

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 14.04.2016 № 105

О присуждении Янцу Антону Юрьевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Двухуровневая модель для описания неупругого деформирования поликристаллов: приложение к анализу сложного нагружения в случае больших градиентов перемещений» по специальности 01.02.04 «Механика твердого деформируемого тела» принята к защите 25.01.2016, протокол № 99 диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Янц Антон Юрьевич 1989 года рождения, в 2012 г. окончил «Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГБОУ ПНИПУ) по специальности «Прикладная математика и информатика». В 2015 г. окончил аспирантуру очной формы обучения ФГБОУ ПНИПУ по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. В настоящее время работает ассистентом кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» ФГБОУ ПНИПУ. Диссертация выполнена на кафедре «Математическое моделирование систем и процессов» ФГБОУ ПНИПУ.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук, профессор Трусов Петр Валентинович, заведующий кафедрой «Математическое моделирование систем и процессов» ФГБОУ ПНИПУ.

**Официальные оппоненты:**

Васин Рудольф Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор (ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт механики);

Баженов Валентин Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор (ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»).

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО Тульский государственный университет, г. Тула, в своем положительном заключении, составленном Маркиным Алексеем Александровичем, д.ф.-м., профессором, заведующим кафедрой математического моделирования, и утвержденном проректором по научной работе ФГБОУ ВПО ТулГУ профессором В.Д. Кухарем, указала, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, имеющая научное и практическое значение, которая содержит модификацию двухуровневой конститутивной модели для описания неупругого деформирования поликристаллических материалов по траекториям произвольной сложно-

сти, основанной на рассмотрении эволюции внутренней микроструктуры, введении разложения движения на каждом масштабном уровне (на квазитвердое и деформационное) и несимметричных мер скорости деформации и деформации. Работа полностью удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Янц Антон Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Соискатель имеет 21 опубликованную работу по теме диссертации, из них 5 статей в изданиях, индексируемых в базе Web of Science и Scopus и 3 – в рецензируемых научных изданиях (в журналах, рекомендуемых ВАК). Наиболее значительные работы:

1. Trusov P.V., Volegov P.S., Yants A.Yu. Asymmetric crystal plasticity theory for the evolution of polycrystal microstructures// *Physical Mesomechanics*. 2012. V.15, № 1-2. P.58-68.
2. Trusov P.V., Volegov P.S., Yanz A.Yu. Two-scale models of polycrystals: Macroscale motion decomposition // *Physical Mesomechanics*. 2014. V.17, № 2. P.116-122.
3. Trusov P.V., Volegov P.S., Yanz A.Yu. Two-scale models of polycrystals: Independence of the loading process image of a representative macrovolume // *Physical Mesomechanics*. 2014. V.17, №3. P.190-198.
4. Trusov P.V., Volegov P.S., Yanz A.Yu. Two-scale models of polycrystals: Analysis of complex loading// *Physical Mesomechanics*. 2014. V.17, №4. P.349-355.
5. Trusov P.V., Volegov P.S., Yanz A.Yu. Two-level models of polycrystalline elastoviscoplasticity: Complex loading under large deformations // *Z. Angew. Math. Mech.* 2015. V.95, №10. P.1067-1080. // DOI 10.1002/zamm.201400153

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Васина Рудольфа Алексеевича. В отзыве указывается на то, что диссертация 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. Оппонент отмечает, что 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.). 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. Оппонент также отмечает, что стоило бы привести наглядные примеры работы построенного автором алгоритма для реализации деформирования по произвольной траектории нагружения, заданной в подвижной системе координат. Из диссертации неясно, возможна ли полная идентификация модели по всем материальным параметрам и каков минимальный объем базового эксперимента. Помимо уже сделанных выше замечаний оппонент отмечает, что некоторые фразы в работе, касающиеся феноменологических моделей, написаны излишне безапелляционно.

2. Положительный отзыв официального оппонента Баженова Валентина Георгиевича. В отзыве указано на высокую оценку диссертации, которая является законченной научно-квалификационной работой. Оппонент отмечает, что 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). В качестве замечания оппонент также отмечает, что 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. В отзыве отмечается, что 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.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается актуальность темы диссертации, основные научные результаты, теоретическая и практическая значимость работы. Ведущая организация в отзыве приводит несколько замечаний. Автором принята аддитивность скоростей упругих и неупругих составляющих скоростей деформации (2.52), однако в работе «Л.И. Седов. Механика сплошной среды. Т2. 1984» показано, что аддитивность справедлива только для ковариантных компонент данных тензоров в лагранжевой системе координат, а не для самих тензоров. Автором не обсуждается применимость и степень адекватности использования гипотезы Фойгта (2.58) при моделировании процессов неупругого деформирования металлов; в качестве закона упрочнения используется соотношение (2.32), учитывающее малое количество механизмов упрочнения, число которых при глубоких деформациях, вероятно, значительно больше. Не указано, будут ли зависеть результаты от выбора направления и плоскости при используемом описании квазитвердого движения кристаллита.

На автореферат поступило 9 положительных отзывов, из них 6 отзывов – без замечаний от Коновалова А.В., д.т.н., профессора Института машиноведения РАН, г. Екатеринбург; Буренина А.А., д.ф.-м.н., член-корреспондента РАН, профессора, директора Института машиноведения и металлургии ДО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре; Романовой В.А., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории механики структурно-неоднородных сред Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск; Мышлявцевой М.Д., д.ф.-м.н., доцента, заведующей кафедрой высшей математики ФГБОУ ВО Омский государственный технический университет, г. Омск; Ерофеева В.И., д.ф.-м.н., профессора, директора Института проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород; Георгиевского Д.В., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой теории упругости Московского государственного университета им. Ломоносова, г. Москва.

3 отзыва с замечаниями от: Коробейникова С.Н., д.ф.-м.н., заведующего лабораторией механики разрушения материалов и конструкций, Институт гидродинамики им.

М.А.Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск; Князевой А.Г., д.ф.-м.н., профессора, главного научного сотрудника, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск; Гольдштейна Р.В., д.ф.-м.н., член-корреспондента РАН, заведующего лабораторией механики прочности и разрушения материалов и конструкций, Институт проблем механики РАН, г. Москва.

В качестве замечаний отмечено следующее: рекомендовано провести проверку введенного в диссертационной работе тензора кинематического спина  $\omega$  на предмет его принадлежности к семейству непрерывных тензоров-спинов, введенного в работе «Korobechnikov S.N. // Acta Mechanica. 2011. V.216, №1-4. P.301-332», принадлежность к данному семейству позволяет избежать некоторых проблем с компьютерным моделированием деформирования тел; из автореферата не ясно, какие внутренние переменные учитываются в модели; требуется пояснение аддитивности вкладов в упрочнение различных механизмов; необходимо пояснение новизны нового способа разложения движения на квазитвердое и деформационное на мезо- и макроуровнях, которое фактически представляет известное выражение – производную Яуманна; не отмечается, что дает альтернативный способ определения спина макроуровня, заключающегося в использовании условий согласования (гипотеза  $\Gamma_\Omega$ ); отсутствует четкое пояснение того, что дает предложенная модификация двухуровневой модели и какие новые возможности имеет модифицированная модель по сравнению с предыдущими вариантами; из автореферата неясно, в каком смысле понимается эквивалентность гиперупругого и гипоупругого законов, тем более что в случае гиперупругого закона должен быть потенциал, при этом неясно можно ли считать тензор модулей упругости постоянным; не ясно, почему при оценке достоверности результатов автор ограничился сопоставлениями численных расчетов с экспериментальными данными лишь для случая малых градиентов перемещений.

В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и практическую значимость, вносят значительный вклад в решение фундаментальных вопросов нелинейной механики твердого деформируемого тела.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из немногих известных ведущих специалистов в области геометрически нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных работ по исследованию процессов деформирования поликристаллических металлов в случае больших градиентов перемещений в рецензируемых научных изданиях, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** ФГБОУ ВПО Тульский государственный университет одним из ведущих вузов страны и хорошо известна своими достижениями в области механики деформируемого твердого тела, в университете активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области геометрических нелинейных задач механики.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**предложена** и обоснована модификация двухуровневой конститутивной модели для описания неупругого деформирования поликристаллических материалов по траекториям произвольной сложности, основанная на использовании несимметричных мер деформации, скорости деформации и физически обоснованного разложения движения на квазитвердое и деформационное;

**введены** подвижные жесткие системы координат для описания квазитвердого движения на каждом масштабном уровне;

**показан** физический смысл неголономной меры деформации, определяемой интегрированием коротационных уравнений для введенной меры скорости деформации;

**разработан** алгоритм, позволяющий для заданной программы нагружения по произвольной траектории деформации в терминах подвижной системы координат, отвечающей за квазитвердое движение представительного макрообъема, определять программу нагружения в терминах неподвижной лабораторной системы координат;

**показана** адекватность построенной двухуровневой конститутивной модели путем сравнения результатов численных и натуральных экспериментов, свидетельствующее об их хорошем качественном и количественном соответствии для случая малых градиентов перемещений;

**введены** скалярные параметры, позволяющие оценивать точность выполнения постулата изотропии А.А. Ильюшина для сравнения образов процессов нагружения произвольной размерности.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

– модифицирована двухуровневая конститутивная модель, основанная на физической теории упруговязкопластичности, использующая несимметричные меры скорости изменения деформированного состояния и деформации, а также на новом способе разложения движения на квазитвердое и деформационное на мезо- и макроуровне;

– для случая больших градиентов перемещений обоснована необходимость определения образа процесса нагружения, а также программы нагружения в терминах подвижной системы координат, связанной с материалом;

– для случая больших градиентов перемещений модифицирован способ построения образа процесса нагружения и доказана индифферентность образа процесса к наложенному жесткому движению, для чего потребовалась изменить определение векторов напряжений и деформаций и совмещенного пространства напряжений и деформаций;

– предложена процедура определения программы нагружения в терминах лабораторной системы координат (испытательной машины) по предписанной траектории нагружения в терминах подвижной системы координат;

– разработанная модель может быть применена для анализа процессов нагружения поликристаллических материалов по произвольным траекториям деформаций (в том числе – при больших градиентах перемещений), задаваемых в терминах подвижной системы координат, с использованием машин сложного нагружения;

– с применением современных технологий параллельных вычислений разработан комплекс проблемно-ориентированных программ для ЭВМ, позволяющий проводить численные эксперименты по нагружению представительного объема поликристаллического

материала по произвольным траекториям и пригодный для решения фундаментальных и прикладных проблем механики деформируемого твердого тела.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)**

**использован** комплекс разработанных программ ЭВМ для расчета напряженно-деформированного состояния представительного объема поликристаллического материала при нагружении по траекториям произвольной степени сложности при больших градиентах перемещений как в терминах лабораторной, так и в терминах подвижной системы координат, связанной с исследуемым материалом;

**изложены** результаты анализа полученных в численных экспериментах зависимостей векторных и скалярных параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние представительного объема поликристаллов, при нагружении по траекториям различной степени сложности при малых и больших градиентах перемещений;

**раскрыт** физический смысл неголономных мер деформированного состояния на макро- и мезоуровнях, получаемых интегрированием коротационных уравнений для градиентов относительных скоростей перемещений;

используя разработанную двухуровневую конститутивную модель **изучены** физические причины запаздывания векторных и скалярных свойств деформируемого материала при сложном нагружении;

**представлена формулировка** соотношений модифицированной двухуровневой конститутивной модели, основанной на физической теории упруго-вязкопластичности, в том числе для случая больших градиентов перемещений.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработан** алгоритм, реализующий нагружение представительного объема материала по программе, заданной в терминах подвижной системы координат, на машинах сложного нагружения, оперирующих с программой деформирования в терминах лабораторной системы координат;

**представлен** метод построения индифферентного к наложенному жесткому движению образа процесса нагружения;

**определена** точность выполнения постулата изотропии А.А.Ильюшина для больших градиентов перемещений, в рамках разработанной модифицированной двухуровневой модели и введенные скалярные меры;

**создан** комплекс проблемно-ориентированных программ для ЭВМ для проведения численных экспериментов по нагружению представительного объема поликристаллического материала по произвольным траекториям деформирования;

**Другие научные достижения, свидетельствующие о научной новизне и значимости полученных результатов**

Для введенного разложения движения на мезоуровне впервые показано взаимно-однозначное соответствие между законом Гука в скоростной формулировке и законом Гука в конечной формулировке.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**теория** построена на известных, проверяемых данных и в частных случаях согласуется с опубликованными ранее результатами исследований по теме диссертации;

**идея базируется** на обобщении передового опыта построения многоуровневых конститутивных моделей с применением физических теорий пластичности, в частности – упруговязкопластичности;

**использованы** современные апробированные численные методы, для которых в работе исследованы численная сходимость и устойчивость получаемых решений;

**установлено** удовлетворительное качественное, а в некоторых случаях и количественное соответствие авторских результатов численного моделирования и результатов натурных экспериментов, полученных ранее в работах других исследователей.

**Личный вклад соискателя состоит в** модификации двухуровневой конститутивной модели, обосновании физического смысла неголономных мер деформированных состояний на обоих масштабных уровнях; введении физически обоснованного разложения движения на мезоуровне, доказательстве индифферентности к наложенному жесткому движению получаемого в подвижной системе координат образа процесса нагружения; разработке алгоритма реализации нагружения в терминах лабораторной системы координат при задании траектории деформации в терминах подвижной системы; разработке и реализации программ для ЭВМ, использующих технологии параллельных вычислений; проведении численных экспериментов.

Выбор направлений исследований, постановка задачи, анализ результатов и подготовка публикаций осуществлялись совместно с научным руководителем.

**Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается** наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

На заседании 14 апреля 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Янцу А.Ю. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 16, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета

14.04.2016 г.



  
/ Матвеенко Валерий Павлович

  
/ Зуев Андрей Леонидович