

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Гончарова Иннокентия Александровича
на тему: «Моделирование влияния микроструктурных механизмов
на поведение материалов при сверхпластическом деформировании»
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого
тела»

Представленное вниманию диссертационное исследование посвящено изучению особенностей формоизменения сплавов в сверхпластичном состоянии. Реализовывать повышенную пластичность материалов с квазиравномерными деформациями в сотни-тысячи процентов возможно благодаря высокой скоростной чувствительности напряжения и, как следствие, сопротивлению развитию возникающих в материале микрошеек. Состояние сверхпластичности возникает при определенных температурно-скоростных условиях деформации, что позволяет получать сверхпластической формовкой изделия, в том числе из труднодеформируемых сплавов и даже керамических материалов. Метод сверхпластической формовки используют для получения изделий сложной геометрии в разных отраслях промышленности. Тематика не теряет актуальность и популярность у исследователей в последние десятилетия, так как, несмотря на многолетний накопленный экспериментальный опыт и фундаментальное понимание процесса, остаются научные противоречия и технологические сложности, как в вопросах механики твердого тела, так и материаловедения сверхпластичности. Преимущества представленной диссертантом работы заключаются в междисциплинарном подходе к исследованию, что добавляет данной работе актуальности и значимости. Разработаны феноменологические модели сверхпластической деформации, учитывающие эволюцию параметров микроструктуры и модели эволюции зерен, учитывающие возможность

уменьшения размера зерен при деформации. Конечно, используемые данные разных статей, полученных на разных материалах, сопоставлять сложно. На практике, параметры структуры существенно зависят от варьирования состава в пределах марки сплава, а при равном составе от технологии обработки. Важным оказывается не только размер зерен, но и их форма, структура границ зерен и углы разориентировки, плотность дислокаций, во время деформации может меняться соотношение фаз, как, например, в титановых сплавах. В виду множества микроструктурных параметров, способных определять сверхпластичное поведение сплавов, для получения минимальных ошибок расчетов желательно использовать кривые деформации и эволюцию параметров микроструктуры, полученные в рамках одной экспериментальной работы. Несмотря на это, автору удалось получить согласованные результаты и адекватные модели на основе экспериментальных данных разных исследователей, соответствующие физике сверхпластичного состояния и в целом, согласующиеся с опубликованными данными, что подтверждает обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизну.

Необходимо отметить качественный обзор литературы, который выполнен с критическим анализом и отмечает достоинства и недостатки обсуждаемых исследований. По каждому разделу, включая литературный анализ, изложены заключения и факторы, обосновывающие дальнейшие действия, выбор методик и подходов. Построение работы логично и воспринимается как цельное, последовательное и грамотно поставленное исследование.

В первой главе автор с использованием методом математического анализа описывает характерную для мелкозернистых сплавов сигмоидальную зависимость напряжения от скорости деформации в логарифмических координатах, в области перегиба которой наблюдается максимальная скоростная чувствительность напряжения (m). Близким к максимуму m скоростям деформации, на так называемом линейном участке II, часто

соответствуют и максимальные значения относительного удлинения до разрушения. Автор доказывает с позиции математики, что структурно-механические модели, основанные только на параллельном или только последовательном соединении любого числа нелинейно вязких элементов, не удовлетворительно описывают поведение мелкозернистых материалов, при этом, модель со смешанным типом соединения нелинейно вязких элементов, приводит к желаемой сигмоидальности формы кривой. По главе имеется грамотно сформулированное заключение.

Во второй главе, описаны результаты разработки феноменологической модели деформационного поведения в сверхпластичном состоянии в условиях одноосного растяжения. Как правильно отмечает автор, корректность эксперимента на растяжение и моделирования кривой растяжения определяет адекватность моделирования формоизменения, выбор режима сверхпластической формовки и успешное получение конечной детали. При проведении экспериментов на растяжение в литературе встречаются два подхода: (1) испытания с поддержанием скорости деформации постоянной, т.е. скорость деформирования увеличивается пропорционально увеличению длины образца (при допущении равномерной деформации), или (2) часто встречаются в литературе экспериментальные данные когда скорость деформации рассчитана для начальной длины образца, а испытания ведут, по сути, при постоянной скорости деформирования без пересчета напряжений или с пересчетом напряжений по известному значению скоростной чувствительности. На последних кривых часто возникает скоростное и геометрическое разупрочнение, никак не связанное с микроструктурными изменениями в образце. Важно, что за основу автором выбраны литературные данные полученные на эксперименте именно с постоянной скоростью деформации. Анализом опубликованных разными авторами данных по сплаву ВТ6 создан обобщающий алгоритм идентификации параметров модели, универсальность и значимость которого заключается в возможности описания поведения материала исходя их разных определяющих соотношений для

сверхпластичного состояния. Адекватность предложенных метрик диссертант успешно подтвердил сравнением моделей, построенных на основе различных систем уравнений и отличающихся входных данных. Феноменологическая модель адекватно описывает кривые даже на начальном участке, зачастую игнорируемом исследователями. Как совершенно точно отмечает автор работы, в процессе сверхпластической формовки, так и сверхпластической деформации в целом, упругие деформации пренебрежимо малы по сравнению с пластическими. Однозначно выделить на кривых одноосного растяжения при горячей деформации и низких скоростях деформации упругий участок сложно, а вот говорить о деформационном упрочнении на начальной стадии важно и зачастую правомерно. Отклонение от линейности напряжение-деформация начинаются при низких значениях деформации и могут быть вызваны действительными изменениями в микроструктуре сплавов. Значительное упрочнение может наблюдаться до десятков процентов, соответственно, должно играть важную роль в начальный момент формовки, таким образом, важно сравнить поведение при одноосном растяжении и при сложном нагружении на начальной стадии деформации. Небольшое техническое замечание по рисункам 2.3 и 2.4б, автор использует обозначения серым крестиком для полученных в разных условиях экспериментальных данных и не всегда можно однозначно трактовать их соответствие расчетным данным представленным в виде линий.

В третьей главе рассмотрены модели для состояния сложного нагружения, возникающего непосредственно при сверхпластической формовке. Такие модели обычно основаны на данных одноосного растяжения и необходимы для разработки технологического процесса формовки, создания регламентируемой формы изделия и толщины. Последнее является ключевой проблемой сверхпластической формовки, над решением которой работают исследователи и промышленники разных стран. Согласиться полностью можно с выводами автора, например, с тем, что есть теоретический предел однородности толщины изделия, а получение одинаковой толщины во всех

точках невозможно и при суб-микронных размерах зерен. Данный вывод согласуется с экспериментальными фактами. Результаты выглядят логично и с позиции зависимости разнотолщинности от размера зерна. Для каждого размера зерна конкретного материала скорость деформации, обеспечивающая максимальную скоростную чувствительность напряжения, будет определенной и разной, и, при этом, скорость деформации будет увеличиваться с уменьшением размера зерна. Разработанный автором алгоритм, позволяющий анализировать влияния роста зерен при разных температурно-скоростных условиях деформации, значим с практической точки зрения. Результаты главы 3 являются важной частью работы, постановка задачи, изложение результатов и основные заключающие положения сформулированы грамотно. Уточненная модель, включающая микроструктурный параметр, позволяет получить отличия в распределении толщин в зависимости от скорости деформации. Можно порекомендовать сравнить конкретные значения ошибок определения толщины для базовой и модифицированной модели. Небольшое техническое замечание, рисунок 3.9 размещен в главе 3.5.1, а обсужден в разделе 3.5.2.

В четвертой главе предложена модель, учитывающая разупрочнение при сверхпластической деформации, такое состояние часто возникает в случае, когда динамическая рекристаллизация доминирует над динамическим ростом зерен, и возникает у ряда сплавов в определенных температурно-скоростных условиях деформации. Предложенная модель структурных изменений при сверхпластическом течении учитывает не только изменение среднего значения, но и изменение распределения зерен по размерам, что позволило сделать важные выводы. С позиции материаловедения можно согласиться, что процесс измельчения зерен (динамической рекристаллизации) при сверхпластической деформации может быть неоднородным. Мелкие зерна участвуют в зернограницном скольжении и сами практически не деформируются, т.е. в них не возникает условий для динамической рекристаллизации. Крупные зерна могут деформироваться из-за действия двух

других механизмов деформации – дислокационного скольжения/ползучести и диффузионной ползучести, а при повышенных скоростях деформации, в основном, из-за увеличения плотности дислокаций в результате интенсивного дислокационного скольжения, что приводит к росту плотности дислокаций и динамической рекристаллизации. С ростом скорости деформации зернограничное скольжение ослабевает, а внутризеренное дислокационное развивается в более мелких зернах. Таким образом, предложенный диссертантом подход к дополнению определяющих соотношений материала моделями измельчения зёрен, основанный на идее неполного измельчения групп зерен представляется вполне адекватным, и важен с точки зрения практических процессов сверхпластической формовки, разработки технологических режимов и достижения конечного результата.

По работе имеется несколько вопросов и замечаний.

1. Моделирование сигмоидальной кривой в главе 1 хотелось бы завершить сравнением с экспериментом. Какую практическую значимость имеет предложенное математическое описание, можно ли его использовать для предсказания конкретных зависимостей напряжение-скорость деформации разных сплавов? Есть ли физический смысл у полученного коэффициента $K=1,8$?
2. В главе 3 при моделировании купола автор правомерно выбрал в качестве ключевого параметра размер зерна, как фактор, определяющий разнотолщинность. Возможно ли дополнительно провести корреляцию с коэффициентом скоростной чувствительности, как параметром, определяющим состояние сверхпластичности и однородность деформации?
3. Автор делает вывод, что возможно предсказание разнотолщинности заготовки с использованием разработанных феноменологических моделей и без применения МКЭ. На взгляд рецензента здесь напрашивается сравнение данных, полученных с использованием разработанной модели с данными МКЭ и с экспериментальными данными, верифицирующими разработанную феноменологическую модель.

4. В главе 4 автор успешно учитывает при моделировании эволюцию распределения зерен по размерам в процессе деформации. Можно рекомендовать провести верификацию полученных моделей для данных по разным сплавам и отличающимся условиям деформации.

5. С позиции материаловедения возникает вопрос о действующих механизмах и о характере деформации при скорости $0,1 \text{ с}^{-1}$ сплава ВТ6, которая выбрана для создания модели измельчения зерен. Сплав скорее всего деформирован не в сверхпластичном состоянии, так как указанная скорость деформации для исследуемого сплава очень высокая, вероятно, скоростная чувствительность низкая, и, как следствие, имеем низкие значения относительного удлинения.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют высокой значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Гончаров Иннокентий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,

доцент кафедры металловедения цветных металлов

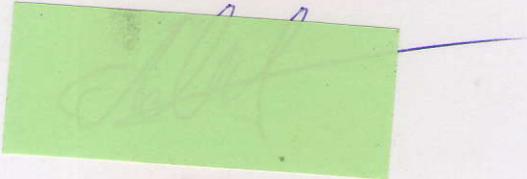
Федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»

МИХАЙЛОВСКАЯ Анастасия Владимировна

подпись

11.10.2021



Контактные данные:

тел.: 7(495)6384480, e-mail: mihaylovskaya@misis.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

Адрес места работы:

119049, (РФ) г. Москва, Ленинский проспект, д. 4,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС», кафедра металловедения цветных металлов

Тел.: телефон организации; e-mail: kancela@misis.ru

Подпись сотрудника Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСиС»

А.В. Михайловской удостоверяю:

кадровый работник

11.10.2021

Подпись Михайловской

Профессор по безопасности

и другим вопросам



затверждаю
Н.М. Неадов