Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ
Уральского отделения
Российской академии наук
(ИМАШ УрО РАН)
Комсомольская ул., 34, г. Екатеринбург, 620049
Тел.: (343) 374-47-25, факс: (343) 374-53-30
E-mail: ges@imach.uran.ru; http: //www.imach.uran.ru
ОКПО 04538044, ОГРН 1036603482992
ИНН/КПП 6660005260/667001001
04.06.2019 №16347/01-2171-79
на № _____ **от** _____

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки
Институт машиноведения УрО РАН,
д.т.н.

Смирнов
июня 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации «Институт машиноведения УрО РАН»

на диссертационную работу **Шарифуллиной Эльвиры Ривгатовны** «Многоуровневая модель для описания сверхпластического деформирования поликристаллических материалов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

На отзыв представлены:

диссертация на 149 страницах машинописного текста, включая 28 рисунков,

автореферат диссертации на 20 страницах, включая список из 10 основных публикаций автора по теме диссертационной работы, в том числе 4 – в ведущих научных журналах из списка, рекомендованного ВАК для публикации материалов диссертаций, 1 статья – в журнале, индексируемом в базе данных Scopus, 4 статьи – в сборниках материалов конференций, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и/или Web of Science, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

При подготовке отзыва были рассмотрены публикации автора из открытых научных изданий. Основное содержание диссертации нашло отражение в этих публикациях. Диссертационная работа состоит из введения,

списка сокращений и основных обозначений, четырех глав, заключения, списка литературы из 218 наименований.

Актуальность темы диссертации

Для развития математического моделирования представляется необходимым усовершенствование методов описания сложных многомасштабных систем, эволюционирующих под воздействием множества изменяющихся в широких диапазонах внешних факторов и в результате нелинейных взаимодействий элементов. Примером таких объектов, на котором можно отладить соответствующий аппарат, являются поликристаллические материалы, подвергаемые термомеханической обработке. В связи с этим отметим, что в последнее время активно развивается подход, ориентированный на построение многоуровневых конститутивных моделей на основе физических теорий пластичности, позволяющий явным образом описывать механизмы деформирования и эволюцию структуры материала. Многоуровневые физические модели обладают значительной универсальностью: для конкретного материала параметры модели являются постоянными, их определение из простых опытов позволяет получать и анализировать результаты моделирования при любых других видах нагружения, а в случае корректного учета различных значимых механизмов – описывать деформирование материала в достаточно широком диапазоне изменения внешних параметров воздействий. Кроме того, модели данного класса обладают хорошими прогнозными свойствами: могут применяться для описания поведения и физико-механических свойств других материалов (в том числе – еще несуществующих) со сходным действием механизмов деформирования. Очевидно, что модели данного класса подразумевают обязательное использование эффективных численных методов, реализуемых в программных комплексах для современной вычислительной техники – только в этом случае можно использовать такие модели для исследования технологических процессов.

Диссертационная работа Э.Р. Шарифуллиной посвящена разработке многоуровневой математической модели, учитывающей важнейшие физические механизмы, что позволяет описывать деформирование в режимах упруговязкопластичности и структурной сверхпластичности, а также переходов между ними. Как показывают экспериментальные данные, даже при простейшем одноосном испытании на структурную сверхпластичность реализуется довольно сложный сценарий с переходом к режиму сверхпластичности, действуют и оказывают значимое взаимовлияние сразу несколько физических механизмов, изменяется их роль в процессе деформирования, а также существенно эволюционирует структура материала. В связи с вышесказанным, построение указанной модели представляется весьма актуальным.

Структура и содержание диссертации

Во **введении** содержится обоснование актуальности работы, научной новизны, теоретической и практической значимости исследования. Приведены формулировки цели и задач работы, обсуждаются подходы и методы исследования, а также положения, выносимые на защиту. Представлены сведения о степени достоверности, об апробации результатов. Отмечен личный вклад автора. Приведено краткое описание глав диссертационной работы.

В первой главе содержится обзор литературных источников по теме диссертации. Приведена систематизированная информация по результатам экспериментальных исследований сверхпластического деформирования различных металлических материалов с подробным анализом действующих механизмов и эволюционирующей структуры. Проанализированы физические причины, обусловливающие упрочнение и разупрочнение в ходе рассматриваемого процесса. Внимание акцентируется на том, что для многих металлических сплавов возможна стадийность кривой растяжения, связанная с действием различных механизмов (внутризеренного дислокационного и

зернограничного скольжения), их взаимодействием, изменением ролей, а также сопутствующих процессов – динамической рекристаллизации, зернограничной диффузии, ротаций. Рассматриваются подходы и методы к исследованию сверхпластического деформирования, особое внимание уделено обзору теоретических моделей с анализом их возможностей к описанию указанных выше механизмов и процессов. Обозначена перспективность использования многоуровневого физического подхода.

Дальнейшие две главы диссертации содержат описание разработанной трехуровневой модели.

Вторая глава посвящена вопросам построения математической модели. Представлена общая структура статистической модели на базе физической теории упруговязкопластичности для описания поведения представительного макрообъема поликристалла, содержащая определяющие, эволюционные и замыкающие соотношения. Приведена математическая постановка трехуровневой модифицированной статистической модели, включающая совокупность соотношений для описания механизма зернограничного скольжения, играющего чрезвычайно важную роль при реализации деформирования в режиме структурной сверхпластичности. Соотношения модели сформулированы с учетом температуры и содержат внутренние переменные, характеризующие изменение дефектной и зеренной структуры. Обсуждается вопрос о согласовании определяющих соотношений масштабных уровней.

Третья глава диссертации содержит разработанный на основе анализа экспериментальных данных «сценарий», который реализуется при деформировании с переходом к режиму структурной сверхпластичности, и соответствующее описание законов упрочения для внутризеренного и зернограничного скольжения. В конце главы представлена полная система уравнений трехуровневой модели.

В **четвертой главе** приведены результаты практического использования разработанной трехуровневой модели для описания

сверхпластического деформирования представительного объема поликристалла. Приводится алгоритм реализации модели и обсуждается вопрос выбора численных методов. Идентификация параметров модели проведена для одноосного растяжения алюминиевого сплава 1420 при скорости деформации 10^{-3} $с^{-1}$, верификация – при 10^{-2} $с^{-1}$. Расчетные кривые растяжения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными; анализ изменения ролей основных механизмов и текстуры в процессе деформирования показывает соответствие предложенному сценарию. Продемонстрированы также возможности модели для описания других видов нагружения – осадки, простого сдвига.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Научная новизна работы заключается в комплексности разработанной трехуровневой модели, позволяющей описывать сложный процесс сверхпластического деформирования. Предложен новый способ описания важного механизма зернограничного скольжения с учетом взаимовлияния механизма внутризеренного дислокационного скольжения и действия других сопутствующих процессов, характерных для температурно-скоростных условий реализации деформирования в режиме сверхпластичности. Кроме того, физически обоснованная формулировка законов упрочнения позволяет в рамках единой модели описывать не только режим структурной сверхпластичности, но и переходную к нему стадию.

Теоретическую значимость работы состоит в расширении спектра материалов и воздействий, которые можно анализировать с использованием модели. Предложенная структура многоуровневой статистической модели с введением промежуточного структурного уровня может использоваться для построения моделей в других областях.

Практическая значимость работы определяется созданием собственного комплекса программ для реализации предложенной модели на ЭВМ, с помощью которого можно анализировать процессы

сверхпластического деформирования материалов в относительно широких температурно-скоростных диапазонах.

К положительным сторонам работы стоит отнести тот факт, что идентификация параметров модели проведена на реальном алюминиевом сплаве, широко используемом в авиационной промышленности; удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных результатов подтверждает **достоверность** последних, а также корректность разработанной модели.

Рекомендации по использованию результатов и выводов работы

Разработанная модель, полученные результаты и выводы работы могут быть использованы при интерпретации экспериментальных данных, при моделировании реальных технологических процессов, основанных на сверхпластичности. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в ряде организаций и предприятий:

1. Пермский национальный исследовательский политехнический университет (г.Пермь);
2. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г.Екатеринбург);
3. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г.Москва);
4. Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа);
5. АО «ОДК-Авиадвигатель» (г.Пермь);
6. ОАО «ВИЛС» (г.Москва).

Замечания по диссертации:

1. На странице 68 даны определения представительного объема (ПО) на макроуровне и мезоуровне. Однако не сказано, что представляет собой представительный объем специально введенного диссертантом структурного уровня для описания механизма зернограничного скольжения (ЗГС).

2. В тексте диссертации не указано, какой математический метод был использован в разработанном комплексе программ для дискретизации геометрии представительных объемов на разных масштабных уровнях (метод конечных элементов, метод жестких блоков или что-то иное?). Не описано, как расчетная информация передается с уровня на уровень в рамках использованного метода дискретизации областей.
3. Работа также не лишена некоторых опечаток. Так, в разделе 4.3 диссертации на рис.4.13–4.15 в подписях по оси абсцисс не хватает знака модуля (в тексте и названиях рисунков знаки модуля присутствуют); на рис.4.21, по всей видимости, по оси абсцисс должно стоять обозначение "γ", как и на рис. 4.18–4.20, и соответствующее описание в тексте и названии рисунка.

Все указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Результаты диссертационного исследования в достаточной мере апробированы. Диссертация и автореферат в целом написаны грамотным научным языком. Содержание автореферата соответствует основному содержанию диссертации.

Заключение. Диссертационная работа Шарифуллиной Эльвиры Ривгатовны «Многоуровневая модель для описания сверхпластического деформирования поликристаллических материалов» является законченной научно-исследовательской работой, имеющей научное и практическое значение. Диссертационная работа соответствует основным пунктам паспорта специальности 05.13.18, а также требованиям положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, автор работы Шарифуллина Эльвира Ривгатовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составил заведующий лабораторией механики деформаций, д.т.н., профессор Коновалов Анатолий Владимирович.

Отзыв заслушан и обсужден на научном семинаре отдела Механики машин и технологий ИМАШ УрО РАН, протокол № 7 от 4 июня 2019 года.

Руководитель семинара, д.т.н., профессор — А.В. Коновалов

Секретарь семинара, с.н.с., к.т.н. — О.Ю. Муйземнек

Собственноручные подписи А.В.Коновалова и О.Ю.Муйземнек удостоверяю.

Ученый секретарь ИМАШ УрО РАН — А.М. Поволоцкая