

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

по диссертационной работе Батухтиной Екатерины Евгеньевны
«Микромеханическая модель деформационного поведения поликристаллического
алюминия на основе физической теории пластичности»
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Все конструкционные материалы являются неоднородными. Иногда масштаб изделия и условий эксплуатации позволяют пренебречь внутренней неоднородностью материала и оценивать его текущее состояние как однородное. Однако новые технологии, которые основаны на материалах с иерархической структурой, не допускают при моделировании такой идеализации среды, в связи с чем разработка моделей и методов, учитывающих в явном виде морфологию отдельных зёрен среды, представляется очень **актуальной**.

Работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы, состоящий из 163 источника, изложена на 165 страницах, содержит 58 рисунков и 5 таблиц.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы новизна, цель работы, а также положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов, отмечены научная и практическая значимость, личный вклад автора и приведены данные об апробации работы. Кратко изложено содержание диссертации по главам.

Отдельной обзорной главы, традиционной для многих диссертационных работ, в представленной работе нет. В процессе изложения материала автор анализирует современные работы для текущей проблематики, при этом и качество этого анализа, и количество приведённых работ позволяют сделать вывод о глубокой проработке научной литературы по тематике всей диссертации.

В первой главе изложены и проанализированы основные аспекты физической теории пластичности кристаллов, в частности, подробно рассмотрены основные модели упрочнения для кристаллов, проанализирована связь геометрии скольжения и напряженно-деформированного состояния. Приведен обзор литературы по данной проблематике.

Во второй главе описана математическая постановка краевых задач упругопластического деформирования, на основе теории пластичности кристаллов подробно рассмотрены определяющие соотношения для монокристаллов алюминия. Отдельное внимание уделяется численному моделированию с учетом явной структуры среды на микроуровне, и, в связи с этим, методам построения расчетных трёхмерных моделей. Выполнен обзор работ по генерации моделей. Для построения модели

поликристаллического алюминия в работе используется метод пошагового заполнения, он рассмотрен более подробно.

В третьей главе квазистатическое поведение поликристаллических структур при нагружении изучается с использованием динамического подхода. Приводится обзор необходимых для дальнейшего обсуждения результатов других авторов. Изложены основные понятия и соотношения метода конечных элементов, проведен сравнительный анализ использования вычислительных ресурсов для расчетов в статике и динамике.

Вторая и третья главы содержат изложение и обоснование первых двух защищаемых положений работы.

Четвертая глава посвящена подробному рассмотрению численного моделирования влияния одноосного сжатия на поликристаллические образцы алюминия и ГЦК-монокристаллы. Качественно выполнена необходимая для понимания обзорная часть, подробно рассмотрены аспекты построения и геометрия моделей для численных экспериментов и условия использования этих моделей в расчетных пакетах. В четвертой главе получены и обоснованы третье и четвертое защищаемые положения.

В заключении приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Автореферат полностью соответствует тексту диссертации и содержит всё необходимое для понимания работы.

И диссертация, и автореферат написаны грамотным и логичным языком, обеспечивающим связность изложения и непротиворечивость структуры работы.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов обусловлена следующим.

Для результатов **третьей главы** проводится сравнение поведения модельного образца при статическом и динамическом нагружениях. Полученные отклонения от известных решений составили порядка 0.05%, что является очень хорошим результатом. При этом установлена зависимость точности моделирования от инкремента деформации $\Delta\varepsilon$. Далее в третьей главе исследуется возможность снижения чувствительности материала к скорости нагружения, и полученные результаты также хорошо коррелируют с данными других исследователей. Отдельно хотелось бы отметить последний раздел третьей главы – о сеточной аппроксимации. Эти исследования непосредственно не связаны с защищаемыми положениями, но подчеркивают исследовательский и новаторский характер работы.

Для оценки обоснованности и достоверности результатов **четвёртой главы** прежде всего нужно упомянуть серию расчетов для монокристаллов ориентаций I-IV без учета упрочнения, что позволило проводить сравнение результатов с аналитическими решениями, причем расхождение составило не более 2%. Моделирование при

значительных нагрузениях приводило в расчетах автора диссертации к образованию макрополосы. Анализ ориентации полосы и свойственных ей систем скольжения хорошо согласуется с экспериментальными данными (Теплякова Л.А. и др, 2004, 2006). Остальные результаты, касающиеся деформирования монокристаллов, также подтверждаются либо аналитическими (когда это возможно), либо экспериментальными данными других авторов.

Если до этого результаты касались в основном только монокристаллов, то заключительные исследования (вторая часть четвертой главы) посвящены моделированию поведения поликристаллов алюминия применительно к описанию процесса сварки трением с перемешиванием. Полученные здесь результаты тщательно проанализированы и там, где это возможно, сопоставлены с имеющимися опытными данными. Таким образом, можно утверждать, что основные выводы и положения диссертации **обоснованы и достоверны**.

Научная новизна диссертационной работы.

С точки зрения новизны материалы диссертации имеет смысл разделить на три больших блока – это модель для расчетов, условия использования этой модели в расчетах и собственно результаты расчетов. В каждом из блоков присутствует элемент новизны. Так, построенная модель явно учитывает поликристаллическую структуру с геометрией скольжения и механизмами упрочнения, что выполнено *впервые*. При моделировании статического (квазистатического) нагружения *впервые* для 3D моделей упругопластических и вязкоупругих материалов использованы динамические краевые задачи. Наконец, при численном исследовании задач сварки трением с перемешиванием и сопутствующих проблем *впервые* изучено влияние формы и текстуры на локализацию пластической деформации.

Возможные пути использования результатов работы, собственно, определяют её значимость для науки и практики. А именно – исследовательским организациям полезны будут методологические приемы, развитые при построении моделей, организации и проведении расчетов с поликристаллическими телами. А в материаловедческой практике несомненно могут применяться и применяются те инструменты моделирования, которые развивает и соискатель, и в целом школа её руководителя В. А. Романовой. Отдельные результаты, которые касаются особенностей локализации деформаций на границах зёрен, могут быть использованы при интерпретации экспериментов и при их планировании.

Охватывая текст в целом, можно утверждать, что в рецензируемой работе устанавливаются **новые закономерности** процессов упругопластического деформирования металлов с учетом структурной неоднородности при квазистатических нагрузениях на основе математического моделирования на примере моно- и поликристаллического алюминия. Тематика работы и результаты её **соответствуют**

формуле в паспорте специальности «выявление новых связей между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения» и **области исследования** «Механика композиционных и интеллектуальных материалов и конструкций».

Все результаты, полученные соискателем, очень грамотно описываются и квалифицированно истолковываются, сама работа написана аккуратно и хорошо оформлена. Основные результаты автора **опубликованы** в 17 работах, в том числе 6 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК (из них 5 статей в журналах, индексируемых Web of Science). Кроме того, результаты многократно докладывались на научных конференциях разного статуса и публиковались в соответствующих итоговых трудах.

Замечания по работе.

1. На странице 124 имеется такая фраза: «на каждой из боковых граней образца **следует ожидать** формирования системы горизонтальных и пересекающихся наклонных линий скольжения». Хотелось бы понять – оправдались ли ожидания автора, как это получено и проиллюстрировано.

2. На странице 144 есть два утверждения – о полосе некристаллографического сдвига, проходящей сквозь зерна и группы зерен независимо от их ориентации, и, второе утверждение – о том, что границы зерен являются «**существенным барьером**» для деформационного процесса.

По этому поводу оппонент ожидает более убедительных пояснений и подробного анализа. В частности:

– действительно ли некристаллографический сдвиг будет абсолютно одинаков (то есть независим) для любых ориентаций?

– границы зёрен являются «**существенным барьером**» независимо от ориентации зерна?

– что такое «**существенный барьер**» количественно?

Отмеченные замечания **не ставят под сомнение** общую исключительно высокую оценку работы и квалификации её автора.

Считаю, что диссертация Батухтиной Екатерины Евгеньевны «Микромеханическая модель деформационного поведения поликристаллического алюминия на основе физической теории пластичности» представляет собой единолично написанную научную работу; она выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, совокупность результатов которой можно квалифицировать как решение задачи численного моделирования деформирования поликристаллических тел, имеющей существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела.

В целом по уровню решаемых задач, актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных результатов работа удовлетворяет всем требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, а ее автор, Батухтина Екатерина Евгеньевна, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент
 профессор кафедры комплексной
 информационной безопасности
 электронно-вычислительных систем
 федерального государственного бюджетного
 образовательного учреждения высшего образования
 «Томский государственный университет
 систем управления и радиоэлектроники»,
 доктор физико-математических наук
 (25.00.10 – Геофизика, геофизические методы
 поисков полезных ископаемых,
 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела)

Немирович-Данченко Михаил Михайлович

Дата: 28.11.2019

Подпись М. М. Немировича-Данченко удостоверяю.
 Ученый секретарь Томского университета
 систем управления и радиоэлектроники



Е. В. Прокопчук

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 40

Телефон: (3822) 51-05-30

Адрес электронной почты: office@tusur.ru

Адрес официального сайта организации: <http://www.tusur.ru>