

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Зиновьевой Ольги Сергеевны

«Механические аспекты формирования мезоскопического деформационного рельефа на поверхности нагруженных поликристаллов»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

При оценке прочности и износостойкости металлов и сплавов важную роль играют процессы деформирования, происходящие на поверхности и в приповерхностных слоях материала. В первую очередь, это процессы, приводящие к изменению формы поверхности и к формированию ее рельефа. Деформационный рельеф может формироваться как в процессе эксплуатации изделия, так и при его изготовлении, что неизбежно приводит к ухудшению качества поверхности и механических свойств материала в целом. В этой связи настоящее диссертационное исследование представляет значительный интерес как в теоретическом, так и прикладном аспектах, и безусловно является актуальным.

Целью работы О.С.Зиновьевой является установление закономерностей формирования и развития деформационного рельефа на поверхности поликристаллических материалов при их растяжении. Методика исследования заключается в численном моделировании означенного эффекта, сравнении полученных результатов с известными экспериментальными данными и установлении на этой основе закономерностей процесса деформирования.

Новизна проведенного исследования и полученных в работе результатов состоит в том, что в работе:

1. исследована деформация свободной поверхности нагруженных поликристаллов алюминиевого сплава и стали методами численного моделирования при явном учете зеренной структуры;
2. выявлена определяющая роль зеренной структуры в поверхностных деформационных процессах;
3. установлено, что формирование деформационного рельефа на поверхности поликристаллических материалов при растяжении обусловлено возникновением внутренних напряжений, действующих ортогонально к свободной поверхности и характеризующихся приближающимся к периодическому распределением локальных областей растяжения и сжатия;
4. определено влияние формы зерен на характеристики и развитие поверхностного деформационного рельефа поликристаллов в условиях одноосного растяжения на основе результатов численного моделирования;
5. изучено влияние упрочнения поверхности на формирование и развитие деформационного рельефа с помощью численного моделирования;
6. выявлена мультимодальность распределения пиков рельефа поверхности на основе статистического анализа численных результатов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, состоящего из 242 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи, описаны методы исследования, положения, выносимые на защиту, новизна, научная и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация полученных результатов. В реферативной форме изложено краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена обстоятельному обзору литературы и анализу современного состояния изучаемой тематики. Рассмотрены экспериментальные и теоретические исследования процессов формирования рельефной структуры на поверхности металлов и сплавов при их растяжении, восходящие к работам Иоффе и Ребиндера. В большинстве

работ отмечается, что именно в приповерхностных слоях материала имеет место наиболее интенсивная пластическая деформация и зарождаются трещины. В ряде работ формирование рельефа поверхности связывают со структурной неоднородностью (зеренной структурой) материала. Отмечается, что именно форма и размеры зерен, а также их пространственная ориентация могут приводить к формированию последовательных локальных областей интрузии и экструзии, т.е. к формированию складчатой рельефной структуры. Во многих работах отмечается также важность учета температуры, при которой осуществляется процесс деформирования.

Несмотря на значительный интерес и множество исследований по данной тематике, отмечается, что в настоящее время ряд вопросов о причинах, механизмах и определяющих факторах исследуемого эффекта остается дискуссионным. В целом, автором продемонстрировано глубокое знание литературы по избранной теме и тенденций, сложившихся в современной науке.

Во второй главе приводится описание математической постановки задачи с позиций континуальной механики применительно к упругопластическим средам, обладающим внутренней структурой. Представлен обзор моделей феноменологической и физической теорий пластичности, используемых разными авторами для моделирования пластического течения в металлах и сплавах. Используемая в настоящем диссертационном исследовании модель упругопластического поведения материалов (алюминиевого сплава и стали) основана на аппроксимации экспериментальных данных и учитывает изотропное деформационное упрочнение через зависимость напряжений зерен от величины пластической деформации.

Для численного решения динамической задачи в пространственной постановке автором выбран конечно-разностный метод Уилкинса. Обсуждены особенности численной реализации метода для случая структурно-неоднородной среды. Сделан обзор методов генерации зерен материала и детально описана общая схема метода пошагового заполнения, используемого в работе для генерации зеренной структуры.

Третья глава посвящена численному моделированию процессов деформирования поверхности поликристаллических алюминиевых сплавов при квазистатическом нагружении. Учтены различные формы зерен структуры, используемые для моделирования алюминиевого сплава (структуры с равноосными и вытянутыми зёрнами) и их характерные механические свойства. Показано, что в процессе растяжения образца на его свободной поверхности формируется складчатая рельефная структура. Ее формирование обусловлено возникновением противоположных по знаку напряжений на границах зерен, и направленных ортогонально к свободной поверхности. Численно определены минимальные размеры расчетной области, обеспечивающие корректное решение поставленной задачи: толщина слоя должна быть не менее 3-4 характерных размеров зерна. Интересно отметить, что рельефная складка также имеет характерный размер (квазипериод), который превышает размер зерна. Последнее означает, что наблюдается процесс самоорганизации, когда складка формируется путем коллективного движения группы зерен. Определены характерные параметры процесса деформирования в зависимости от параметров задачи и условий нагружения (форма и размер зерен, их пространственная ориентация, граничные условия и др.).

Отдельный интерес представляет анализ поведения одного крупного включения (крупного зерна) в поверхностном слое материала. Показано, что если жесткость включения выше, чем жесткость окружающего материала, то это приводит к экструзии поверхности, т.е. включение в определенном смысле «выталкивается» средой наружу, и наоборот, если жесткость включения ниже, тогда оно «погружается» вглубь среды, и над включением формируется зона интрузии. Проанализировано влияние глубины залегания включения и его пространственной ориентации на формирование поверхностного рельефа.

В целом, результаты численного моделирования хорошо согласуются с данными экспериментов.

Исследования, представленные в четвертой главе, посвящены анализу влияния упрочненного поверхностного слоя на эволюцию состояния поверхности нагруженных поликристаллов на примере ферритно-мартенситных сталей. В качестве упрочняющей поверхности рассмотрены тонкие прослойки, не имеющие зеренной структуры, в то время, как основной материал, по-прежнему, представляет собой зернистую структуру. Как и ожидалось, учет упрочняющего слоя приводит к тому, что рельеф поверхностной структуры становится менее выраженным, т.е. упрочняющий слой оказывает демпфирующее влияние на формирование складчатых структур. На основе статистического анализа показано, что гистограмма распределения пиков рельефной структуры имеет мультимодальный характер, что подтверждает наличие иерархической структуры поверхностных складок.

В Заключение приведены основные результаты и выводы работы, подтверждающие выполнение поставленной цели и задач исследования.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается корректностью математической постановки задачи, использованием апробированных методов решения, проведением тестовых расчетов, а также соответствием полученных результатов численного моделирования экспериментальным данным и численным результатам, полученным другими авторами.

Все результаты диссертации опубликованы в 41 научной работе автора, в том числе 11 работ – в изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. Полученные результаты многократно докладывались на международных, всероссийских и региональных научных конференциях.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Многими авторами подтверждается, что температура, при которой осуществляется процесс деформирования, играет весьма значительную роль в процессах пластического течения поверхностных слоев материала и оказывает существенное влияние на формирование деформационного рельефа. В используемой модели влияние температуры никак не учитывается.
2. В работе рассматривается упругопластическая модель среды, основанная на аппроксимации экспериментальных данных. На стадии пластического течения учитывается упрочнение. В реальности зеренная структура приводит к существенной неоднородности поведения и может быть причиной не только упрочнения, но и локальной разгрузки в отдельных точках среды даже при увеличении параметра нагружения. В работе не сказано предусматривает ли используемая модель разгрузку материала, и если предусматривает, то каким образом она учитывается при моделировании?
3. Начальные данные для расчета (стр. 71, выражение 3.12) принимаются без учета начальных (самоуравновешенных) напряжений. Последние могут играть существенную роль в процессе формирования деформационного рельефа поверхности.

Сделанные замечания ни в коей мере не снижают общую положительную оценку диссертации.

Оценивая работу О.С.Зиновьевой в целом, следует отметить, что диссертация содержит решение задачи по установлению закономерностей формирования и развития деформационного рельефа на свободной поверхности поликристаллов в условиях механического нагружения, имеющей существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела. Результаты диссертационного исследования соискателя могут быть использованы для анализа поведения материалов и конструкций в условиях

механического нагружения, а выявление закономерностей образования и эволюции складчатых структур на поверхности деформируемых поликристаллов позволяет сформулировать рекомендации для подавления нежелательных эффектов, вызванных формированием деформационного рельефа.

Результаты, полученные в настоящей диссертации, могут быть использованы в таких организациях, как Институт механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), Уфимский государственный нефтяной технический университет (г. Уфа), Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа), Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (г. Санкт-Петербург), Национальный авиационный университет (г. Киев), Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск), Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург), Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина (г. Тамбов) и др.

Диссертация О.С.Зиновьевой выстроена логично и отвечает требованию внутреннего единства. Структура диссертационной работы соответствует ее содержанию. Оформление диссертации в целом соответствует действующим стандартам и требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация написана автором самостоятельно, является научно-квалификационной работой, которая содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора.

Автореферат правильно отражает полученные результаты и соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация О.С.Зиновьевой соответствует п. 3 «Мезомеханика многоуровневых сред со структурой» паспорта специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Считаю, что диссертационная работа О.С.Зиновьевой отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

старший научный сотрудник

лаборатории механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН,

доктор физико-математических наук

(01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела),

старший научный сотрудник

Лавриков Сергей Владимирович

630091, г. Новосибирск, Красный пр., д. 54

Тел. +7 (383) 217-05-36, e-mail: [admin@misd.nsc.ru](mailto:admin@misd.nsc.ru), <http://www.misd.ru/>

Подпись Лаврикова Сергея Владимировича заверяю.

Ученый секретарь ИГД СО РАН,

к.т.н.



Кондратенко А.С.

13 августа 2015г.