

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Бобрук Елены Владимировны

на тему

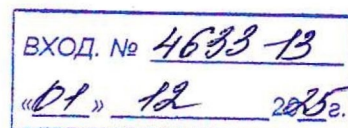
**«Наномасштабные особенности границ зерен и механизмы
низкотемпературной сверхпластичности наноструктурированных
сплавов на основе алюминия»**

по специальности

2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертационная работа Е. В. Бобрук посвящена поискам закономерностей структурно-фазовых превращений в процессе формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры с образованием наноразмерных частиц вторых фаз и зернограницных сегрегаций атомов легирующих элементов в сплавах систем легирования Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Mn, Al-Mg-Si, Al-Cu, Al-Cu-Mg. Это исследование нацелено на расширение температурно-скоростного диапазона сверхпластичности таких УМЗ сплавов и на выявление особенностей ее реализации при понижении температуры и повышении скорости деформации сплава при условии сохранения его высокой прочности после формообразующей операции. Для достижения этой цели автор провел систематические обширные научные исследования, используя современные методики получения указанных УМЗ алюминиевых сплавов, экспериментального изучения их структуры и механических свойств, а также в ряде случаев компьютерного моделирования формирования структуры сплава и механического поведения модельных образцов, как в процессе механических испытаний, так и при изготовлении металломатричного волокнистого композита. В результате автором получен большой массив научной информации, которая несомненно



обладает высокой научной ценностью и будет востребована в разнообразных практических применениях.

Актуальность темы исследования

Актуальность темы диссертации и полученных автором результатов не вызывает никаких сомнений. Научные исследования способов получения УМЗ металлов и сплавов, их структуры, свойств и возможности практического использования проводятся уже более 30 лет, и все эти годы это направление остается в числе наиболее важных и перспективных направлений физического материаловедения во всех промышленно развитых странах мира. Ключевым разделом этого направления является изучение структурных особенностей и роли границ зерен (ГЗ) в формировании физико-механических свойств УМЗ металлов и сплавов. Именно в этом русле выполнена представленная диссертационная работа. Особую актуальность ей придает то, что она непосредственно нацелена на выявление тех наномасштабных особенностей структуры ГЗ и тех связанных с этими особенностями механизмов пластической деформации, которые способствуют реализации эффекта сверхпластичности в таких материалах при более высоких скоростях деформации и при более низких температурах, чем в обычных мелкозернистых металлах и сплавах. Расширение температурно-скоростного диапазона сверхпластичности УМЗ сплавов с сохранением их высокой прочности после формообразующей операции – чрезвычайно актуальная задача для развития современных технологий металлообработки.

Оценка структуры и содержания работы

Структура и содержание диссертационной работы Е. В. Бобрук соответствуют выполненным автором исследованиям. Диссертация состоит из краткого введения, пяти глав, в которых описаны полученные автором результаты, краткого списка основных результатов и выводов по работе,

списка литературы и шести приложений, в которых приводятся сведения о полученных автором патентах на изобретения и актах внедрения результатов работы.

В диссертации отсутствует отдельная глава, посвященная обзору литературы по теме исследования. Вместо этого каждая из пяти глав начинается с краткого вводного раздела, в котором приводятся некоторые общие сведения, предваряющие изложение оригинальных результатов автора. Кроме того, информация обзорного характера дается автором по ходу изложения своих результатов. В целом, отсутствие специальной обзорной главы не создает каких-либо неудобств для подготовленного читателя, на которого и ориентирован текст диссертации.

Каждая из пяти глав диссертации содержит описание той части работы, которая посвящена определенному типу алюминиевых сплавов, общим для которых является метод наноструктурирования исходного крупнозернистого материала – это интенсивная пластическая деформация, осуществляемая кручением под высоким давлением (КВД) или равноканальным угловым прессованием (РКУП) и приводящая к формированию в сплаве УМЗ структуры, характерной для каждого из исследуемых сплавов. Такое наноструктурирование с последующей термомеханической обработкой ведет к частичному распаду твердого раствора и, в зависимости от химического состава сплава и режимов термомеханической обработки, к различным изменениям дефектной структуры и фазового состава как внутри зерен, так и по их границам. Наряду с ультрамелким зерном эти изменения вызывают существенное улучшение прочностных характеристик сплавов и могут приводить к проявлению в них эффекта низкотемпературной сверхпластичности. При этом физические механизмы, вызывающие этот эффект, могут быть разными для сплавов разного химического состава.

Так, в главе 1 изложены результаты экспериментов с модельными УМЗ сплавами системы Al-Zn. Показано, в частности, что в этих сплавах распад твёрдого раствора сопровождается образованием прослоек Zn шириной 2-3

нм по ГЗ и частиц фазы Zn внутри зерен и в тройных стыках ГЗ. Для УМЗ сплава Al-30Zn выявлены особенности механизма сверхпластичности при комнатной температуре, которые заключаются в сочетании зернограницного проскальзывания (ЗГП) и вращения зерен при непрерывном сегрегировании атомов Zn на ГЗ путем деформационно-стимулированной диффузии. Автор приходит к важному заключению, что именно сегрегации и прослойки Zn на ГЗ стимулируют ЗГП и вращение зерен при комнатной температуре.

Глава 2 содержит описание исследования особенностей распада пересыщенного твердого раствора в высокопрочном УМЗ сплаве Al-Zn-Mg-Zr. Показано, что этот распад происходит с образованием частиц η и η' фазы $MgZn_2$ в теле и по ГЗ, неоднородных сегрегаций Mg и прослоек атомов Zn на ГЗ. Здесь установлен эффект сверхпластичности в УМЗ сплавах Al-Mg-Zn и Al-Zn-Mg-Zr при температурах от 120 до 200 °С с наибольшим удлинением при скоростях деформации 5×10^{-4} при 170 °С и 10^{-3} с^{-1} при 200 °С. Сделан вывод, что сверхпластичность здесь осуществляется за счет ЗГП, поддерживаемого прослойками атомов Zn на ГЗ, и при этом неоднородные зернограницные сегрегации Mg и наночастицы вторичных фаз внутри зёрен ограничивают миграцию ГЗ и подавляют скольжение решеточных дислокаций.

В главе 3 приведены результаты изучения структуры и свойств промышленного деформируемого термически неупрочняемого сплава 1565ч системы Al-Mg-Mn после наноструктурирования методами КВД при комнатной температуре и РКУП по схеме «Комфорт» при 200 °С с последующей теплой изотермической прокаткой. Здесь установлен эффект высокоскоростной (при скорости деформации порядка 10^{-2} с^{-1}) сверхпластичности в диапазоне температур 250-300 °С. Показано, что к такой свехпластичности приводит кооперативное ЗГП в сочетании с внутризеренным дислокационным скольжением. При этом наноразмерные частицы вторичных фаз Al_3Mg_2 , Al_6Mn и Al_3Zr и сегрегации атомов Mg на ГЗ

подавляют миграцию ГЗ и скольжение решеточных дислокаций, предотвращая рост зерен.

Глава 4 посвящена описанию исследований структурно-фазовых превращений в термически упрочняемых сплавах систем Al-Mg-Si, Al-Cu и Al-Cu-Mg в процессе деформационно-термической обработки, включающей разные методы интенсивной пластической деформации – КВД и РКУП в параллельных каналах. Показано, что в результате такой обработки формируется УМЗ структура со специфическим распределением легирующих элементов в виде вторичных фаз внутри зерен и сегрегаций атомов легирующих элементов на ГЗ, что приводит к проявлению эффекта сверхпластичности в интервале температур 150-270 °С.

Наконец, в главе 5 на основе результатов, изложенных в предыдущих главах, обобщаются условия и критерии проявления эффекта сверхпластичности при пониженных температурах и повышенных скоростях деформации в УМЗ сплавах систем Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Mn, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg с определением роли легирующих элементов в реализации этого эффекта. В частности, отмечено, что легирование цинком УМЗ алюминиевых сплавов приводит к образованию прослоек шириной 2-3 нм атомов Zn на ГЗ, что облегчают ЗГП и способствуют вращению зерен за счёт образования в фазе Zn плоскостей легкого скольжения вдоль ГЗ. Присутствие других легирующих элементов ведет к образованию неоднородных сегрегаций на ГЗ и наночастиц вторичной фазы внутри зёрен. Зернограничные сегрегации ограничивают миграцию ГЗ, а внутризеренные наночастицы вторичной фазы препятствуют скольжению решеточных дислокаций, что в совокупности ведет к увеличению вклада ЗГП и к проявлению эффекта сверхпластичности, при которой сохраняется высокопрочное состояние УМЗ сплава. Заключают главу 5 разделы, в которых с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов и физического эксперимента установлены режимы формирования изделий сложной формы в условиях многоосного нагружения в режиме низкотемпературной сверхпластичности УМЗ сплава

Al-Zn-Mg-Zr и получения прессованием в условиях сверхпластичности при температуре 300 °С волокнистого композитного материала с матрицей из УМЗ сплава Al-Mg-Mn, армированной однонаправленными волокнами бора.

Таким образом, по своей структуре и содержанию диссертация представляет собой целостную научную работу, построенную естественно и логично, от фундаментального системного исследования особенностей структуры и механического поведения ряда УМЗ алюминиевых сплавов до демонстрации возможности практического применения присущего им эффекта низкотемпературной сверхпластичности для создания перспективных технологий получения конструкционных материалов с минимальной деградацией структуры и свойств в процессе изготовления полуфабрикатов или изделий сложной формы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации Е. В. Бобрук, представляются совершенно обоснованными, поскольку естественно следуют из обширного комплекса экспериментальных исследований автора, выполненных на высоком научном уровне с использованием современного научного оборудования, и не противоречат уже известным результатам.

Достоверность и новизна полученных результатов

О достоверности результатов диссертации Е. В. Бобрук свидетельствует то, что они были получены с применением современных методик экспериментальных исследований структуры, тепловых и механических свойств УМЗ алюминиевых сплавов на поверенном оборудовании. Часть экспериментов проводилась в режиме «in-situ» в колонне электронного микроскопа. Экспериментальные работы сопровождалась двухуровневым компьютерным моделированием – атомным,

с использованием теории функционала электронной плотности, и континуальным, с применением метода конечных элементов. Кроме того, о достоверности полученных результатов говорит их соответствие данным, известным из мировой научной литературы, их рецензирование и публикация в высокорейтинговых отечественных и международных научных журналах, а также их апробация на многих основных международных и отечественных конференциях.

Новизна полученных в диссертации Е. В. Бобрук результатов вполне очевидна. В работе впервые проведено систематическое и комплексное исследование закономерностей структурно-фазовых превращений, приводящих к проявлению эффекта низкотемпературной сверхпластичности в различных УМЗ алюминиевых сплавах. Новизна этого исследования дополнительно подтверждаются тем, что основные материалы работы опубликованы в таких престижных отечественных и международных научных журналах первого ряда как Физика металлов и металловедение, Физическая мезомеханика, Деформация и разрушение материалов, Письма о Материалах, Acta Materialia, Advanced Engineering Materials, Journal of Alloys and Compounds, Journal of Materials Research, Journal of Materials Science, Materials, Materials Letters, Materials Research Letters, Materials Transactions, Scripta Materialia и др.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Полученные Е. В. Бобрук результаты имеют высокую теоретическую и практическую значимость.

Теоретическая значимость обусловлена тем, что автор обосновал подходы к получению УМЗ алюминиевых сплавов, в структуре которых важное место занимают наноразмерные частицы вторичных фаз и ГЗ с сегрегациями легирующих элементов, которые играют ключевую роль в реализации эффекта низкотемпературной сверхпластичности, после которой

сохраняется высокопрочное состояние сплава. В процессе выполнения работы получен огромный массив новых знаний о механизмах и особенностях этого эффекта в УМЗ сплавах систем Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Mn, Al-Mg-Si и Al-Cu-Mg, который позволил автору построить карту температурно-скоростных условий его реализации в этих сплавах.

Практическая значимость полученных автором результатов подтверждается четырьмя патентами на способы получения УМЗ алюминиевых сплавов с заданной структурой и свойствами, и на способы изготовления из подобных сплавов с использованием эффекта низкотемпературной сверхпластичности деталей сложной формы и волокнистого металлического композитного материала, армированного высокопрочными непрерывными волокнами.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе Е. В. Бобрук можно сделать ряд критических замечаний, большая часть из которых носит технический характер и относится к стилистике представления полученных результатов.

1. В тексте диссертации встречаются опечатки, пропуски и неправильные окончания слов, неправильно поставленные и пропущенные запятые, неудачные и неправильные предложения. Например, в первом абзаце на стр. 51 сказано: «На рисунках 1.18-1.19 показаны зависимости напряжения течения (σ) от скорости деформации ($\dot{\epsilon}$), коэффициента скоростной чувствительности (m) и удлинения до разрушения (δ) [3,5,6]». На самом деле, на этих рисунках даны зависимости напряжения течения и удлинения до разрушения от скорости деформации. На стр. 58 использованы неудачные выражения: «методом дифракции линий Кикучи на просвет»; «Испытание растяжением приостанавливали на 10 минут каждые 20 % деформации в режиме обратно рассеянных электронов». На стр. 65 на гистограммах, показанных на рис. 1.28, размер частиц указан в процентах. На стр. 68-69 в подписи к рис. 1.31 и в соответствующем тексте вместо (в, г)

следует читать (б, в). На стр. 130 первый абзац после рис. 3.17 повторяет предыдущий абзац. На стр. 164 в первой строке после формулы (4.9) использовано неудачное название для множителя $A = 3\mu b\Omega\varepsilon/\pi$: « A – упругое энергетическое взаимодействие». На стр. 167 в формуле (4.13) не хватает открывающей скобки. В списке литературы статья [185] повторяет статью [176].

2. Особенно большое количество неудачных выражений содержит п. 1.4.2 (стр. 70–75). Во-первых, здесь неудачно само название этого пункта: «Расчеты в рамках теории функционала плотности границ зерен». Далее, в первом абзаце на стр. 70 сказано: «Для моделирования проскальзывания по ГЗ атомы зафиксированы в направлении проскальзывания и свободно релаксировали в других направлениях». Если это было действительно так, как сказано, то непонятно, как тогда может происходить проскальзывание, если атомы зафиксированы в направлении проскальзывания? На стр. 73 в строке 4 сказано: «скользящая кривая энергии». Может быть, имелась в виду «кривая энергии скольжения»? Там же, в строке 9 сказано: «рассчитана энергия скользящего барьера $E_{ГЗ}^S$, связанная с миграцией ГЗ». Может быть, имелся в виду энергетический барьер для скольжения или энергия активации скольжения? При чем тут миграция ГЗ, если речь идет о проскальзывании? На рис. 1.33 по оси ординат отложена все та же «энергия скользящего барьера».

3. Некоторые данные вызывают вопросы и требуют комментариев. Так, если верить кривым, приведенным на рис. 1.2.1(а) на стр. 54, то получается, что в 3 раза большее содержание цинка в УМЗ сплаве Al-Zn дает меньшее напряжение течения. Если это действительно так, то как это можно объяснить? В работе [3], на которую ссылается автор, эти данные найти не удалось.

4. На стр. 91 в 3-4-й строках сверху сказано: «Поскольку количество ГЗ и плотность дислокаций больше для образца, обработанного РКУП_{КТ}, наблюдается снижение барьера для выделения частиц». Здесь непонятно, как

получилось больше ГЗ, если после КВД размер зерна был порядка 100 нм, а после РКУП стал порядка 200 нм?

5. На стр. 136 в 4-5-й строках снизу сказано: «Внутри отдельных зерен также обнаружены скопления решеточных дислокаций (Рисунок 4.16)». Здесь неясно, имеются ли в виду просто группы из нескольких дислокаций, которые действительно видны, или же действительно автор пишет о дислокационных скоплениях в обычном смысле, когда в одной плоскости залегает до 10 и более одинаковых дислокаций?

6. В п. 5.3 описаны эксперименты по получению волокнистого композитного материала с матрицей из УМЗ сплава Al-Mg-Mn и волокнами бора прессованием с помощью эффекта сверхпластичности при температуре 300 °С. Хотя такие эксперименты и важны для демонстрации возможности практического применения этого эффекта, однако вызывает большие сомнения перспектива внедрения этого подхода в технологии промышленного производства изделий из металломатричных волокнистых композитов. Температура 300 °С представляется слишком низкой для получения достаточно прочной связи по границе между волокном и матрицей, а полученная объемная доля волокон 30% слишком мала, чтобы обеспечить те значения прочности и жесткости композита, которые могут оправдать высокие затраты на его производство.

Конечно, сделанные критические замечания несколько не умаляют значимости первоклассного диссертационного исследования Е. В. Бобрук. В целом, ее работа представляет собой законченное научное исследование, объединенное единым замыслом и построенное логично и естественно. Ее отличает стройная композиция и хорошее оформление. Материал диссертации достаточно полно отражен в опубликованных автором работах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Заключение

Диссертация Бобрук Елены Владимировны на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема расширения диапазона температурно-скоростных условий реализации эффекта сверхпластичности в наноструктурированных УМЗ алюминиевых сплавах с сохранением их высокой прочности после формообразующей операции. Решение этой проблемы имеет важное хозяйственное значение, что соответствует требованиям п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней», а ее автор, Бобрук Елена Владимировна, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук

ГУТКИН Михаил Юрьевич,

главный научный сотрудник, зав. лабораторией

механики наноматериалов и теории дефектов

Федерального государственного

бюджетного учреждения науки

Института проблем машиноведения

Российской академии наук



Докторская диссертация защищена по специальностям

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

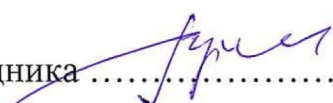
01.04.07 – Физика твердого тела

Адрес места основной работы:

199178, г. Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., д. 61,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
Лаборатория механики наноматериалов и теории дефектов
Рабочий телефон: 7(812)3214764
Адрес эл. почты: m.y.gutkin@gmail.com

21.11.2025 г.

Подпись сотрудника 

ИПМаш РАН М.Ю. Гуткина удостоверяю:



ИПМаш РАН

 Э.А. Толмачева

21.11.2025