

УТВЕРЖДАЮ

Ректор федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»,

дoктор физико-математических наук,
профессор



_____ А. А. Ташкинов

_____ » ноября 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»
на диссертацию Батухтиной Екатерины Евгеньевны
«Микромеханическая модель деформационного поведения поликристаллического
алюминия на основе физической теории пластичности»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертации

Численное моделирование является одним из основных инструментов для решения задач механики деформируемого твердого тела, связанных с оценкой напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов, разработкой критериев работоспособности и надежности материалов и конструкций, ранним прогнозом катастрофического разрушения, разработкой новых материалов и оптимизацией их свойств. В настоящее время в области инженерного анализа НДС с применением методов численного моделирования достигнут существенный прогресс. Разработаны мощные конечно-элементные пакеты, предназначенные для решения широкого класса инженерных и научно-технических задач, использующие хорошо апробированные методики расчетов для конкретных материалов, конструкций и условий нагружения. Доступны обширные библиотеки моделей материалов, конечных элементов и геометрических объектов, необходимых для создания сложных моделей и проведения численного инженерного анализа. Вместе с тем, появление широкого класса новых материалов и технологий их получения, а также методов экспериментального анализа, существенно расширивших представления о процессах деформации и разрушения, предъявляет принципиально новые требования к моделям, описывающим поведение нагруженных материалов. В рамках современных представлений

поведение неупруго деформируемого материала на макроуровне зависит главным образом от его структуры и реализации механизмов деформирования на низших масштабных уровнях; в частности, макроскопическое разрушение является следствием накопления необратимой деформации и повреждений на нижележащих масштабных уровнях. Вследствие этого существенный интерес представляет разработка многоуровневых моделей материалов, учитывающих влияние на эволюцию напряженно-деформированного состояния процессов разных масштабных и структурных уровней. В связи с этим представленная диссертация, посвященная разработке микромеханической модели алюминиевых сплавов в рамках физической теории пластичности (ФТП) с явным учетом зеренной структуры, отвечает современным потребностям механики деформируемого твердого тела и является актуальной.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, содержащего 163 наименования. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, включая 58 рисунков и 5 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, новизна и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, определены методы исследования, обоснована достоверность результатов и выводов, приведены сведения об апробации и публикации результатов работы и о личном вкладе автора, в реферативной форме изложено содержание разделов диссертации.

Первая глава содержит литературный обзор по теме диссертационного исследования. Рассматриваются механизмы дислокационной пластичности в металлах и, в частности, в кристаллах с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой. Изложены основные допущения и гипотезы физической теории пластичности. Обсуждаются модели для описания эволюции критических напряжений, предложенные в работах разных авторов. Представленный литературный обзор свидетельствует об удовлетворительной осведомленности соискателя о современном состоянии проблемы в России и за рубежом.

Во второй главе формулируется трехмерная краевая задача упруго-пластического деформирования в динамической и статической постановках. Определяющие соотношения для ГЦК кристаллов записываются в форме обобщенного закона Гука с учетом упругой анизотропии, связанной с кристаллическим строением. Описание пластического течения на микроуровне осуществляется в рамках моделей ФТП, в которых компоненты тензора скоростей пластических деформаций связаны геометрическими соотношениями со скоростями пластических сдвигов на активных системах скольжения в кристалле. Для определения изменения критических напряжений сдвига на различных системах скольжения предложена простая феноменологическая зависимость, учитывающая деформационное и зернограничное упрочнение аддитивными вкладами. Подробно рассматриваются методы построения моделей структуры поликристаллов, их введение в краевую задачу и особенности численного решения. Для построения трехмерных поликристаллических структур с различной

геометрией зерен используются алгоритмы, разработанные в коллективе ИФПМ и получившие развитие в настоящей работе.

Третья глава посвящена особенностям численного решения задач мезомеханики с явным учетом внутренних границ раздела методом конечных элементов. Особое внимание уделяется проблеме оптимизации вычислительных затрат при решении поставленных задач. В качестве подхода, позволяющего существенно снизить требования к вычислительным ресурсам, предлагается осуществлять моделирование квазистатических деформационных процессов в динамической постановке с привлечением явных схем интегрирования по времени. Целесообразность такого подхода подтверждается проведенными оценками вычислительных затрат при моделировании квазистатического нагружения с использованием ABAQUS/Standard и Explicit. Для определения условий применимости динамической постановки для описания квазистатической деформации проведены расчеты для моделей с различной геометрией внутренних границ раздела, включая поликристаллические структуры. На основе анализа данных выполненных расчетов сделан вывод о том, что близость результатов решения задач в динамической и статической постановках в пределах десятых долей процента обеспечивается при условии плавного наращивания нагрузки на этапе упругого деформирования и использовании моделей материалов, исключая скоростную чувствительность. Особое внимание уделяется реализации второго условия в моделях ФТП, которые в подавляющем большинстве основаны на вязкопластических соотношениях. Для исключения скоростной чувствительности на мезоуровне, где НДС характеризуется существенной неоднородностью, в соотношение для скоростей пластических сдвигов вводится зависимость от скорости полной деформации, которая может быть на порядок выше в областях локализации.

В четвертой главе разработанная микромеханическая модель применяется для моделирования деформации моно- и поликристаллов алюминия в условиях квазистатического деформирования. Расчеты для монокристаллов с различной кристаллографической ориентацией проведены для случая сжатия образцов. Выполнено сравнение результатов моделирования с аналитическими оценками напряжения начала пластического течения на различных системах скольжения и с экспериментальными данными для монокристаллов соответствующих ориентаций. Численно проанализировано влияние деформационного упрочнения на характер локализации пластической деформации в монокристаллах. На основании удовлетворительного соответствия расчетных и экспериментальных данных делается вывод о корректности разработанной модели. Во втором разделе главы представлены результаты моделирования деформации поликристаллических материалов с формой зерен и текстурой, характерной для различных зон соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием. Выполнен численный анализ и сделаны выводы о влиянии текстуры и формы зерен на локализацию пластической деформации в модельных поликристаллических структурах.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертации; результаты и выводы исследования соответствуют поставленным цели и задачам.

Научная новизна исследования и полученных результатов

– Новизна разработанной микромеханической модели алюминиевых сплавов заключается в совместном учете физических механизмов дислокационной пластичности и реальной геометрии структурных элементов – зерен, что позволяет описать в рамках единого подхода процессы локализации пластической деформации на макро и мезоуровнях и исследовать влияние текстуры и геометрии границ зерен на локальные характеристики НДС.

– Новизной обладает подход к численному моделированию квазистатической деформации поликристаллов в рамках динамической постановки, что позволяет минимизировать вычислительные затраты. Для рассмотренного класса задач определены условия численной реализации, обеспечивающие совпадение динамического и статического решений с высокой степенью точности.

– Новыми являются результаты численного исследования влияния формы зерен и текстуры на локализацию пластической деформации в мезообъемах сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием.

Научная и практическая значимость

Полученные в диссертационной работе результаты расширяют существующие знания о влиянии внутренней структуры на деформационный отклик алюминиевых сплавов на микро- и мезоуровнях. Разработанные модели и подходы могут быть использованы для численного анализа деформации алюминиевых сплавов с различной микроструктурой и текстурой в научно-исследовательских организациях РАН и высших учебных заведениях, как, например, Томский государственный архитектурно-строительный университет (Томск), Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск), Институт механики УрО РАН (Ижевск), Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь), Институт механики сплошных сред УрО РАН (Пермь), Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва), Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (Уфа), Уфимский государственный авиационный технический университет (Уфа), Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону), Воронежский государственный университет (Воронеж), Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск), Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург) и др. Значимость исследований подтверждается выполнением проектов, указанных в диссертации, включая Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013-2016, 2017-2020 гг, проекты Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и проекты Российского научного фонда (РНФ).

Практическая значимость работы обуславливается применимостью разработанных моделей для детального исследования и совершенствования технологических процессов механической обработки металлов.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов

Достоверность результатов и выводов обосновывается корректностью математической постановки задач, использованием апробированных численных

методов, исследованием сеточной сходимости решения, удовлетворительным соответствием результатов расчетов экспериментальным данным, аналитическим оценкам и результатам численных исследований, полученным другими авторами.

Апробация и публикация основных результатов диссертации

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 17 работах, в том числе 6 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК (из них 5 статей в высокорейтинговых журналах *Physical Mesomechanics* (Q1), *Computational Materials Science* (Q1), *Meccanica* (Q1), *Facta Universitatis: Ser. Mechanical Engineering* (Q2)). Опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

Результаты диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях по соответствующей тематике (г. Томск, г. Санкт-Петербург, г. Пермь).

Замечания и вопросы по диссертации

1) На стр.32 указано: «Теория существенно упрощается в случае малых упругих деформаций, характерных для большинства металлов. В этом случае пластическим поворотом можно пренебречь и определенные математические выкладки приводят к аддитивной декомпозиции скоростей деформации на упругую и пластическую составляющие». Стоит заметить, что малость упругих деформаций не обуславливает малость упругих поворотов. В популярных моделях ФТП (например, в моделях L.Anand, F.Roters) именно в упругие повороты (в ортогональный тензор \mathbf{R}^e) включается квазитвердое движение, что позволяет описывать несимметричные кинематические воздействия \mathbf{F} – материал (в т.ч. направления скольжения) повернется с \mathbf{R}^e . Например, это позволяет описать наложенное жесткое вращение. В связи со сказанным соотношение (1.22) представляется частным, справедливым только при симметричном \mathbf{F} . В последние годы в публикациях по ФТП данному вопросу уделяется большое внимание, имеются работы и отечественных исследователей, в которых предложено физически обоснованное разложение движения на квазитвердое (вращение) и деформационное.

2) Перед формулой (2.5) содержится текст: «В случае малых упругих деформаций, характерных для металлов, для корректировки напряженного состояния с учетом поправки на поворот в лагранжевой системе координат корректно использовать производную Яумана [108]». Можно заметить, что в диссертации не содержится информации о связи формулы (2.5) с другими соотношениями возможной геометрически нелинейной постановки. Поскольку при решении поставленных краевых задач вследствие неоднородности НДС в принципе могут возникать локальные значительные повороты, представляется, что по приведенному утверждению стоило дать более развернутые комментарии. Для подтверждения используемой гипотезы о малости поворотов в рассматриваемых случаях, по крайней мере, можно было бы вывести поле антисимметричной части получаемого при моделировании тензора (полной) дисторсии.

3) Несколько странным представляется использование изотропного слагаемого в законе упрочнения $f(\varepsilon_{eq}^p)$, так как известно, что латентное упрочнение больше активного. Стоило привести более подробное описание определения параметров функции $f(\varepsilon_{eq}^p)$.

4) В постановке присутствует составляющая закона упрочнения τ^{poly} – «увеличение критических напряжений в поликристалле за счет торможения дислокаций на границах зерен, которое может быть получено из закона Холла-Петча». В тексте диссертации отсутствуют соотношения для определения этой составляющей, при описании результатов для поликристаллов не указано, что данная составляющая использовалась, между тем это представляется необходимым для описания поликристаллов.

5) Понятна аргументация по переходу к определению параметра $\dot{\gamma}_0$ как функции от локальной интенсивности скорости полной деформации (3.35). Вместе с тем, стоит заметить, что в процессе этого вывода было записано: «по результатам численных расчетов был сделан вывод о том, что для обеспечения нечувствительности материала к скорости деформирования начальная скорость пластических сдвигов $\dot{\gamma}_0$ должна быть примерно на порядок выше скорости приложенной [макроскопической] деформации». Если для отдельных точек расчетной области при этом скорость локальных деформаций будет больше или сопоставима с $\dot{\gamma}_0$ (что и обеспечивает лучшую сходимость на макроуровне в целом), то для некоторых точек будет существенное превышение $\dot{\gamma}_0$ над приложенной скоростью деформации, что может привести к некорректной с математической точки зрения «избыточной» релаксации (касательные напряжения на системе скольжения могут стать противоположного знака с приложенным сдвигом).

6) В тексте диссертации нет обоснования, почему «для верификации разработанной модели была проведена серия расчетов для монокристаллов с ориентациями I-IV без учета деформационного упрочнения» (в начале п.4.1.3). Можно ли это назвать верификацией в полной мере, тем более в п.4.1.4 приведены и проанализированы результаты, полученные с полной постановкой?

7) В тексте диссертации и автореферата присутствуют опечатки (например, в диссертации перед формулой (1.24) вместо «направление скольжения» должно быть «нормаль к плоскости скольжения», «производную Яумана»; часто вместо тире поставлен дефис).

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Е. Е. Батухтиной. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Заключение по диссертации

Диссертация «Микромеханическая модель деформационного поведения поликристаллического алюминия на основе физической теории пластичности»

является завершенной научно-квалификационной работой, которая по достоверности, научной новизне и значимости полученных результатов полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям п.п. 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в ред. от 01.10.2018 г.), а ее автор, Батухтина Екатерина Евгеньевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Присутствовало на заседании 16 чел. Результаты голосования: «за» – 16 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел. (протокол № 5 от 08 ноября 2019 г.).

Отзыв составил заведующий кафедрой
«Математическое моделирование систем и процессов»
Пермского национального исследовательского
политехнического университета,
доктор физико-математических наук
(01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела),
профессор

Трусов Петр Валентинович

Подпись Трусова Петра Валентиновича удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ПНИПУ,
доцент, кандидат исторических наук



В. И. Макаревич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

(3422) 19-80-67, (3422) 39-12-97; rector@pstu.ru; http://pstu.ru