

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Бобрук Елены Владимировны "Наномасштабные особенности границ зерен и механизмы низкотемпературной сверхпластичности наноструктурированных сплавов на основе алюминия", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы

Актуальность темы исследования

Большой интерес, проявляемый в последние годы к наноструктурным металлам и сплавам, полученным методами интенсивной пластической деформации (ИПД), обусловлен их уникальными физическими и механическими свойствами, из-за малого размера зерен и наличия большой протяженности неравновесных внутренних границ раздела. Несмотря на большое число работ по данной тематике, посвященных преимущественно структурным изменениям, происходящим в процессе ИПД, исследованиям фазовых превращений уделяется значительно меньшее внимание. Вместе с тем, вследствие вносимого большого числа дефектов при формировании наноструктурных состояний в сплавах с использованием интенсивной пластической деформации может наблюдаться изменение кинетики развития диффузионно-контролируемых фазовых превращений. В этой связи, систематические исследования закономерностей структурно-фазовых превращений в целом ряде сплавов на основе алюминия в условиях ИПД различными методами и их влияние на механические и сверхпластичные (СП) свойства, выполненные в диссертационной работе Бобрук Е.В. несомненно представляются актуальной тематикой современного материаловедения. Полученные в работе результаты представляют большой как научный, так и практический интерес, обусловленный тем, что эволюция зёрненной структуры, дефектов кристаллического строения, а также изменение фазового состава, в том числе на границах зерен, играют важнейшую роль в повышении эксплуатационных и технологических свойств изучаемых сплавов, а также в их практическом применении и развитии нанотехнологий.

Научная новизна и достоверность полученных результатов

В качестве наиболее важных научных результатов, полученных в диссертационной работе Бобрук Е.В., можно отметить следующие:

- впервые были выявлены закономерности изменения фазового состава в НС сплавах системы Al-Zn при ИПД в результате распада пересыщенного твёрдого раствора с образованием наноразмерных выделений второй фазы в теле и на тройных стыках зерен, сопровождающегося сегрегацией атомов Zn вблизи ГЗ, что приводит к понижению температуры реализации сверхпластичности вплоть до комнатной;

- были выявлены основные закономерности формирования НС состояния в сплавах систем Al-Zn-Mg, Al-Mg-Si и Al-Cu-Mg конструкционного назначения, сопровождающегося распадом пересыщенного твердого раствора с образованием сегрегаций атомов Zn, Mg, Cu и контролируемым распределением частиц вторичной фазы для достижения высокопрочного состояния в сочетании с эффектом НТСП при температурах на 200-250 градусов ниже проявления СП в мелкозернистых аналогах;
- было впервые установлено влияние наночастиц вторичных фаз и сегрегаций атомов легирующих элементов на реализацию НТСП в сплавах систем Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si и Al-Mg-Mn с УМЗ структурой;
- была составлена карта температурно-скоростных условий проявления НТСП в сплавах систем Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si и Al-Mg-Mn в НС состоянии с учетом наномасштабных особенностей тонкой структуры и феноменологическое описание действия различных факторов, обуславливающих реализацию ЗГП/КЗГП в широком температурно-скоростном интервале деформирования.

Научные результаты, полученные в диссертации, являются, несомненно, достоверными и обоснованными, поскольку при решении поставленных задач был задействован комплекс современных экспериментальных исследований, включающий в себя как методы прецизионного локального анализа микроструктуры с помощью высокоразрешающей просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, атомной пространственной томографии, так и интегральные методы рентгеновской дифракции для получения данных о структурно-фазовых состояниях с высокой достоверностью. Следует отметить хорошее согласие полученных экспериментальных результатов с теорией, а также результатами других авторов. Материал, представленный в диссертации, изложен ясно и последовательно. Результаты работы, опубликованные в ведущих российских и зарубежных журналах, были широко представлены на авторитетных всероссийских и международных конференциях, семинарах. Цели и задачи, поставленные в работе, полностью выполнены.

Личный вклад автора подтверждается его непосредственным участием в постановке цели и задач диссертационной работы, проведении исследований с использованием различных экспериментальных методик, анализе и обобщении полученных экспериментальных данных, а также проведении расчетов и формулировке положений и выводов.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Теоретическая значимость работы состоит в обосновании подходов к получению специальных микроструктур с выделениями наноразмерных частиц вторичных фаз и сегрегаций на ГЗ сплавах на основе Al для эффективного управления механизмами пластической деформации и обеспечения уровня пластичности, достаточного для осуществления формообразования в условиях НТСП, с сохранением высокопрочного состояния. Кроме того, были выявлены новые закономерности структурно-фазовых

превращений в сплавах систем Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Mn, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg для построения термодинамических диаграмм состояний.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в запатентованном способе формирования НС состояния в высокопрочном сплаве системы Al-Cu-Mn, который проявляет эффект НТСП при температуре 270°C, а также способа получения алюмоматричного композиционного материала, состоящего из НС матрицы сплава Al-Mg-Mn, армированной непрерывным высокопрочным неметаллическим волокном, в условиях реализации НТСП. Кроме того, выявлены феноменологические факторы, обуславливающие реализацию ЗГП/КЗГП в разных температурно-скоростных интервалах деформирования, обеспечивающие развитие НТСП в НС алюминиевых сплавах различного класса.

Структура и краткое содержание диссертации

Диссертационная работа изложена на 242 страницах, иллюстрирована 123 рисунками, состоит из введения, пяти глав, заключения с общими выводами по полученным результатам, а также списка цитируемой литературы, включающего 222 источника.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, в соответствии с которой сформулирована цель и поставлены задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость работы, а также выдвинуты положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены результаты исследований закономерностей распада твердого раствора с образованием частиц фазы Zn в теле, тройных стыках и прослоек Zn на границах зерен НС сплавов системы Al-Zn с разным содержанием Zn (2, 5, 10 и 30 вес.%) в процессе деформационно-термической обработки, включающей ИПД и кратковременные *in-situ* отжиги. Изучено механическое поведение при пониженных температурах, а также определены особенности механизма СП при низких гомологических температурах, в том числе с помощью *in-situ* наблюдения, на примере модельного НС сплава Al-30Zn. Показана определяющая роль диффузии атомов Zn, которая вносит значительный вклад в реализацию механизма НТСП, в том числе в условиях растяжения при комнатной температуре.

Во второй главе на примере высокопрочных НС сплавов Al-Zn-Mg рассмотрены закономерности распада твердого раствора с образованием зернограницных сегрегаций атомов Zn и Mg и вторичной η -фазы ($MgZn_2$) и их влияние на реализацию НТСП. Особенности сегрегации атомов Mg и Zn на ГЗ в НС сплаве Al-Mg-Zn-Zr, обработанном КВД при комнатной температуре, были проанализированы с помощью численных и аналитических расчетов. В численных расчетах было показано, что в результате ИПД проскальзывание по ГЗ может ослабить внешнее напряжение сдвига, образуя неоднородное поле напряжений вокруг границ зерен, по которым осуществляется проскальзывание. Оцененный по уравнению СП деформации

коэффициент зернограницной диффузии Zn в алюминиевом сплаве оказался на два порядка выше значения, рассчитанного для случая зернограницной самодиффузии Al.

В третьей главе рассмотрены особенности формирования НС состояния в процессе деформационно-термической обработки и его влияние на СП поведение при пониженных температурах и повышенных скоростях деформации сплава 15654 системы Al-Mg-Mn. Установлено, что в термически неупрочняемом НС сплаве указанной системы наблюдается проявление высокоскоростной СП (скорость деформации до 10^{-2} с^{-1}) при температуре деформации 300°C , которая осуществляется путем сочетания кооперативного ЗГП и ВДС, затрудненного внутризерненными наночастицами. Показано, что именно ВДС обеспечивает аккомодацию кооперативного ЗГП в тройных стыках, способствуя развитию сверхпластичности в указанных условиях.

В четвёртой главе рассмотрено изменение кинетики распада пересыщенного твердого раствора с образованием вторичной фазы и сегрегаций атомов легирующих элементов по границам зерен Al в процессе деформационно термической обработки, включающей ИПД, термически упрочняемых НС сплавов систем Al-Mg-Si и Al-Cu-Mg, которые не склонны к проявлению СП в мелкозернистом состоянии. Описано механическое поведение при пониженных температурах, а также определены особенности механизма СП. Проведенные исследования показали, что в исследуемых НС сплавах на основе алюминия формируется специфическое распределение легирующих элементов в виде ультрадисперсных вторичных фаз и сегрегаций атомов легирующих элементов, либо прослоек на ГЗ, что приводит к уникальному комплексу свойств, с повышенной прочностью и реализацией СП.

В пятой главе обобщены условия (размер зерен, температура и скорость деформации) и предложены критерии (пластичность, напряжения и коэффициент скоростной чувствительности) реализации НТСП в НС алюминиевых сплавах различных систем (Al-Zn, Al-Zn-Mg, Al Mg-Mn, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg). Методом конечных элементов с использованием программного комплекса «Деформ» проведено моделирование процесса вытяжки НС сплавов системы Al-Zn-Mg при скоростях деформации 10^{-3} и 10^{-2} с^{-1} и температурах 120 и 150°C , при которых были достигнуты повышенные значения пластичности. По результатам численного моделирования и экспериментальных исследований определены оптимальные параметры многоосного растяжения образцов из НС сплава Al-Zn-Mg.

В заключении сформулированы основные выводы по полученным в работе результатам.

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

Научные положения, выносимые на защиту, и основные выводы работы физически обоснованы с использованием адекватной интерпретации полученных экспериментальных данных, сопоставлением результатов оригинальных исследований

с имеющимися в современной литературе модельными представлениями и экспериментальными данными других авторов. Представленные результаты исследований признаны отечественной и зарубежной научной общественностью, прошли широкое обсуждение на российских и международных научных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Результаты диссертационной работы представлены в 54 статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и входящих в базы Scopus, Web of Science и РИНЦ, а также 4 патентах РФ. Апробация результатов была сделана на ведущих всероссийских и международных конференциях по физическому материаловедению и развитию нанотехнологий.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Содержание автореферата в целом отражает полученные в диссертационной работе Бобрук Е.В. результаты и сформулированные общие выводы, и полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе Бобрук Е.В. имеются следующие замечания:

1. Название диссертации не совсем точно отражает содержание работы, поскольку речь в ней идет преимущественно о влиянии на развитие НТСП в алюминиевых сплавах зернограницных сегрегаций и выделений, а не «наномасштабных особенностей» границ зерен.
2. На мой взгляд, в работе недостаточное внимание уделено изучению влияния неравновесных границ зерен в исследуемых НС алюминиевых сплавах, полученных методами ИПД, как одному из ключевых факторов развития сверхпластичности при низких температурах, вследствие активации на них диффузионно-контролируемых процессов.
3. В Таблица 5.1 диссертации приведены критерии проявления СП в исследованных в работе алюминиевых сплавах. Как видно из таблицы не во всех случаях можно говорить о развитии низкотемпературной сверхпластичности ($T_{ДЕФ} < 0,5 T_{пл}$).
4. Некоторые выводы диссертации выглядят громоздко и содержат не связанные друг с другом напрямую результаты. Считаю, что можно было бы их сократить с небольшим увеличением числа.
5. Работа хорошо оформлена и тщательно вычитана. В качестве небольшого замечания, связанного с оформлением диссертации можно, пожалуй, отметить неточность в подписях к рисункам 3.12 и 3.13: вместо «удлинение до разрушения», горизонтальную ось правильнее было бы обозначить как «деформация».

В целом сделанные замечания не снижают научную и практическую значимость, и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Заключение

Принимая во внимание всё вышеизложенное, считаю, что диссертация Бобрук Елены Владимировны "Наномасштабные особенности границ зерен и механизмы низкотемпературной сверхпластичности наноструктурированных сплавов на основе алюминия" представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную для современного материаловедения тему. Автором проведено комплексное исследование закономерностей и природы фазовых превращений в наноструктурных сплавах на основе алюминия различных систем при интенсивной пластической деформации, определена взаимосвязь фазовых превращений и механизмов развития низкотемпературной сверхпластичности. По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов и выводов, диссертация соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (ред. от 01.10.2018), а ее автор, Бобрук Елена Владимировна, заслуживает присуждения ей учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Официальный оппонент:

Найденкин Евгений Владимирович,

Главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения сталей и сплавов ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук по специальности 1.3.8. физика конденсированного состояния.

Найденкин Евгений Владимирович  «27» ноября 2025 г.

Подпись Найденкина Е.В. заверяю
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН
Кандидат физ.-мат. наук



 Н.Ю. Матолыгина

Контактная информация:

Почтовый адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Телефон: +7 (3822) 49-12-45

e-mail: nev@ispms.tsc.ru