

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Янца Антона Юрьевича
«Двухуровневая модель для описания неупругого деформирования поликристаллов:
приложение к анализу сложного нагружения в случае больших градиентов перемещений»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Для описания поведения материала при сложном нагружении большинством исследователей используются макрофеноменологические модели неупругого деформирования. Модели данного класса базируются на установлении зависимостей между параметрами макроуровня, не углубляясь в вопросы эволюции микроструктуры материала, что приводит к усложнению операторных зависимостей, необходимости постановки и проведения ресурсоемких экспериментов на сложное нагружение. При математическом описании поведения сложных физико-механических объектов, к числу которых, несомненно, относятся поликристаллические материалы, широкое распространение получил подход, основанный на введении внутренних переменных и многоуровневом моделировании, в котором в структуру модели включаются соотношения, учитывающие эволюцию его структуры на различных масштабных уровнях. Актуальность настоящей работы связана с необходимостью разработки двухуровневой конститутивной модели, основанной на одной из физических теорий пластичности, и анализ возможностей ее применения для описания нагружения представительного объема поликристалла при больших градиентах перемещений по траекториям с произвольной внутренней геометрией.

Целью диссертационной работы А.Ю. Янца является модификация двухуровневой конститутивной модели для описания неупругого деформирования поликристаллических материалов по траекториям произвольной сложности, основанной на рассмотрении эволюции внутренней микроструктуры, введении несимметричных мер скорости деформации и деформации и разложения движения на квазиверное и деформационное на каждом масштабном уровне.

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, Заключения. Она изложена на 138 стр., содержит 19 рисунков и список литературы из 149 наименований. По теме диссертации представлена 21 научная публикация, из которых 8 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 5 публикаций входят в базы цитирования Web of Science и Scopus.

Во введении обосновывается актуальность и научная новизна диссертационного исследования; формулируются цель и задачи работы.

В первой главе представлены основные положения теории упругопластических процессов (УПП) А.А. Ильюшина: пространства напряжений и деформаций, совмещенное пространство, векторы напряжений и деформаций и соответствующие им траектории, образ процесса нагружения и его характеристики. Приведен обзор работ по экспериментальному исследованию нагружения по сложным траекториям и представлена их интерпретация с позиций теории УПП А.А. Ильюшина. Отмечена проблема экспериментального исследования сложного нагружения при больших деформациях, обусловленная потерей устойчивости формы трубчатых образцов. Осуществлена модификация теории УПП А.А. Ильюшина на случай несимметричных мер напряженного и деформированного состояния: увеличена размерность векторов и пространств с 5 до 9; с помощью введенной подвижной системы координат выделено квазиверное движение; с целью оценки точности выполнения постулата изотропии введены скалярные параметры, характеризующие меру совпадения двух образов процессов, полученных при деформировании по траекториям с одинаковой внутренней геометрией.

Во второй главе представлен обзор существующих физических теорий пластичности и выделен класс двухуровневых моделей, основанных на них. Отмечена ограничен-

ность существующих моделей вследствие использования симметричных ориентационных тензоров систем скольжения (СС). В результате анализа теорий упрочнения, наиболее часто используемых в конститутивных моделях, изложен подход, основанный на аддитивности вклада в упрочнение от различных механизмов. Рассмотрены возможные варианты решения на мезоуровне проблемы о разложении движения на квазитвердое и деформационное; проанализированы их достоинства и недостатки. Представлена общая структура статистической двухуровневой упруговязкопластической модели описания деформирования представительного объема поликристаллического материала в случае больших градиентов перемещений. Приведены определяющие и эволюционные соотношения модели мезоуровня, использующей в качестве меры скорости деформаций транспонированный градиент относительных скоростей перемещений $\mathbf{z} = \nabla \mathbf{v}^T - \boldsymbol{\omega}$, где $\boldsymbol{\omega}$ – спин квазитвердого вращения подвижной системы координат, связанной с решеткой кристаллита (ПСК_К). В качестве определяющего соотношения (ОС) на мезоуровне принят гипоупругий закон (закон Гука в скоростной релаксационной форме). Представлены условия согласования ОС масштабных уровней, с использованием которых получены выражения для упругой и неупругой составляющих меры скорости деформаций.

В третьей главе рассматривается построение двухуровневой модели неупругого деформирования моно- и поликристаллов на основе несимметричной теории упруговязкопластичности. Представлены геометрически нелинейные определяющие соотношения, основанные на физически обоснованном разложении движения. Приведена связь закона Гука в конечных величинах с законом Гука в скоростной форме. Исследована связь определяющих соотношений в виде гиперупрятого и гипоупрятого законов. Показана эквивалентность этих законов при условии, что подвижная система координат, используемая при переходе к скоростной форме соотношений, связана с материалом. Представлено разложение движения на квазитвердое и деформационное на мезоуровне. Даётся связь компонент тензора спина $\boldsymbol{\omega}$ ПСК_К с компонентами тензора упругой составляющей градиента скорости перемещений. Рассматриваются геометрически нелинейные определяющие соотношения, разложения движения на квазитвердое и деформационное на макроуровне, удовлетворяющие принципу независимости от выбора системы отсчета. В качестве альтернативы существующим способам разложения движения на макроуровне предлагается способ (гипотеза), основанный на условии согласования определяющих соотношений макро- и мезоуровней, в соответствии с которым спин квазитвердого движения на макроуровне равен среднему значению спинов элементов мезоуровня. Показано, что неголономная мера деформации с точностью до упругих искажений равна осредненной сумме тензоров сдвигов в кристаллитах, входящих в представительный макрообъем. Проведена серия численных экспериментов, из которых следует, что для всех рассмотренных типов нагружения (осадка, сдвиг, два сдвига в различных плоскостях) погрешность составляет не более 2% среднего значения сумм по всем системам скольжения произведений накопленных сдвигов на базисные диады всех кристаллитов, составляющих представительный макрообъем. Представлен алгоритм реализации модели для описания нагружения представительного макрообъема, определенного в терминах подвижной системы координат (ПСК), которая считается связанной с материалом и испытывающей квазитвердое движение соответственно выбранной гипотезе о разложении движения. Получена связь градиентов полных и относительных скоростей перемещений. Из соотношений модели следует, что спин квазитвердого движения ПСК $\boldsymbol{\Omega}$ определяется как внутренней микроструктурой материала (типом решетки, ориентациями кристаллитов, скоростями сдвигов), так и градиентом полных скоростей перемещений.

В четвертой главе изложен алгоритм численной реализации модели, программы и результаты численных экспериментов по нагружению представительного объема поликристаллического материала с ОЦК решеткой по сложным траекториям при малых и больших градиентах перемещений. Представленный алгоритм позволяет численно реализовать нагружение выборки кристаллитов (с известной кристаллической решеткой и си-

стемами скольжения) по произвольным траекториям, определенным в терминах как ЛСК, так и ПСК. Рассмотрена постановка и результаты решения задачи идентификации и верификации параметров модели для материала Ст45, имеющего ОЦК решетку, как задачи оптимизации. Предполагаются известными значения упругих модулей, скорость сдвига при достижении критического напряжения сдвига, начальные критические напряжения в системах скольжения. В результате решения задачи оптимизации получены значения искомых параметров, при которых отклонение интенсивностей напряжений в численных и натурных экспериментах не превышало 6%. Показано хорошее соответствие результатов численных и натурных экспериментов в части векторных (образ процесса, запаздывание векторных свойств) и скалярных (интенсивности напряжений, нырок интенсивности напряжений при изломе траектории) характеристик процесса нагружения в случае сложного нагружения при малых градиентах перемещений. Показано, что при задании нагружения в терминах ПСК, соответствующая траектория в лабораторной системе координат (ЛСК) существенно отличается от заданной в ПСК как внутренней геометрией, так и размерностью пространства, в которое она вложена. В связи с этим рассмотрены пути возможного решения этой задачи. Оценены погрешности выполнения постулата изотропии А.А. Ильюшина в терминах ПСК при принятии различных гипотез о разложении движения на макроуровне.

Основное содержание диссертации с достаточной полнотой изложено в автореферате и публикациях по диссертационной работе.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обоснована корректной физической и математической постановкой решаемых задач, удовлетворительным соответствием результатов численных расчетов экспериментальным данным в случае малых деформаций для траекторий малой и средней кривизны и траекторий с изломами, апробацией на ряде семинаров и Международных конференций.

Практическое значение работы заключается в расширении возможности теоретического анализа процессов сложного нагружения упругопластических материалов при больших деформациях, имеющих место при высокointенсивных нагрузлениях в технологических процессах обработки металлов, за счет применения разработанного комплекса проблемно-ориентированных программ для ЭВМ, разработанного автором диссертации.

Научная новизна заключается: в развитии двухуровневой конститутивной модели, основанной на физической теории упруговязкопластичности, использующей несимметричные меры скорости изменения деформированного состояния и деформации; в разработке способа разложения движения на квазиверное и деформационное на мезо- и макроуровне; в доказательстве независимости получаемого образа процесса от выбора системы отсчета и обобщении указанных понятий и определений на случай больших градиентов перемещений; в модификации способа построения образа процесса нагружения в терминах подвижной системы координат; в определении программы нагружения в терминах лабораторной системы координат (испытательной машины) по предписанной траектории нагружения в терминах подвижной системы координат.

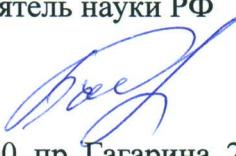
Замечания:

1. Целью диссертации является развитие двухуровневой модели для описания сложного нагружения при больших градиентах перемещений. Однако отсутствует сопоставление теоретических результатов с экспериментальными данными при больших деформациях, которые представлены в определенной мере в публикациях В.Г. Баженова с соавторами (в журналах: ДАН, ПММ, ПМТФ) применительно к задачам растяжения-кручения сплошных цилиндрических и полых трубчатых образцов при действии внутреннего давления – растяжения – кручения.
2. Установление корреляции между вращениями микро- и макро-представительного объема без решения соответствующей краевой задачи возможно только при его большой идеализации – введении регулярной периодической структуры кристаллитов, т.е. для материалов простой структуры.

3. Предлагаемая двухуровневая физическая модель не оценивается по возможностям описания сложного нагружения по сравнению с широко применимыми в настоящее время феноменологическими моделями теории пластичности с изотропным и кинематическим упрочнением, например, Шабоша. Не сопоставляется также число базовых экспериментов для определения параметров названных моделей.

Вышеперечисленные замечания не влияют на высокую оценку диссертационной работы, которая является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Антон Юрьевич Яниц, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности механика деформируемого твердого тела (01.02.04).

Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского», профессор, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки РФ


Баженов Валентин Георгиевич

603950, г. Нижний Новгород, ГСП-1000, пр. Гагарина, 23, корп.6
Тел. 8(831)465 66 11.

e-mail: bazhenov@mech.unn.ru

Я, В.Г. Баженов, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.


Баженов Валентин Георгиевич

