типа (2.15). Следовало бы больше внимания уделить сопоставлению подхода, развиваемого в школе П.В.Трусова, с другими, идейно близкими исследованиями.

В главе 2 после обзора следует обсуждение вопросов, непосредственно касающихся исследуемой им модели. В п.2.3 автор, сформулировав проблему выделения квазитвёрдого движения кристаллитов в процессах интенсивного пластического деформирования, чётко и аргументированно высказывает свой взгляд на наиболее естественный подход к её решению. В п.2.4 даётся полное изложение (сопровожаемое подробными обоснованиями) общей структуры двухуровневой конститутивной статистической упруговязкопластической модели (всюду в настоящем отзыве используется более короткое и представляющееся нам более удобным название «двухуровневая (математическая) модель неупругого деформирования»). Это описание включает определение представительных объёмов на мезоуровне (отдельный кристаллит) и на макроуровне (набор кристаллитов — поликристаллический агрегат); подробный список основных гипотез; детальное описание модели мезоуровня; используемые для описания кинематики движения системы координат; выбор несимметричной индифферентной меры скорости деформированного состояния (в качестве таковой берётся градиент относительных скоростей перемещений); выбор вида определяющих соотношений на мезо- и макроуровне и метод их согласования для получения замкнутой математической модели. Следует особо подчеркнуть, что на всех этапах описания модели автор пытается пояснить (обосновать) физический смысл получаемых соотношений.

Второй раздел работы начинается с последовательного и развёрнутого изложения всех этапов модификации двухуровневой математической модели, уже анонсированных в главе 2. Эта модификация включает обоснование перехода от классической записи закона Гука (для случая малых градиентов перемещений) к скоростной релаксационной форме

(3.1) с чётким указанием условий такого перехода; тщательный анализ разложения движения (выделения квазитвёрдого движения) на мезоуровне с активным акцентом на физическом смысле возможных вариантов такого разложения и на удобстве их использования при построении определяющих соотношений; обсуждение вариантов выделения квазитвёрдого движения на макроуровне с обоснованным предложением своего варианта; на мезоуровне в развитие выполненного в п.2.4 (обоснованного!) выбора индифферентной меры скорости деформаций (2.45) определение (и объяснение физического смысла) тензора деформации путём коротационного интегрирования этой меры скорости деформации и соответствующее определение неголономной меры деформации на макроуровне (тоже с пояснением её физического смысла). С использованием предварительно выполненных «заготовок» (п.1.2, 2.3, 3.4) строится алгоритм, позволяющий реализовать в виртуальных экспериментах жесткое (кинематическое) нагружение представительного объёма – поликристаллического агрегата – по произвольной траектории деформаций в соответствующем девятимерном пространстве (п.1.2). Обоснование этого алгоритма и обсуждение того, как «работает» схема взаимных ориентаций систем координат лабораторной и подвижных (мезо- и макроуровня), чрезвычайно полезно не только для проведения виртуальных экспериментов, но и для разработки программ реальных экспериментов и «расшифровки» их результатов. С этой точки зрения стоило бы привести наглядные примеры работы построенного автором алгоритма.

Исследования, чрезвычайно важные для аттестации разработанной автором модели, представлены в заключительной главе 4. Это полное описание алгоритма численной реализации модели при анализе (произвольного) нагружения представительного макрообъёма; обсуждение задачи об идентификации параметров модели и её решение на примере конкретного материала (Ст. 45) при априори частично известном наборе параметров; демонстрация адекватности модели на примере описания результатов экспериментов по «вееру» двузвенных траекторий деформаций (малых); оригинальные и очень богатые по разнообразию полученных результатов виртуальные эксперименты по сложным траекториям деформаций в случае больших градиентов перемещений, особенно интересные по возможной трактовке эволюции структуры и развития текстуры и по выполнению постулата изотропии А.А.Ильюшина (как при малых, так и при больших градиентах перемещений). Заметим, что для задачи об идентификации модели хотелось бы иметь ответы на вопросы о том, возможна ли полная (по всем материальным константам) идентификация модели, каков минимальный

объём базового эксперимента и тому подобные. Это замечание можно рассматривать как пожелание автору в дальнейшей работе.

В изложенных выше исследованиях автора научную новизну представляют оригинальная модификация существующей двухуровневой математической модели упруговязкопластичности с использованием несимметричных мер скорости изменения деформированного состояния и деформации, а также нового способа разложения движения на квазитвердое (связанное на мезоуровне с кристаллической решеткой) и деформационное на мезо- и макроуровне с эффективным применением на обоих масштабных уровнях специально введённой подвижной системы координат; разработка и реализация алгоритма нахождения траектории деформации в лабораторной системе координат, соответствующей произвольной траектории, заданной в подвижной системе координат; аттестация модели по результатам натуральных экспериментов (при малых градиентах перемещений); проверка выполнения постулата изотропии в виртуальных экспериментах при больших градиентах перемещений.

Достоверность полученных автором результатов обеспечивается использованием обоснованных гипотез при построении модифицированной математической модели, применением строгих математических методов, проверкой сходимости и устойчивости решения в численных экспериментах, приемлемым соответствием результатов виртуальных и натуральных экспериментов для случая малых градиентов перемещений.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанную модель можно непосредственно использовать для анализа процессов нагружения материала по произвольным траекториям деформаций (задаваемых в терминах подвижной системы координат) при больших градиентах перемещений; с использованием разработанного комплекса программ возможно решение краевых задач для упруговязкопластических материалов.

Работа написана чётким, ясным языком; она производит хорошее впечатление стремлением автора обосновать предлагаемые гипотезы и выяснить физический смысл получаемых результатов. Помимо уже сделанных выше замечаний заметим ещё, что некоторые фразы в работе, касающиеся феноменологических моделей, написаны излишне безапелляционно.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации отражены в 13 публикациях автора, из них 8 в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Оценивая рассматриваемую работу в целом, считаю, что она представляет собой законченное научное исследование, которое вносит заметный вклад в теорию двухуровневых математических моделей неупругого деформирования поликристаллических материалов; обладает несомненной научной новизной и может быть использована для проведения виртуальных экспериментов по разнообразным программам сложного нагружения; удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела, а автор диссертации Янц Антон Юрьевич заслуживает присуждения ему искомой учёной степени.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией упругости и пластичности Научно-исследовательского института механики ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», доктор физ.-мат. наук, профессор

Васин Рудольф Алексеевич

 Р.А.Васин

Почтовый адрес: 119192, Москва, Мичуринский проспект, дом 1, НИИ механики МГУ

Телефон: 8(495)939-31-21, E-mail: common@imec.msu.ru

28 марта 2016 г.

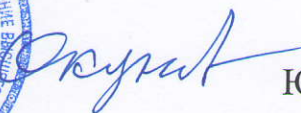
Подпись Р.А. Васина удостоверяю

Директор

НИИ механики МГУ

академик РАЕН





Ю.М.Окунев